



Determinación del contenido fenólico y capacidad antioxidante, en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) sanas y afectadas por la ceniza proveniente del Volcán Cotopaxi

Yandún Pantoja, Miguel Angel

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Biotecnología

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención de título de Ingeniera Biotecnóloga

Mihai Raluca Alexandra, Ph.D.

04 de marzo del 2024



Plagiarism report

Yandun_Miguel_Proyecto (1).pdf



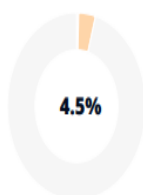
Scan details

Scan time:
March 1th, 2024 at 20:54 UTC

Total Pages:
41

Total Words:
10196

Plagiarism Detection



| Types of plagiarism | | Words |
|---------------------|------|-------|
| Identical | 0.2% | 21 |
| Minor Changes | 0.3% | 26 |
| Paraphrased | 3.8% | 391 |
| Omitted Words | 3.8% | 384 |

AI Content Detection



Text coverage

- AI text
- Human text

Plagiarism Results: (10)

[download](#)

1%

<https://ruidera.uclm.es/server/api/core/bitstreams/85d9a1f4-2c81-4fe0-945d-45da73031f03/content>

Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas Departamento de Química Analítica y Tecnología de Alimentos
Vanessa Mancebo Campos TESIS DO...



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Biotecnología

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Determinación del contenido fenólico y capacidad antioxidante, en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) sanas y afectadas por la ceniza proveniente del Volcán Cotopaxi”** fue realizado por el señor Yandún Pantoja Miguel Angel, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 04 de marzo 2024



Mihai Raluca Alexandra Ph.D.

C. C.: 1757487507



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Biotecnología

Responsabilidad de Autoría

Yo **Yandún Pantoja Miguel Angel**, con cédula ciudadanía n°1723925556, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: "**Determinación del contenido fenólico y capacidad antioxidante, en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) sanas y afectadas por la ceniza proveniente del Volcán Cotopaxi**" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 04 de marzo 2024

Yandún Pantoja Miguel Angel

C. C.: 1723925556




Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Biotecnología

Autorización de Publicación

Yo **Yandún Pantoja Miguel Angel**, con cédula de ciudadanía n°1723925556, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **"Determinación del contenido fenólico y capacidad antioxidante, en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) sanas y afectadas por la ceniza proveniente del Volcán Cotopaxi"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 04 de marzo 2024



Yandún Pantoja Miguel Angel

C. C.: 1723925556

Dedicatoria

A mis amados padres, este logro que ahora celebro no sería posible sin su incansable amor, apoyo y sacrificio. Ustedes han sido las raíces que me han permitido crecer y las alas que me han ayudado a volar. Gracias por ser mi inspiración constante, por creer en mis sueños y por alentarme a perseguir la excelencia.

A través de cada desafío y triunfo, su presencia ha sido la luz que ilumina mi camino. Cada página de esta tesis está impregnada con el amor y la dedicación que ustedes me han brindado a lo largo de los años.

Con profundo agradecimiento, dedico este logro a mis queridos padres, quienes han sido mi mayor fuente de fortaleza y motivación. Su legado de amor y perseverancia es el motor que impulsa mis logros. Este éxito es también suyo, y lo celebro con gratitud por su inquebrantable apoyo.

Con todo mi amor,

Miguel Angel Yandún Pantoja

Agradecimientos

A mis queridos padres, amigos, hermanos y mi tutora.

En este momento de culminación académica, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a aquellos que han sido faros luminosos en mi travesía.

A mis padres, quienes han sido mi mayor apoyo y fuente inquebrantable de amor. Sus sacrificios, paciencia y aliento han sido la brújula que me ha guiado a lo largo de este camino educativo. Este logro es tanto de ustedes como mío.

A mis amigos y hermanos, quienes han compartido risas, desafíos y triunfos a lo largo de esta travesía. Su amistad ha sido un tesoro invaluable que ha enriquecido mi experiencia académica de maneras inimaginables.

A mi tutora, gracias por su dedicación incansable, paciencia y sabiduría. Su orientación experta ha sido la piedra angular de mi éxito académico, y estoy agradecido por el privilegio de tenerla como guía.

A todos ustedes, mi gratitud no tiene límites. Este logro es también suyo, y cada paso ha sido posible gracias a su apoyo constante. Gracias por formar parte de este capítulo tan significativo en mi vida.

Índice de contenido

| | |
|--|----|
| Resumen | 13 |
| Abstract..... | 14 |
| Capítulo I: Introducción | 15 |
| Antecedentes | 15 |
| Justificación del problema | 15 |
| Objetivos | 16 |
| Objetivo General..... | 16 |
| Objetivos Específicos..... | 16 |
| Hipótesis | 17 |
| Hipótesis Nula..... | 17 |
| Hipótesis Alternativa | 17 |
| Capítulo II: Marco Teórico | 17 |
| Origen e Historia | 17 |
| Etimología | 18 |
| Clasificación taxonómica | 18 |
| Morfología de la papa..... | 19 |
| Composición nutricional de la papa | 21 |
| Zonas de producción en Ecuador..... | 21 |
| Requerimientos climáticos..... | 24 |
| Plagas y enfermedades..... | 24 |
| Metabolitos de las plantas | 25 |
| Metabolitos primarios | 26 |
| Metabolitos secundarios | 26 |
| Metabolitos en el género <i>Solanum tuberosum</i> L..... | 27 |
| Metabolitos para determinar el contenido fitoquímico | 28 |
| Ensayo de Folin-Ciocalteu | 28 |
| Capacidad antioxidante | 28 |
| Método para determinar la capacidad antioxidante | 29 |
| Ensayo 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo (DPPH)..... | 29 |
| Ensayo 2,2'-azino-bis-(ácido 3-etilbenzotiazolin-6- sulfónico) (ABTS +)..... | 30 |
| Ensayo del Poder Antioxidante Reductor de Iones Férricos (FRAP) | 31 |
| Ensayo de la Capacidad Antioxidante Reductora del Ion Cúprico (CUPRAC)..... | 31 |
| Ensayo de la capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno (ORAC) | 32 |
| Actividad volcánica en el Ecuador | 33 |

| | |
|--|----|
| Volcán Cotopaxi | 34 |
| Origen de la ceniza volcánica | 35 |
| Composición de la ceniza volcánica | 36 |
| Impacto de la ceniza volcánica en la agricultura | 37 |
| Capítulo III: Metodología | 38 |
| Origen de las muestras | 38 |
| Obtención de especímenes vegetales | 38 |
| Tratamiento de la papa | 38 |
| Obtención de los extractos de papa | 38 |
| Determinación del carácter antioxidante por el método DPPH | 39 |
| Determinación del carácter antioxidante por el método ABTS | 39 |
| Determinación del carácter antioxidante por el método FRAP | 40 |
| Determinación del contenido de fenoles totales (TPC) | 41 |
| Análisis estadístico | 41 |
| Factores de estudio | 41 |
| Unidad experimental | 41 |
| Tratamientos | 41 |
| Diseño de análisis de varianza | 43 |
| Capítulo IV: Resultados | 43 |
| Obtención de la papa | 43 |
| Análisis sensorial | 44 |
| Carácter antioxidante | 44 |
| Determinación del carácter antioxidante por el método DPPH | 44 |
| Determinación del carácter antioxidante por el método ABTS | 45 |
| Determinación del carácter antioxidante por el método FRAP | 46 |
| Contenido fitoquímico | 49 |
| Determinación del contenido de fenoles totales | 49 |
| Capítulo V: Discusión | 52 |
| Conclusiones | 54 |
| Recomendaciones | 55 |
| Capítulo VI: Bibliografía | 56 |

Índice de tabla

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabla 1 | Clasificación taxonómica de la papa | 18 |
| Tabla 2 | Factores importantes para el desarrollo de la papa | 24 |
| Tabla 3 | Composición típica de la ceniza volcánica | 37 |
| Tabla 4 | Diseño experimental factorial para el análisis de la composición fitoquímica de <i>Solanum tuberosum</i> L. con ceniza y sin ceniza..... | 42 |
| Tabla 5 | Diseño experimental factorial para la determinación del carácter antioxidante de <i>Solanum tuberosum</i> L. con ceniza y sin ceniza..... | 42 |
| Tabla 6 | Diseño de ANOVA diseños factoriales propuestos 1x1 y 2x3 de <i>Solanum tuberosum</i> L. con presencia y ausencia de ceniza..... | 43 |
| Tabla 7 | Muestra la relación entre las respuestas experimentales | 44 |
| Tabla 8 | Estadística descriptiva correspondiente al ensayo DPPH | 44 |
| Tabla 9 | Tabla que contiene la estadística descriptiva correspondiente al ensayo ABTS | 45 |
| Tabla 10 | Estadística descriptiva correspondiente al ensayo FRAP | 46 |
| Tabla 11 | Prueba de Duncan de los métodos antioxidantes | 48 |
| Tabla 12 | Estadística descriptiva del ensayo de fenoles totales | 49 |
| Tabla 13 | Prueba de Duncan para el método TPC..... | 51 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Zonas productoras de la papa..... | 23 |
| Figura 2 Principio de la reacción del ensayo. | 32 |
| Figura 3 Porcentaje de inhibición de las muestras en presencia y ausencia de ceniza de <i>Solanum tuberosum</i> L. por el método DPPH..... | 45 |
| Figura 4 Porcentaje de inhibición de las muestras en presencia y ausencia de ceniza de <i>Solanum tuberosum</i> L. por el método ABTS. | 46 |
| Figura 5 Porcentaje de inhibición de las muestras en presencia y ausencia de ceniza de <i>Solanum Tuberosum</i> L. por el método FRAP | 47 |
| Figura 6 Gráfica de interacción métodos vs muestra..... | 48 |
| Figura 7 Comparación del contenido de fenoles en <i>Solanum tuberosum</i> L. en muestras de presencia y ausencia de ceniza volcánica..... | 50 |
| Figura 8 Grafica interacción ceniza vs método | 51 |

Listado de abreviaturas

MSNM: Metros sobre el nivel del mar

ROS: Especies reactivas de oxígeno

PMTV: Virus Potato mop-top

TAC: Capacidad antioxidante total

DPPH: 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo

LOI: Pérdida por ignición

ABTS+: 2,2'-azino-bis-(ácido 3-etilbenzotiazolin-6- sulfónico)

FRAP: Poder antioxidante reductor de iones férricos

CUPRAC: Capacidad antioxidante reductora del ion cúprico

Cu +2: Ion cúprico

ORAC: Capacidad de absorción de radicales de oxígeno

H+: Hidrogeno

CICTE: Centro de investigación científica y tecnológica del ejército

TPC: Contenido de fenoles totales

TFC: Contenido de flavonoides totales

GFW: Gramos de muestra fresca

TRX: Trolox

AICI3: Cloruro de aluminio

TPTZ: Tris (2-piridil)-s-triazina

Resumen

Solanum tuberosum L. producido en Latacunga, Ecuador, representa un elemento fundamental en la agricultura y la vida cotidiana de la región. Conocida por su riqueza en variedades y su adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas y suelos, la papa cultivada en Latacunga ha sido durante mucho tiempo una fuente de sustento para las comunidades locales. El Cotopaxi ha entrado en erupción en varias ocasiones a lo largo de la historia, desencadenando flujos de lava, cenizas y gases volcánicos. Estos eventos han generado consecuencias adversas para la agricultura, especialmente para los cultivos de papa. Las cenizas volcánicas depositadas sobre los campos de cultivo pueden obstruir la luz solar, alterar la composición del suelo y afectar negativamente la capacidad de las plantas para absorber nutrientes esenciales. Los compuestos bioactivos brindan a la papa diversas aplicaciones, ya que actúan como antioxidantes que combaten el estrés oxidativo y los radicales libres en el organismo. Las muestras de papa con presencia de ceniza tienen una mayor cantidad de capacidad antioxidante presentando valores de $9,08 \mu\text{molTRX/g fw}$ (DPPH), $5,82 \pm 1,44 \mu\text{molTRX/g fw}$ (ABTS) y $3,46 \pm 0,03 \mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g fw}$ (FRAP). Se determinó la concentración de fenoles totales mediante el método de Folin Ciocalteu, revelando una mayor presencia en la muestra con ceniza, con un valor de $1,24 \pm 0,07 \text{ mg GAE/g fw}$. Todos los ensayos fueron cuantificados utilizando un espectrofotómetro.

Palabras clave: *Solanum tuberosum* L., antioxidante, ceniza, fenoles.

Abstract

Solanum tuberosum L. produced in Latacunga, Ecuador, represents a fundamental element in agriculture and daily life in the region. Known for its richness in varieties and its adaptability to different climatic conditions and soils, the potato grown in Latacunga has long been a source of livelihood for local communities. Cotopaxi has erupted several times throughout history, unleashing flows of lava, ash and volcanic gases. These events have generated adverse consequences for agriculture, especially for potato crops. Volcanic ash deposited on crop fields can block sunlight, alter soil composition, and negatively affect plants' ability to absorb essential nutrients. Bioactive compounds provide potatoes with various applications, since they act as antioxidants that fight oxidative stress and free radicals in the body. Potato samples with the presence of ash have a greater amount of antioxidant capacity, presenting values of 9.08 $\mu\text{molTRX/g fw}$ (DPPH), $5.82 \pm 1.44 \mu\text{molTRX/g fw}$ (ABTS) and $3.46 \pm 0.03 \mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g fw}$ (FRAP). The concentration of total phenols was determined using the Folin Ciocalteu method, revealing a greater presence in the sample with ash, with a value of $1.24 \pm 0.07 \text{ mg GAE/g fw}$. All assays were quantified using a spectrophotometer.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., antioxidant, ash, phenols.

Capítulo I: Introducción

Antecedentes

La papa es un cultivo de importancia global ampliamente cultivado. Destaca por su eficacia en la producción de proteínas por unidad de tiempo y área, así como en la obtención de energía, superando a otros cultivos (Singaña, 2021).

La región de Cotopaxi, ubicada en Ecuador, se destaca por su producción agrícola, siendo uno de los principales cultivos de *Solanum tuberosum* L. Sin embargo, la actividad volcánica del Cotopaxi, uno de los volcanes más activos del país, ha tenido un impacto significativo en la agricultura de la zona. La erupción del volcán en agosto de 2015 generó una serie de problemas para los agricultores locales, incluyendo la pérdida de cultivos, daños en la infraestructura y la evacuación de comunidades enteras debido a la amenaza de flujos de lodo y cenizas (Basantes et al., 2020).

La producción de papa en la región de Cotopaxi es vital para la economía local y nacional. Esta área es conocida por su suelo fértil y su clima favorable para el cultivo de tubérculos. Sin embargo, la actividad volcánica representa una amenaza constante para los agricultores, ya que las erupciones pueden cubrir vastas extensiones de tierra con cenizas volcánicas, lo que afecta negativamente la productividad agrícola y pone en peligro la seguridad alimentaria de la región (Andrade et al., 2002).

Justificación del problema

La determinación del contenido fenólico y la capacidad antioxidante en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) se presenta como un área de investigación vital, especialmente cuando se considera la influencia de la ceniza proveniente del Volcán Cotopaxi. Este fenómeno natural ha suscitado preocupación debido a su potencial impacto en la salud y calidad de los

cultivos, particularmente en la papa, que es una fuente esencial de nutrientes en diversas comunidades.

La ceniza volcánica es conocida por contener compuestos químicos que podrían afectar la composición química y la salud de las plantas. El contenido fenólico y la capacidad antioxidante son indicadores cruciales de la respuesta fisiológica de las plantas ante condiciones de estrés ambiental. La evaluación de estos parámetros en plantas de papa, tanto sanas como afectadas por la ceniza del Volcán Cotopaxi, proporcionará información valiosa sobre las posibles adaptaciones y respuestas bioquímicas de la papa a este fenómeno natural.

Esta investigación no solo contribuirá al entendimiento de los efectos específicos de la ceniza volcánica en la calidad nutricional de las papas, sino que también podría tener implicaciones para la seguridad alimentaria en regiones afectadas por actividad volcánica. Además, al determinar la variación en el contenido fenólico y la capacidad antioxidante, se podrían identificar posibles estrategias agronómicas para mitigar los impactos negativos de la ceniza en los cultivos de papa.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el contenido fenólico y carácter antioxidante, en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) sanas y afectadas por la ceniza proveniente del volcán Cotopaxi.

Objetivos Específicos

Recolectar plantas de *Solanum tuberosum* L. sanas y afectadas por la ceniza proveniente del volcán Cotopaxi para el análisis fitoquímico.

Analizar el contenido fenólico y capacidad biológica de las plantas de *Solanum tuberosum* L. sanas y afectadas por la ceniza proveniente del volcán Cotopaxi.

Determinar el carácter antioxidante de los extractos obtenidos de *Solanum tuberosum* L. sanas y afectadas por la ceniza proveniente del volcán Cotopaxi mediante los métodos de DPPH, FRAP y ABTS.

Hipótesis

Hipótesis Nula

Las plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) afectadas por la ceniza provenientes del volcán Cotopaxi muestran alteraciones significativas en la concentración de compuestos fenólicos, así como en la capacidad antioxidante en comparación con las plantas de papa sanas.

Hipótesis Alternativa

Las plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) afectadas por la ceniza provenientes del volcán Cotopaxi no muestran alteraciones significativas en la concentración de compuestos fenólicos, ni en la capacidad antioxidante en comparación con las plantas de papa sanas.

Capítulo II: Marco Teórico

Origen e Historia

El Oeste de América del Sur es el principal centro de origen de la papa y sus parientes silvestres entre la frontera de Bolivia y Perú (De Haan & Rodriguez, 2016). Donde crece de forma silvestre en la naturaleza y presenta la más amplia diversidad de formas como forma, tamaño, color, sabor, etc. del tubérculo. A partir de las primeras especies silvestres *Solanum bukasovii*, *Solanum canasense* y *Solanum multissectum* se cree que se originó *Solanum stenotomum* considerada la primera papa domesticada (Ochoa, 1990; Sukhotu et al., 2005; Sukhotu & Hosaka, 2006). Desde Sudamérica la papa inició tardíamente su recorrido por el continente, pero adquirió gran importancia en la década de 1530 cuando los conquistadores españoles buscaron oro en Perú. Se introdujo la papa a Europa entre los años 1570 y 1593. La papa fue

introducida en la India desde Europa a principios del siglo XVII, sólo 40 años después de su introducción en Europa por parte de los portugueses. En el siglo XX, la papa se convirtió en una de las fuentes de alimento más queridas y producidas en el mundo. Estados Unidos de América fue el último país importante que adoptó la papa. Actualmente la papa se cultiva en más de 100 países del mundo, entre ellos Europa, América del Norte y países de la antigua Unión Soviética, Asia, África y América Latina (FAOSTAT, 2015).

Etimología

El nombre *Solanum* proviene del latín “solamen” que significa consuelo, confort, debido a las propiedades medicinales y sedantes de algunas especies de este género; el nombre de la especie, *tuberosum*, proviene del latín “tuberum” que significa protuberancia, excrecencia, pero también trufa, en referencia a la producción de tubérculos (Hardigan et al., 2017).

Clasificación taxonómica

La papa pertenece a las siguientes categorías taxonómicas:

Tabla 1

Clasificación taxonómica de la papa

| Categoría | Taxón |
|------------------|----------------------|
| Reino | <i>Plantae</i> |
| División | <i>Magnoliophyta</i> |
| Clase | <i>Magnoliopsida</i> |
| Subclase | <i>Asteridae</i> |
| Orden | <i>Solanales</i> |
| Familia | <i>Solanaceae</i> |
| Género | <i>Solanum</i> |
| Especie | <i>S. Tuberosum</i> |

Nota. Adaptado de El cultivo de la papa en Ecuador, por Andrade, 2002, INIAP.

Morfología de la papa

La papa es una planta que presenta características de ser suculenta y herbácea durante su ciclo anual en la parte visible sobre el suelo. Además, se considera perenne debido a la presencia de tubérculos, que son tallos subterráneos, desarrollándose en la extremidad de los estolones originados a partir del tallo principal (Alvis et al., 2008). Es una planta anual de hojas con dos cotiledones, que, gracias a su capacidad de reproducción mediante tubérculos, podría tener características perennes (Zaag y Adams. 1976).

1. Brote

(Mishra & Rai, 2006), menciona que la cantidad de brotes que emergen de un tubérculo es una característica específica de la variedad, que, bajo condiciones de preparación de la semilla uniformes, los tubérculos de mayor tamaño generan un número superior de brotes en comparación con los tubérculos más pequeños. La siembra del tubérculo impulsa el rápido crecimiento de los brotes, los cuales, al emerger sobre la superficie del suelo, se transforman en tallos. La presencia de brotes no es adecuada cuando se comercializa el tubérculo para su consumo (Millam, 2006).

2. La raíz

Las plantas de papa desarrollan raíces adicionales en los nudos de los tallos subterráneos y estolones, influenciadas por la textura del suelo. Por lo general, estas raíces se extienden cerca de la superficie, raramente superando los 40-50 centímetros de profundidad, aunque ocasionalmente se encuentran a 1 metro de profundidad en suelos sueltos (Ruggieri et al., 2008).

3. La hoja

Las hojas maduras pueden ser compuestas pinnadas, aunque las hojas iniciales y las primeras hojas pueden ser simples. Presentan diversos tipos de pelos, visibles en toda la planta, con formas variadas entre especies. Las hojas del tallo subterráneo son

pequeñas y escamosas, mientras que los estolones emergen de sus yemas axilares, con estomas más abundantes en la superficie inferior (Lakhotia et al., 2014).

4. La flor

La flor, una estructura aérea, es vital para la reproducción sexual y distinción de variedades agrícolas. Las flores se agrupan en inflorescencias con componentes como cáliz, corola, columna de anteras y estigma. Cada flor se ubica en el extremo del pedúnculo floral, dividido por una articulación. La floración depende de factores como la variedad, el suelo, la humedad, la temperatura y la luz (Levy & Kedar, 2019).

5. El fruto y la semilla

La formación de la baya de la papa se da a través del desarrollo del ovario, con la semilla como óvulo fecundado. Cada fruto puede contener de 0 a 400 semillas, cada una con potencial de generar una planta productiva. Los componentes internos incluyen plúmula, hilo, radícula, testa, embrión y endospermo. La explotación comercial de la semilla es una prometedora tecnología que requiere evaluación nacional (DOUCHES & JASTRZEBSKI, 1993).

6. El estolón

El estolón forma los tubérculos, tallos carnosos, con tejido vascular inicialmente bicolateral. A medida que el estolón crece, el parénquima separa los haces vasculares, extendiendo el anillo vascular. El extremo del estolón presenta una forma de "gancho", especializado en el transporte de sustancias, como azúcares almacenados como almidón en los tubérculos. La cantidad y longitud de los estolones varían según la variedad y las condiciones de crecimiento (Gervasio et al., 2019).

7. El tubérculo

Los tubérculos, tallos carnosos con yemas, se desarrollan en el extremo del estolón mediante la proliferación del tejido de reserva, con un aumento celular significativo. El tejido vascular inicialmente biclateral en tallos, estolones y tubérculos se desarrolla con el alargamiento del estolón, extendiendo el anillo vascular mediante la separación del parénquima y los haces vasculares (Eduardo & Roberqui, 2012)

Composición nutricional de la papa

La papa se destaca como una excelente fuente dietética de carbohidratos, que representan aproximadamente el 75% de la materia seca total del tubérculo (Jansen et al., 2001). En cuanto a su contenido proteico, este oscila entre el 1 y 1,5% del peso fresco del tubérculo (Ortiz-Medina, 2007). Por otro lado, los lípidos en la papa constituyen solo una pequeña fracción del peso, llegando aproximadamente a 0,15 g/150 g de peso fresco. La fibra dietética proviene principalmente de las paredes celulares, especialmente las paredes celulares engrosadas del peridermo o cáscara, que constituyen del 1 al 2% del tubérculo (Priestley, 2006). Estas fibras no lignificadas podrían desempeñar un papel en la reducción de los niveles de colesterol. En cuanto a los minerales, la papa cruda presenta mayores concentraciones de potasio (564 mg/g FW), fósforo (30–60 mg/g FW) y calcio (6–18 mg/g FW) (Buckenhuskes, 2005; Thompson, 1990). La vitamina predominante en la papa es la vitamina C (ácido ascórbico), con un contenido que varía entre 84 y 145 mg por 100 g de peso seco, dependiendo del cultivo, el sitio de siembra y las condiciones de almacenamiento. Además, en la papa, las xantofilas son los carotenoides más abundantes (b-caroteno y luteína), desempeñan un papel importante en la salud ocular (Brown, 2008)

Zonas de producción en Ecuador

En Ecuador, se reconocen tres áreas principales de producción de papa: la región norte, central y sur.

Zona Norte: Carchi e Imbabura

Carchi lidera la producción nacional de papa con un rendimiento promedio de 21.7 toneladas por hectárea en solo el 25% del área total dedicada al cultivo. Aunque cubre 15,000 hectáreas, contribuye con el 40% de la cosecha del país. La provincia tiene climas variados, permitiendo cultivos de papas en las zonas altas y frutales en las bajas. La región papera abarca altitudes entre 2,800 y 3,200 m.s.n.m., con climas fríos. Los suelos predominantes son Dystrandept, Hapludolls, Duriudolls y Arguidolls, mientras que las temperaturas medias fluctúan entre 11.8° y 12.1°C en los cantones principales como Tulcán, Montúfar, Espejo y Huaca (Basantes et al., 2020).

Zona Centro: Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Bolívar

Chimborazo lidera la extensión de cultivo a nivel nacional, aunque con rendimientos modestos de alrededor de 11 toneladas por hectárea. La provincia experimenta una variabilidad climática marcada, influenciada por vientos cálidos de la zona amazónica que suavizan el clima, especialmente en el Cantón Chambo. La altitud varía entre 2,200 y 3,600 metros sobre el nivel del mar, con temperaturas medias de 6° a 15°C y precipitaciones anuales de 250 a 2,000 mm, lo que resulta en una amplia diversidad de zonas ecológicas. Los suelos predominantes incluyen Inceptisoles (54.9%), Mollisoles (31.3%), Entisoles (12.5%) y Afisoles (1.3%) (Herrera et al., 1999)

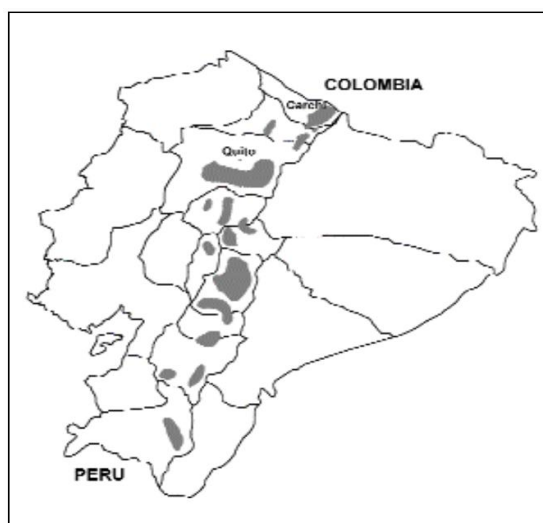
Zona Sur: Cañar, Azuay y Loja

En Azuay y Loja, la producción de papa es limitada debido a las bajas precipitaciones. En contraste, Cañar destaca por ser la provincia con mayor actividad papicultora, con cultivos sobre los 2,000 m.s.n.m. Aunque su producción es modesta, entre 8 y 10 toneladas por hectárea. La región de transición sub-húmeda, entre 2,000 y 2,600 m.s.n.m.,

tiene temperaturas medias de 13°-15°C y precipitaciones anuales de 750-1,100 mm. A altitudes de 2,600-3,200 m.s.n.m., las temperaturas oscilan entre 10 y 13oC, con heladas frecuentes. La siembra de papas se realiza generalmente después de romper pasturas naturales y, a veces, en asociación con otros cultivos como arvejas, cebada, trigo o maíz-choclo (Andrade et al., 2002).

Figura 1

Zonas productoras de la papa



Nota. Adaptado de El cultivo de la papa en Ecuador, por Andrade, 2002, INIAP.

Requerimientos climáticos

Tabla 2

Factores importantes para el desarrollo de la papa

| Condiciones ambientales para el desarrollo del cultivo de papa | |
|---|--|
| Altitud | El cultivo puede prosperar en altitudes que oscilan entre los 460 y los 3,000 metros sobre el nivel del mar (msnm). Sin embargo, la altitud óptima para un desarrollo adecuado se sitúa en el rango de 1,500 a 2,500 msnm. |
| Temperatura | La temperatura ideal para la producción de papas se sitúa en torno a los 20-25 °C durante el día y alrededor de 10-12 °C durante la noche. |
| Precipitaciones | La precipitación anual oscila entre 600 y 1,200 mm, lo que proporciona un rango favorable para el crecimiento y desarrollo. |
| Humedad relativa | La papa necesita mantener una humedad relativa que oscile entre el 70% y el 80% para un desarrollo óptimo. Este rango de humedad es fundamental para garantizar un crecimiento saludable de la planta y la formación adecuada de tubérculos de alta calidad. |
| Viento | Se considera que un viento suave y constante, con velocidades entre 5 y 15 km/h, es óptimo para favorecer procesos como la polinización, la transpiración de la planta y la dispersión de posibles plagas. |
| Topografía | La elección de áreas con una topografía plana o ligeramente inclinada facilita las operaciones agrícolas, como el riego, la siembra y la cosecha, además de contribuir a la prevención de la erosión del suelo. |

Nota. Adaptado de El cultivo de la papa en Ecuador, por Andrade, 2002, INIAP

Plagas y enfermedades

Las plagas que afectan a los cultivos, tales como insectos, ácaros, babosas, nematodos, roedores y pájaros, compiten con los humanos por los alimentos producidos. Algunos insectos, durante sus etapas larvales, se alimentan de semillas en germinación o de las raíces de las plantas, interfiriendo en la absorción de agua, sales minerales y translocación, lo que resulta en pérdidas en la producción y desafíos socioeconómicos (Gao et al., 2022). En el caso específico del cultivo de papa, se ve afectado por insectos plaga y nematodos,

ocasionando pérdidas tanto en los rendimientos como en la calidad de los productos, tanto antes como después de la cosecha (Liu et al., 2023).

Destacando como la plaga más perjudicial en todas las provincias dedicadas al cultivo de papas en Ecuador, el gusano blanco de la papa, a través de las galerías que crea al alimentarse, provoca daños en los tubérculos en el campo, afectando la calidad del producto (Gallegos, 1997). Por otro lado, la polilla de la papa (*Tecia solanivora*), un insecto perteneciente a la familia de los Lepidópteros, representa una plaga de importancia significativa en regiones de clima cálido, siendo considerada clave o primaria en el cultivo. Esta plaga genera considerables pérdidas a los agricultores de papa en Ecuador, contribuyendo al aumento de los problemas de pobreza y promoviendo el uso excesivo de productos químicos, exacerbando así los niveles de contaminación ambiental (Fréchette et al., 2010). Además, la sarna polvorienta de la papa, causada por el protista *Spongospora subterranea*, constituye una enfermedad relevante en el cultivo de papa debido a su impacto cosmético en los tubérculos, la disminución en la cosecha y su función como vector del virus Potato mop-top (PMTV) (Cowan et al., 2018).

Metabolitos de las plantas

Las plantas, al enfrentarse a fuerzas opuestas provenientes de los sistemas naturales, han evolucionado para desarrollar un sistema de defensa complejo que les permite superar el estrés tanto biótico como abiótico. Este desafío constante ha llevado a las plantas a generar respuestas adaptativas que involucran la producción de diversos metabolitos (Bednarek, 2012).

Los metabolitos, que son compuestos químicos intermedios o finales, resultan de las intrincadas reacciones metabólicas que ocurren en los organismos vivos. El metabolismo, que abarca un conjunto diverso de procesos químicos en células y organismos, no solo asegura la supervivencia, sino que también permite a las plantas adaptarse a su entorno cambiante. Estos procesos metabólicos incluyen la síntesis y degradación de moléculas fundamentales, la

obtención y utilización eficiente de la energía, así como la regulación de funciones celulares clave (Piasecka et al., 2015).

De este modo, los metabolitos no solo son productos químicos esenciales para el funcionamiento biológico, sino que también son herramientas valiosas en la estrategia de defensa de las plantas ante el estrés ambiental. La interconexión entre el sistema de defensa y el metabolismo revela la complejidad de las respuestas adaptativas de las plantas a su entorno dinámico y desafiante (Dodds & Rathjen, 2010).

Metabolitos primarios

Los metabolitos primarios realizan su función como moléculas de señalización para desencadenar una respuesta de defensa mediante procesos de transducción de señales y reconocimiento de patógenos (Zaynab et al., 2018).

El metabolismo primario es importante para el crecimiento, desarrollo y reproducción de las células. Los metabolitos primarios participan en la respuesta primaria mediante la regulación de carbohidratos, proteínas y lípidos a la infección por patógenos (Kachroo & Robin, 2013). El crecimiento y el rendimiento de las plantas se ven afectados por el metabolismo primario y secundario durante la infección por patógenos (Huang & Dudareva, 2023).

Metabolitos secundarios

El metabolismo secundario de las plantas, definido como el conjunto de vías y productos metabólicos de moléculas pequeñas no esenciales para la supervivencia del organismo, desempeña un papel fundamental en la respuesta adaptativa de las plantas a su entorno (BENNETT & WALLSGROVE, 1994) Estas vías secundarias generan una amplia gama de compuestos defensivos conocidos como metabolitos secundarios, los cuales son esenciales para la interacción de las plantas con su entorno y su capacidad para adaptarse a condiciones de estrés, tanto bióticas como abióticas (Wink, 2003).

Más allá de los nutrientes básicos como proteínas, grasas y carbohidratos, las plantas tienen la capacidad de producir una diversidad de compuestos, entre ellos antioxidantes, polisacáridos, flavonas, entre otros (Balandrin et al., 1985). Estos metabolitos secundarios, aunque prescindibles para el metabolismo y crecimiento directo de las plantas, desempeñan un papel crucial en su adaptación ambiental. La amplia variedad y alta diversidad de productos secundarios contribuyen a que las plantas interactúen de manera efectiva con su entorno, especialmente en condiciones de estrés biótico y abiótico (Alami et al., 2022).

Los metabolitos secundarios, al ser componentes clave, son vitales para la protección de las plantas contra herbívoros, bacterias, hongos, virus e incluso otras plantas competidoras. Estos compuestos no solo actúan como barreras defensivas, sino que también cumplen funciones importantes en la comunicación entre plantas y microorganismos simbióticos (Harborne, 2007). Además, algunos metabolitos secundarios actúan como señales para atraer polinizadores y dispersores de semillas, contribuyendo así a la reproducción y éxito reproductivo de las plantas. En conjunto, el metabolismo secundario de las plantas no solo asegura su supervivencia, sino que también les permite prosperar en su entorno dinámico y desafiante (Divekar et al., 2022).

Metabolitos en el género *Solanum tuberosum* L.

El género *Solanum tuberosum* L., es reconocido por la presencia de una amplia gama de metabolitos secundarios. Entre estos compuestos se encuentran el ácido 3,5-dihidroxibenzoico, ácido clorogénico, ácido 4-hidroxibenzoico, 4-hidroxi-3-metoxicinnamaldehído, coumarin, daidzein, genistein, 7-hydroxiflavona y neochoragenin. Estos metabolitos aportan una diversidad de propiedades bioactivas que pueden influir en la salud y el metabolismo humano. Además, en *Solanum tuberosum* L. se pueden encontrar otros compuestos como el ácido cafeico, ácido siríngico, vainillina, ácido p-cumárico, ácido ferúlico y

ácido sinápico, que contribuyen a la complejidad química y al potencial beneficioso de esta planta en diversos aspectos de la salud y la nutrición (Rojas-Padilla & Vásquez-Villalobos, 2016).

Metabolitos para determinar el contenido fitoquímico

Ensayo de Folin-Ciocalteu

La prueba Folin-Ciocalteu se emplea para determinar la cantidad de compuestos fenólicos totales en productos vegetales. Su principio se fundamenta en la reacción de los compuestos fenólicos con el reactivo de Folin-Ciocalteu, en un medio alcalino, generando una coloración azul que puede cuantificarse espectrofotométricamente a 765 nm (Blainski et al., 2013). Este reactivo, compuesto por una combinación de wolframato sódico y molibdato sódico en ácido fosfórico, reacciona con los compuestos fenólicos presentes en la muestra. El ácido fosfomolibdotúngstico, de tono amarillo debido a la formación de ambas sales en medio ácido, experimenta una reducción por parte de los grupos fenólicos, resultando en la formación de un complejo de color azul intenso (Pérez et al., 2023) La intensidad de este color azul se mide para determinar el contenido de polifenoles (Vázquez et al., 2015).

El proceso de reacción implica una reacción redox, lo que permite considerarlo como un enfoque para determinar la actividad antioxidante total. La oxidación de los polifenoles en la muestra resulta en la formación de una coloración azulada con una absorción máxima a 765 nm. La cuantificación de esta coloración se realiza mediante espectrofotometría, utilizando una curva estándar de ácido gálico como referencia (Lamuela-Raventós, 2017).

Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante total (TAC) mide el poder colectivo de los antioxidantes en el cuerpo para neutralizar los radicales libres, que pueden dañar las células y contribuir al envejecimiento y las enfermedades (Baliyan et al., 2022). Los radicales libres pueden definirse como átomos o moléculas que contienen uno o más electrones desapareados en la capa de valencia o en la órbita exterior y que son capaces de existir de forma independiente. El número

impar de electrones en un radical libre lo hace inestable, de vida corta y altamente reactivo (Apak et al., 2016). Debido a su alta reactividad, pueden atraer electrones de otros compuestos para lograr estabilidad. De esta manera, la molécula atacada pierde su electrón y se convierte en un radical libre, dando inicio a una cascada de reacciones en cadena que finalmente dañan la célula viva (Gulcin, 2020).

Las fuentes de antioxidantes naturales son principalmente las plantas, es decir, las verduras, frutas, especias y hierbas comestibles, que son ricas en vitaminas, compuestos fenólicos, carotenoides y microelementos. Sin embargo, cabe destacar que la actividad antioxidante es diferente para las diferentes variedades y partes morfológicas de los recursos naturales (Flieger et al., 2021).

Método para determinar la capacidad antioxidante

Ensayo 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo (DPPH)

La prueba in vitro utilizando el radical DPPH se considera una de las más utilizadas, ya que representa un método práctico y estable. La reducción de los radicales DPPH se monitorea a una longitud de onda típica hasta que la reacción alcanza un estado estable. El radical DPPH tiene una absorción a 515 nm y muestra una coloración violeta intensa (Rodríguez Salazar et al., 2023). En este ensayo, se observa la reducción del radical DPPH gracias a la acción antioxidante de ciertos compuestos presentes en extractos de plantas. Este proceso implica la donación de un electrón al radical, estabilizándolo y alterando el color del medio de reacción (Nenadis & Tsimidou, 2017).

La evaluación de la naturaleza antioxidante mediante este ensayo influye en las diversas reacciones cinéticas que se generan. En consecuencia, la reacción del radical DPPH puede ocurrir a diferentes velocidades dependiendo del compuesto (Sirivibulkovit et al., 2018). El radical libre producido puede participar en otras reacciones que controlan la cantidad de moléculas de DPPH reducidas mediante una molécula reductora. Una ventaja clave de esta

prueba es la disponibilidad comercial del radical DPPH, lo que facilita su aplicación al no requerir la generación in situ del radical (Xie & Schaich, 2014).

Ensayo 2,2'-azino-bis-(ácido 3-etilbenzotiazolin-6- sulfónico) (ABTS⁺)

La base de uno de los métodos espectrofotométricos aplicados para medir la actividad antioxidante total de sustancias puras, mezclas acuosas y bebidas se fundamenta en la generación del catión radical ABTS (ácido 2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)) (Re et al., 1999). En su forma original, el ensayo ABTS + se centraba en la activación de metmioglobina con peróxido de hidrógeno en presencia de ABTS para producir el catión radical, tanto en presencia como en ausencia de antioxidantes. Este método ha sido objeto de críticas debido a la posibilidad de que antioxidantes que reaccionen más rápidamente también contribuyan a la reducción del radical ferril de mioglobina (Thaipong et al., 2006).

La técnica mejorada para la generación de ABTS⁺ que se describe aquí implica la producción directa del cromóforo ABTS⁺ azul/verde a través de la reacción entre ABTS y persulfato de potasio (Floegel et al., 2011). Este método presenta máximos de absorción en longitudes de onda de 645 nm, 734 nm y 815 nm, ofreciendo un formato más apropiado para el ensayo, ya que el radical se genera directamente en una forma estable antes de reaccionar con los posibles antioxidantes (Nenadis et al., 2004).

La reducción del catión radical preformado ABTS por la adición de antioxidantes se produce en una escala de tiempo y grado que varía según la actividad antioxidante, la concentración del antioxidante y la duración de la reacción (Ozgen et al., 2006). La evaluación del grado de decoloración, expresado como porcentaje de inhibición del catión radical ABTS +, se realiza considerando la concentración y el tiempo, y se calcula en relación con la reactividad de Trolox como patrón bajo las mismas condiciones. Este método encuentra aplicabilidad en la investigación de antioxidantes, tanto en compuestos puros como en extractos de alimentos, ya sean solubles en agua o en lípidos (Re et al., 1999).

Ensayo del Poder Antioxidante Reductor de Iones Férricos (FRAP)

En el ensayo FRAP, se reduce un oxidante clave presente como sal férrica en solución acuosa. Este proceso es llevado a cabo por los antioxidantes donadores de electrones presentes en la mezcla de reacción, los cuales exhiben un potencial redox inferior al de la media reacción: $\text{Fe}^{3+} + \text{electrón} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ (Benzie & Strain, 1996; Buettner, 1993). El Fe^{3+} en la mezcla de reacción se encuentra en exceso y adopta la forma de una solución acuosa de sal de tripiridiltriazina férrica. Por lo tanto, el factor limitante en la reacción es la capacidad total o combinada de donación de electrones de los antioxidantes reductores presentes en la muestra, que se añade a la mezcla de reacción. La solución de sal férrica es inicialmente de color amarillo pálido, pero al reducirse a la forma ferrosa, cambia a azul, y esto se refleja en un aumento en la absorbancia a 593 nm (Benzie & Devaki, 2017).

Las condiciones de reacción, incluyendo temperatura, pH, volúmenes de reactivo y muestra, y duración de la reacción, están estandarizadas, y el cambio cronometrado en la absorbancia a 593 nm se utiliza como indicador de la actividad antioxidante total (Cerretani & Bendini, 2010). Esta actividad se evalúa comparando el cambio en la absorbancia inducido por la muestra bajo las mismas condiciones de reacción, con una concentración conocida de Fe^{2+} añadida como referencia. Los resultados se expresan como el valor FRAP, medido en $\mu\text{mol/L}$, calculado de manera específica (Müller et al., 2011).

$$\frac{\text{Absorbancia a 593 nm de la mezcla de reacción de la muestra problema}}{\text{Absorbancia a 593 nm de la mezcla de reacción estandar de } \text{Fe}^{2+}} \times \text{Fe}^{2+} \text{ concentración estandar } (\mu\text{mol/L})$$

Ensayo de la Capacidad Antioxidante Reductora del Ion Cúprico (CUPRAC)

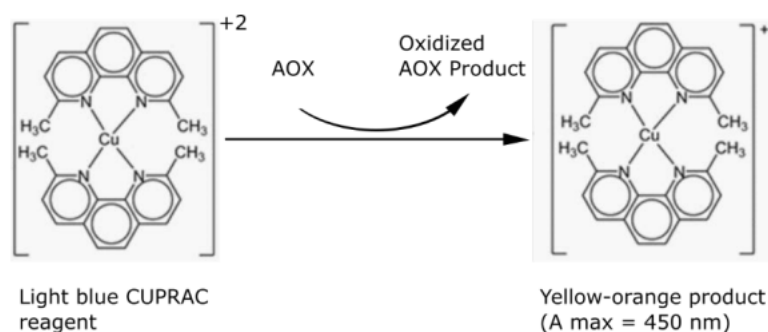
El método CUPRAC (Capacidad Antioxidante Reductora de Cúprico) se emplea para medir la capacidad antioxidante total (TAC) en muestras tanto hidrofílicas como hidrofóbicas. El reactivo principal, el cobre (II)-neocuproína (2,9-dimetil-1,10-fenantrolina), tiene la capacidad de

oxidar antioxidantes, generando un producto coloreado. La quelación con neocuproína facilita una reacción más rápida al elevar el potencial redox del reactivo (Apak et al., 2010).

El kit de ensayo de capacidad antioxidante CUPRAC de G-Biosciences ofrece un método estable, selectivo, fácil y rápido para medir todos los antioxidantes relevantes en muestras biológicas a un pH fisiológico (Özyürek et al., 2011). La prueba implica una reacción redox de reducción entre el reactivo CUPRAC y los antioxidantes que poseen un grupo tiol. Durante este proceso, el reactivo se reduce formando un complejo quelato de cobre (I)-neocuproína, que exhibe un color medible a 450 nm (Suktham et al., 2019).

Figura 2

Principio de la reacción del ensayo.



Nota. Adaptado de The main and modified CUPRAC methods of antioxidant measurement, por Özyürek et al., 2011.

Ensayo de la capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno (ORAC)

Esta prueba se fundamenta en la generación de radicales de oxígeno mediante el diclorhidrato de 2,2'-azobis (2-amidinopropano), que produce especies reactivas de oxígeno (ROS) capaces de oxidar la fluoresceína (Borlinghaus et al., 2020). La fluoresceína es inherentemente fluorescente, pero su producto de oxidación presenta una fluorescencia

notablemente más tenue. Como resultado, la fluorescencia de la solución disminuye con el tiempo a medida que las ROS oxidan la fluoresceína (Aravena-Sanhueza et al., 2020).

En presencia de un antioxidante, este reacciona con las ROS, retardando la oxidación de la fluoresceína hasta que el antioxidante se agota. Para calibrar el sistema, se utiliza principalmente Trolox, un análogo sintético de la vitamina E con actividad antioxidante conocida en este ensayo. Esto permite expresar la capacidad antioxidante en equivalentes de Trolox como unidad de medida (Garrett et al., 2010).

Actividad volcánica en el Ecuador

El Ecuador se encuentra dividido en cuatro regiones fisiográficas distintas: la Costa, la Sierra, la Amazonía y las Islas Galápagos. Dentro de estas regiones, se distribuyen un total de noventa y ocho volcanes, mayormente concentrados en las zonas de la Sierra, la Amazonía y las Islas Galápagos. El fenómeno del volcanismo en Ecuador está principalmente focalizado en la Zona Volcánica Andina del Norte (ZVN), la cual es resultado de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamérica (Santamaría & Bernard, 2018). Este arco volcánico, perteneciente al periodo Cuaternario, cuenta con alrededor de 77 centros volcánicos situados al norte de la latitud 2° S en los Andes ecuatorianos, abarcando desde las provincias de Carchi hasta Chimborazo. En esta distribución, se destaca que los volcanes más jóvenes se encuentran ubicados en las islas occidentales, mientras que los más antiguos se localizan en las orientales. De los noventa y ocho volcanes registrados, doce se consideran extintos y diez están catalogados como activos (Allan & Simkin, 2000).

Los volcanes en Ecuador son clasificados según su actividad eruptiva más reciente en tres categorías distintas:

1. Extintos o dormidos: Corresponden a aquellos cuya última erupción tuvo lugar durante el Pleistoceno.

2. **Activos:** Se refiere a los volcanes que entraron en erupción por última vez durante el Holoceno, abarcando desde el tiempo histórico (a partir de 1532, durante la Conquista Española).
3. **En erupción:** Engloba a los volcanes que están en proceso de erupción en el momento presente o que registraron su última actividad eruptiva en los últimos dos años (Ramon et al., 2021).

Ecuador cuenta con una extensa trayectoria de erupciones volcánicas que han ocasionado considerables daños a numerosos poblados y ciudades situadas en áreas de alto riesgo. Desde la época de la conquista española en 1534, los lahares generados por las erupciones del Cotopaxi han devastado repetidamente Latacunga, una ciudad de gran importancia en el centro de Ecuador (Santamaría & Bernard, 2018).

Volcán Cotopaxi

El Cotopaxi, un volcán activo situado en la cordillera Real de los Andes Ecuatorianos, se encuentra a unos 50 km al sureste de Quito, a 35 km al norte de Latacunga y a 75 km al noroeste de Tena. Este imponente volcán está cubierto por un casquete glaciar que abarca un área de 11.56 km², alimentado por varios glaciares importantes, incluidos los de los ríos Cutuchi (al sur), Tambo (al este) y Pita (al norte) (Bedón et al., 2017).

Con un diámetro de 22 km, un relieve de casi 3000 m y una altitud de 5897 m sobre el nivel del mar, el Cotopaxi destaca por su cono simétrico, coronado por un cráter de 800 m de diámetro y 160 m de profundidad. Sus campos de nieve y hielo cubren aproximadamente 20 km² y tienen un volumen estimado de 0,5-1,0 km³ (Mothes, 1992).

El volcán Cotopaxi es reconocido como uno de los volcanes más peligrosos del mundo debido a su capacidad para generar lahares de gran alcance. Estos flujos de lodo y escombros representan una seria amenaza para las poblaciones y las infraestructuras que se encuentran en las cercanías de los principales drenajes fluviales provenientes del volcán (Aguilera et al., 2004).

Durante el periodo eruptivo que tuvo lugar entre agosto y noviembre de 2015, el Cotopaxi emitió aproximadamente 860 mil m³ de ceniza, lo que subraya su potencial para impactar significativamente el entorno circundante y las comunidades que dependen de él (Bedón et al., 2017).

Origen de la ceniza volcánica

La ceniza volcánica se caracteriza como una amalgama de partículas de roca, minerales y vidrio que son expulsadas desde el interior de un volcán durante una erupción (Matsumoto & Geshi, 2021). Estas partículas, cuyo diámetro es inferior a los 2 milímetros, suelen presentar superficies ásperas y porosas, lo que les otorga una baja densidad. Acompañadas por vapor de agua y otros gases calientes, la ceniza volcánica constituye una parte fundamental de la columna de ceniza oscura que se eleva sobre el volcán en erupción (S. B. Mueller et al., 2017).

La naturaleza diminuta y la baja densidad de las partículas que componen la ceniza volcánica facilitan su dispersión a largas distancias mediante los vientos. Cuando una columna de cenizas es desplazada por el viento, se le denomina penacho de cenizas. A diferencia de las cenizas generadas por la combustión de madera y otros materiales orgánicos, las cenizas

volcánicas pueden resultar peligrosas debido a la dureza de sus partículas y a los bordes afilados que suelen presentar (W. Mueller et al., 2020).

Las partículas finas de ceniza, transportadas por el aire, tienden a adherirse unas a otras debido a la atracción electrostática, la adhesión húmeda entre partículas y la formación de hidrometeoros. Estos agregados de ceniza exhiben una variedad de tamaños, texturas y formas, que van desde pequeños racimos submilimétricos hasta agregados laminados concéntricos de tamaño centimétrico, mostrando laminaciones variadas y graduadas (Paredes-Mariño et al., 2022).

Composición de la ceniza volcánica

La composición química de las cenizas volcánicas revela que están compuestas por pequeños fragmentos de roca dentada, generalmente acompañados de una variedad de minerales y vidrios volcánicos. Estas cenizas son duras, abrasivas e insolubles en agua. La Tabla 1 presenta la composición química de algunas cenizas volcánicas utilizadas en la síntesis de geopolímeros, según trabajos previamente publicados (Luhar et al., 2019).

La pérdida más significativa por ignición (LOI) en algunas cenizas volcánicas indica la presencia de gases disueltos, como CO_2 y H_2O , en la fase vítrea en una forma distinta. La presencia de H_2O sugiere la existencia de minerales arcillosos, mientras que el CO_2 puede estar presente en forma de carbonato o atrapado en la fase vítrea como moléculas de CO_2 (Djobo et al., 2017).

En cuanto a la mineralogía de las cenizas volcánicas, los tipos de minerales que se encuentran con ellas dependen de la química del magma expulsado. Se pueden clasificar en minerales no magmáticos y magmáticos. Los minerales magmáticos se forman a partir de la fusión y cristalización de silicatos durante las erupciones, mientras que los minerales no magmáticos se incorporan involuntariamente con la expulsión volcánica debido a la interacción

entre las rocas de la corteza y el magma (Nakagawa & Ohba, 2003). Por lo tanto, cualquier mineral que forme rocas de la corteza puede estar asociado con las cenizas volcánicas. Los minerales no magmáticos se originan a partir de procesos de meteorización de vidrios volcánicos, que incluyen minerales de mica y arcilla (Ruggieri et al., 2008).

Tabla 3

Composición típica de la ceniza volcánica

| Composición Química | Andesita | Escoria volcánica | Piedra pómez volcánica |
|------------------------------------|-------------|-------------------|------------------------|
| <i>CaO</i> | 2.52-6.69 | 9.07-11.00 | 0.87-6.79 |
| <i>SiO₂</i> | 54.93-61.57 | 40.17-46.48 | 64.67-70.13 |
| <i>Fe₂O₃</i> | 4.93-10.89 | 12.00-15.16 | 1.27-3.03 |
| <i>Al₂O₃</i> | 16,44-19,00 | 13,86-15,41 | 11,11-14,06 |
| <i>Na₂O</i> | 1,65-6,00 | 3,39-4,6 | 0,11-2,30 |
| <i>K₂O</i> | 1,72-1,95 | 0,9-1,53 | 2,25-4,26 |
| <i>MgO</i> | 2,63-4,25 | 6,45-9,31 | 0,25-1,11 |
| <i>LOI</i> | 2,15 | 0,66-9,31 | 3,94-10,28 |

Nota. Obtenido de Impacto de la incorporación de cenizas volcánicas en la geopolimerización de eco-Compuestos de geopolímeros amigables por Luhar et al. (2019)

Impacto de la ceniza volcánica en la agricultura

Las cenizas volcánicas pueden tener efectos significativos en la agricultura, con impactos que varían según diversos factores como la cantidad de cenizas depositadas, la duración del contacto con el suelo, el grosor de la capa de cenizas y el nivel de humedad del suelo. El exceso de cenizas puede aumentar el pH del suelo a niveles tóxicos para las plantas, lo que daña las raíces y las hojas, dificulta la fotosíntesis y puede provocar quemaduras en brotes, tallos y hojas (Jácome, 2011). La acumulación de cenizas en las hojas de los cultivos, como café y papa, puede interrumpir el proceso de fotosíntesis y afectar la fijación de carbono de manera negativa, generando una constante pérdida de energía y desequilibrio en la fisiología de las plantas. Esto, a su vez, conduce a disminuciones considerables en las

cosechas y puede resultar en la defoliación o incluso la muerte de los cultivos. Además, la caída de cenizas puede ocasionar agujeros en las hojas de las plantas, cambiar su coloración a tonos marrones y, en casos más cercanos a la erupción, provocar quemaduras leves en el follaje.

Capítulo III: Metodología

Origen de las muestras

La recolección de la muestra de papa con ceniza y sin ceniza se realizó en la provincia de Cotopaxi, en la ciudad de Latacunga. El terreno se encuentra ubicado en el sector de Alaques a una altitud de 2860 msnm, con sus coordenadas 0°50'37.6"S 78°35'15.5"W.

Obtención de especímenes vegetales

Se recolectaron muestras de papas, tanto con ceniza como sin ella, de manera aleatoria. Las muestras se transportaron en un cooler, se empacaron y etiquetaron adecuadamente para su identificación. Posteriormente, se enviaron a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en Sangolquí, fueron refrigeradas hasta su uso.

Tratamiento de la papa

Para realizar el presente trabajo se escogió a la mejor papa, que no tenga orificios y no tenga principio de descomposición tanta para la muestra con ceniza y sin ceniza. Se dio preferencia a la muestra que no tenga raíz.

Obtención de los extractos de papa

El protocolo de extracción de los metabolitos secundarios fue adaptado por (Murugan & Parimelazhagan, 2014). Para este proceso se le aplicó el mismo procedimiento a la papa con ceniza y sin ceniza. Se utilizó 1 gramo de muestra que fue colocado en un tubo Falcon con 10 mL de etanol (96%) para la maceración con una espátula. Una vez realizada la maceración se

mantuvo en refrigeración a 5°C durante 72 horas. Posteriormente, cada tratamiento fue realizado por triplicado y los ensayos fueron medidos con su respectiva absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis.

Determinación del carácter antioxidante por el método DPPH

Se utilizó el procedimiento descrito por Baliyan et al., (2022) la solución de DPPH fue preparada mediante la disolución de 7,89 mg de DPPH en 100 ml de etanol al 99,5%, utilizando una balanza química. La absorbancia inicial se registró aproximadamente en $0,7 \pm 0,05$ a una longitud de onda de 517 nm, luego se dejó en reposo en la oscuridad durante 2 horas.

Para el ensayo, se añadieron 2,9 mL de la solución de DPPH en un tubo de ensayo, seguido de la adición rápida de 0,1 mL de la solución de muestra de prueba. La mezcla se mantuvo a temperatura ambiente durante 30 minutos, y la absorbancia de la solución a 517 nm se registró. Se utilizó una solución de referencia compuesta por etanol en lugar de la muestra como blanco.

Los resultados se determinaron mediante la construcción de una curva de calibración utilizando Trolox, en un rango de concentraciones de 0 a 0,625 mM, con la ecuación $y = -0,9979x + 0,7211$ ($R^2 = 0,993$). Los resultados se expresaron en unidades de $\mu\text{mol Trolox/g fw}$ (equivalente de Trolox por gramo de muestra fresca). La relación de inhibición (%) se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ inhibición} = \frac{Abs_{blanco} - Abs_{muestra}}{Abs_{blanco}} \times 100$$

Determinación del carácter antioxidante por el método ABTS

Se utilizó la metodología basada en el estudio (Fuleiki & Francis, 1968), con algunas adaptaciones. La solución stock de radicales catiónicos ABTS^{•+} se obtuvo combinando persulfato de potasio (2,45 mM en H₂O) con una solución de ABTS (7 mM en H₂O) en una

proporción 1:1. Esta solución madre reaccionó durante un periodo de 12 a 72 horas y posteriormente se diluyó con etanol absoluto hasta lograr una absorbancia de $0,7 \pm 0,02$ a una longitud de onda de 754 nm, según las lecturas del espectrofotómetro. La mezcla de la muestra con 2 mL de solución ABTS diluida (20 μ L de muestra) se colocó en tubos de ensayo y se dejó reposar en la oscuridad a temperatura ambiente durante 7 minutos, repitiendo la prueba tres veces. Posteriormente, se midió la absorbancia a 734 nm, el control (blanco) se preparó usando etanol. Los resultados se obtuvieron creando una curva de referencia con Trolox, abarcando concentraciones de 0 a 2,5 mM, y se expresan en μ mol Trolox/g de peso fresco, con la ecuación $y = 34,102x + 9,2946$ ($R^2 = 0,9612$).

Utilizando la siguiente fórmula se obtiene el % de inhibición:

$$\% \text{ inhibición} = \frac{Abs_{blanco} - Abs_{muestra}}{Abs_{blanco}} \times 100$$

Determinación del carácter antioxidante por el método FRAP

Se siguió el procedimiento propuesto por (Benzie & Strain (1996), para la aplicación del método. La solución FRAP se compuso de un tampón de acetato de 0.3 M con pH 3.6, una solución de Tris (2-piridil)-s-triazina (TPTZ) de 10 mM en HCl 40 mM y FeCl₃ de 20 mM, en una proporción de 10:1:1. La formación del complejo ferroso-TPTZ generó una coloración azul, cuantificada por colorimetría a 593 nm utilizando un patrón de sulfato ferroso. Las disoluciones se mantuvieron protegidas de la luz durante el desarrollo del ensayo. En tubos de ensayo, se introdujeron 100 μ L de la disolución de muestra o calibración, 3 mL de reactivo FRAP y 300 μ L de agua destilada. Los tubos se incubaron en baño María a 37 °C durante 30 minutos. Se realizaron análisis por triplicado y se midió el cambio de absorbancia a 593 nm utilizando un espectrofotómetro. El blanco se preparó sustituyendo la muestra por etanol. La curva de calibración se elaboró trazando las absorbancias de concentraciones variables de sulfato

férrico ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) entre 0 – 2,5 mM, obteniendo la ecuación $y = 0,5981x - 0,0082$ ($R^2 = 0,9868$). La capacidad reductora de las muestras se expresó en $\text{mg Fe}_2\text{SO}_4/100 \text{ g fw}$.

Determinación del contenido de fenoles totales (TPC)

Los compuestos fenólicos totales se determinaron mediante el método fotocolorimétrico de Folin-Ciocalteu (Pełal & Pyrzyńska, 2014). La prueba se realizó en tubos de ensayo, primero se colocó 0,4 mL de la solución de los extractos, junto con 0,4 mL del reactivo Folin-Ciocalteu (1 N) y 2 mL de agua destilada en cada uno de ellos. Posteriormente, la mezcla se dejó reposar durante 5 minutos en la oscuridad. Luego, se incorporaron 0,4 mL de carbonato de sodio al 20% y 0,8 mL de agua destilada, incubándose a temperatura ambiente durante 1 hora en la oscuridad. La prueba se llevó a cabo con tres repeticiones, midiendo las absorbancias de las muestras a una longitud de onda de 765 nm. Para la construcción de la curva de calibración, se empleó ácido gálico en un rango de concentración de 0 a 5 mM, obteniendo la ecuación $y = 0,0061x + 0,1393$ ($R^2 = 0,9941$). Los valores resultantes se expresaron como equivalentes de ácido gálico (mg GAE/g muestra).

Análisis estadístico

Factores de estudio

Se investigarán los aspectos relacionados con el potencial antioxidante y la presencia de compuestos fitoquímicos en muestras de papa, tanto con ceniza como sin ceniza.

Unidad experimental

La unidad experimental será la papa con ceniza y sin ceniza, de la provincia de Cotopaxi, en la ciudad de Latacunga.

Tratamientos

Se empleará un diseño unifactorial para realizar el análisis estadístico de la composición fitoquímica. En este diseño, se aplicará un método específico para medir el contenido de

compuestos fenólicos a través de la determinación de fenoles totales, y se examinarán las muestras de papa con y sin ceniza. Para garantizar la fiabilidad y exactitud de los resultados, el experimento se replicará tres veces, como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4

Diseño experimental factorial para el análisis de la composición fitoquímica de Solanum tuberosum L. con ceniza y sin ceniza

| | | Método |
|-----------------------------|------------|-----------------|
| | | Fenoles Totales |
| <i>Solanum tuberosum L.</i> | Con Ceniza | 3 |
| | Sin Ceniza | 3 |

Se propondrá un diseño factorial 2x3 para el análisis estadístico del carácter antioxidante. Este diseño incluirá muestras de papa con ceniza y sin ceniza, así como tres métodos distintos para calcular el porcentaje de inhibición utilizando los ensayos DPPH, ABTS y FRAP. El experimento se llevará a cabo con tres réplicas.

Tabla 5

Diseño experimental factorial para la determinación del carácter antioxidante de Solanum tuberosum L. con ceniza y sin ceniza

| | | Métodos | | |
|-----------------------------|------------|---------|------|------|
| | | DPPH | ABTS | FRAP |
| <i>Solanum tuberosum L.</i> | Con Ceniza | 3 | 3 | 3 |
| | Sin Ceniza | 3 | 3 | 3 |

Los experimentos fueron conducidos bajo un diseño completamente aleatorio (DCA), y se llevará a cabo un análisis de varianza para cada uno de los diseños experimentales. La prueba de Duncan se utilizará para comparar las medias, considerando significativas aquellas diferencias con un valor de $p < 0,05$.

Diseño de análisis de varianza

El diseño de análisis de varianza está detallado en la Tabla 4, abarcando tanto un diseño unifactorial para la determinación de la composición fitoquímica, como un diseño factorial 2x3 para el estudio del carácter antioxidante.

Tabla 6

Diseño de ANOVA diseños factoriales propuestos 1x1 y 2x3 de Solanum tuberosum L. con presencia y ausencia de ceniza

| Fuente | Grados de libertad (GL) | Composición fitoquímica | Carácter antioxidante |
|--------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Muestra (A) | a-1 | 1 | 1 |
| Método (B) | b-1 | 0 | 2 |
| Efecto AB | (a-1) (b-1) | 0 | 2 |
| Error (E) | a.b.(n-1) | 4 | 12 |
| Total | a.b.n-1 | 5 | 17 |

Nota. El valor de “a” corresponde al número de muestras a emplear en el ensayo. Por tanto, para la composición fitoquímica (a=2) y el carácter antioxidante (a=2), “b” al número de métodos, es decir, para la composición fitoquímica (b=1) y el carácter antioxidante (b=3). Finalmente “n” significa el número de réplicas (n=3).

Para examinar las asociaciones entre los datos reunidos y contrastar los compuestos fitoquímicos con el carácter antioxidante, se empleará el coeficiente de correlación de Pearson. Todos los análisis se realizarán utilizando InfoStat, con un nivel de significancia fijado en $\alpha=0,05$.

Capítulo IV: Resultados

Obtención de la papa

Se obtuvieron muestras de *Solanum tuberosum L.*, tanto con presencia de ceniza como sin ella, en la ciudad de Latacunga, la capital de Cotopaxi.

Análisis sensorial

Carácter antioxidante

Se evaluó la capacidad antioxidante utilizando tres técnicas: DPPH, ABTS y FRAP.

Tabla 7

Muestra la relación entre las respuestas experimentales

| | | Técnicas empleadas para medir la capacidad antioxidante | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------|---|------|------|-------------------------------------|------|------|---|------|------|
| | | DPPH ($\mu\text{molTRX/g fw}$) | | | ABTS ($\mu\text{molTRX/g fw}$) | | | FRAP ($\mu\text{mol Fe}^{+2}/\text{g fw}$) | | |
| <i>Solanum tuberosum</i> L. | Con Ceniza | 8,82 | 9,17 | 9,25 | 4,45 | 7,33 | 5,69 | 3,44 | 3,44 | 3,49 |
| | Sin Ceniza | 7,38 | 7,7 | 7,3 | 2,44 | 3,71 | 3,23 | 2,75 | 2,8 | 3,49 |

Nota. Se trata de una tabla bidimensional que muestra concentraciones transformadas a través de una curva de calibración, utilizando Trolox y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ como soluciones estándar.

Determinación del carácter antioxidante por el método DPPH

Tabla 8

Estadística descriptiva correspondiente al ensayo DPPH

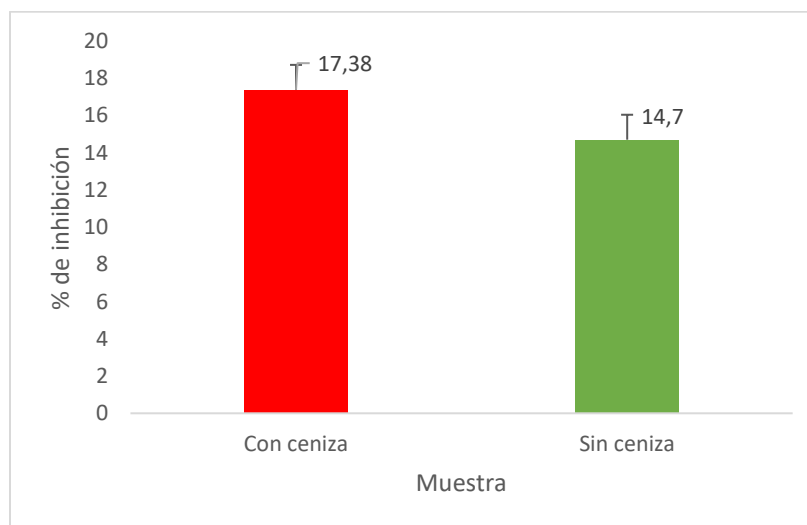
| | | DPPH ($\mu\text{mol TROLOX/g fw}$) | | | | |
|-----------------------------|------------|--------------------------------------|------|------|---------------------------------|--|
| | | R1 | R2 | R3 | Media \pm desviación estándar | |
| <i>Solanum tuberosum</i> L. | Con Ceniza | 8,82 | 9,17 | 9,25 | 9,08 \pm 0,2 | |
| | Sin Ceniza | 7,38 | 7,7 | 7,3 | 7,46 \pm 0,21 | |

Nota. Los datos están expresados en términos de concentraciones.

Según los resultados actuales ilustrados en la Figura 3, se observa que el porcentaje de inhibición del radical DPPH muestra un poder reductor del 17,39 % en la muestra con ceniza y del 14,7 % en la muestra sin ceniza. La concentración asociada con la actividad antioxidante es más elevada en la muestra con ceniza, con una media de 9,08 \pm 0,2 $\mu\text{mol Trolox/g fw}$, en comparación con la muestra sin ceniza, que registró una media de 7,46 \pm 0,21 $\mu\text{mol Trolox/g fw}$, como se detalla en la Tabla 8.

Figura 3

Porcentaje de inhibición de las muestras en presencia y ausencia de ceniza de *Solanum tuberosum* L. por el método DPPH.



Nota. Los datos representan la media y el error estándar con un nivel de confianza del 95%.

Determinación del carácter antioxidante por el método ABTS

Tabla 9

Tabla que contiene la estadística descriptiva correspondiente al ensayo ABTS

| | | ABTS ($\mu\text{mol TROLOX/g fw}$) | | | |
|---------------------|------------|--------------------------------------|------|------|---------------------------------|
| | | R1 | R2 | R3 | Media \pm desviación estándar |
| <i>Solanum</i> | Con Ceniza | 4,45 | 7,33 | 5,69 | 5,82 \pm 1,44 |
| <i>tuberosum</i> L. | Sin Ceniza | 2,44 | 3,71 | 3,23 | 3,13 \pm 0,64 |

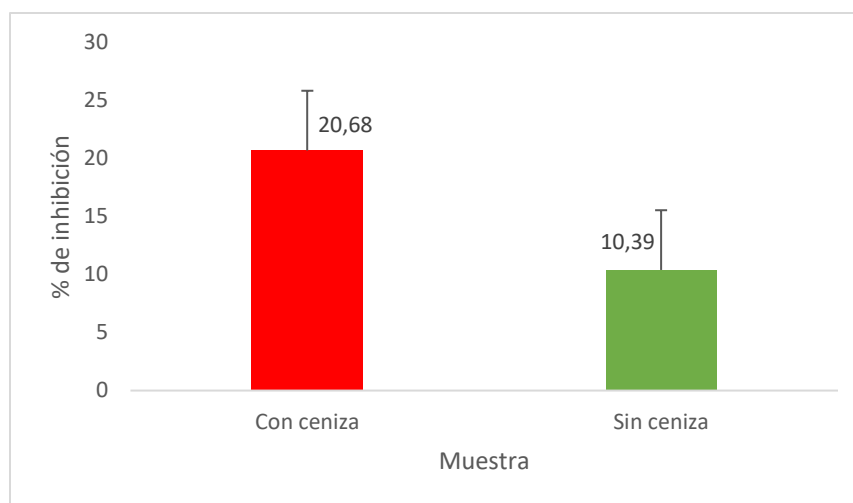
Nota. Los datos están expresados en términos de concentraciones.

La Figura 4 exhibe el porcentaje de inhibición del radical ABTS, mostrando una capacidad reductora del 20,68 % en la muestra con ceniza y del 10,39 % en la muestra sin ceniza. La concentración de la actividad antioxidante determinada por el método ABTS es más alta en la muestra con ceniza, con una media de 5,82 \pm 1,44 $\mu\text{mol Trolox/g fw}$, en contraste con la muestra

sin ceniza, que presentó una media de $3,13 \pm 0,64$ $\mu\text{mol Trolox/g fw}$, según se detalla en la Tabla 9.

Figura 4

Porcentaje de inhibición de las muestras en presencia y ausencia de ceniza de Solanum tuberosum L. por el método ABTS.



Nota. Los datos representan la media y el error estándar con un nivel de confianza del 95%.

Determinación del carácter antioxidante por el método FRAP

Tabla 10

Estadística descriptiva correspondiente al ensayo FRAP

| | | FRAP ($\mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g fw}$) | | | |
|---------------------|-------------------|--|------|------|---------------------------------|
| | | R1 | R2 | R3 | Media \pm desviación estándar |
| Solanum | Con Ceniza | 3,44 | 3,44 | 3,49 | $3,46 \pm 0,03$ |
| tuberosum L. | Sin Ceniza | 2,75 | 2,8 | 2,82 | $2,79 \pm 0,04$ |

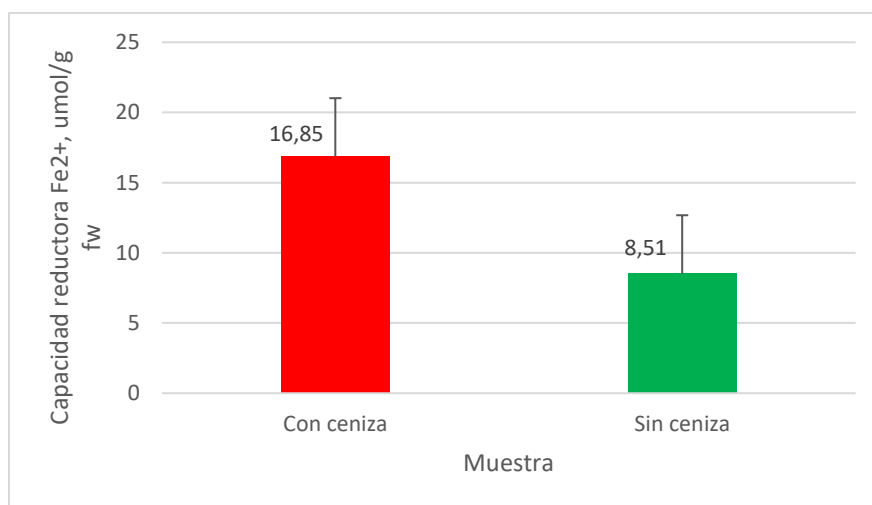
Nota. Los datos están expresados en términos de concentraciones.

Los resultados de la capacidad reductora mediante el método FRAP se detallan en la Tabla 10 y se visualizan en la Figura 5. Se observa un mayor potencial reductor del ion Fe^{2+} en la

muestra con ceniza, con una concentración de $3,46 \pm 0,03 \mu\text{mol Fe}^{2+} / \text{g fw}$, en contraposición a la muestra sin ceniza, que exhibe una concentración más baja de $2,79 \pm 0,04 \mu\text{mol Fe}^{2+} / \text{g fw}$.

Figura 5

Porcentaje de inhibición de las muestras en presencia y ausencia de ceniza de Solanum Tuberosum L. por el método FRAP



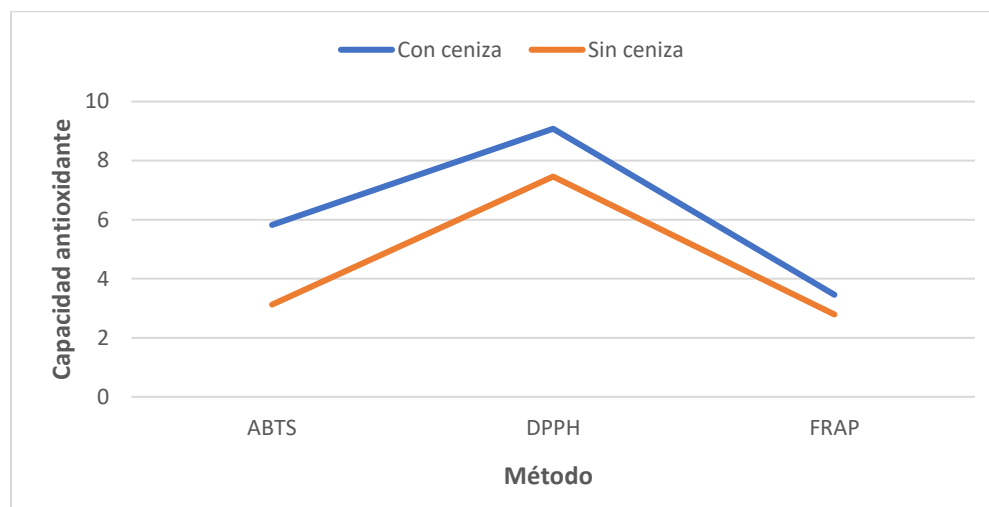
Nota. Los datos representan la media y el error estándar con un nivel de confianza del 95%.

Análisis estadístico

La Figura 6 presenta un análisis cuantitativo de la determinación del carácter antioxidante, mostrando una interacción de la respuesta experimental entre las muestras de *Solanum tuberosum* L. con y sin ceniza, lo que varía según la combinación de los niveles de los factores (métodos para determinar la actividad antioxidante). Esta interacción se confirmó mediante un análisis de varianza ANOVA, utilizado para evaluar los efectos de los factores y su interacción, con un resultado de $p_{\text{valor}} < 0,05$. Esto indica que la capacidad antioxidante está influenciada tanto por la muestra como por el ensayo empleado. En la Tabla 11 se explica el test de Duncan, el cual reveló que el poder reductor de *Solanum tuberosum* L. es estadísticamente significativo en relación con el ensayo y la muestra. Sin embargo, las pruebas FRAP en ambas muestras, así como la prueba ABTS en la muestra sin ceniza, no muestran diferencias significativas.

Figura 6

Gráfica de interacción métodos vs muestra



Nota. La capacidad antioxidante en promedio es mayor en el método DPPH en la muestra con ceniza, por otro lado, los métodos de ABTS y FRAP no tiene diferencia significativa en la muestra sin ceniza.

Tabla 11

Prueba de Duncan de los métodos antioxidantes

| Método | Ceniza | Medias | n | E.E. | |
|--------|--------|--------|---|------|---|
| DPPH | Con | 9,08 | 3 | 0,39 | A |
| DPPH | Sin | 7,46 | 3 | 0,39 | B |
| ABTS | Con | 5,82 | 3 | 0,39 | C |
| FRAP | Con | 3,46 | 3 | 0,39 | D |
| ABTS | Sin | 3,13 | 3 | 0,39 | D |
| FRAP | Sin | 3,01 | 3 | 0,39 | D |

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El análisis de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk indicó que los datos presentados siguen una distribución normal, dado que el valor obtenido ($p=0,4747$) supera el umbral de confianza establecido en $p=0,05$. La homogeneidad de varianzas se confirmó mediante el test

de Levene, donde el valor obtenido $p_{\text{valor}} > 0,01$, es decir, existe una homogeneidad en las varianzas.

Contenido fitoquímico

Para la determinación de los compuestos fitoquímicos se estimó con un método: TPC

Determinación del contenido de fenoles totales

Tabla 12

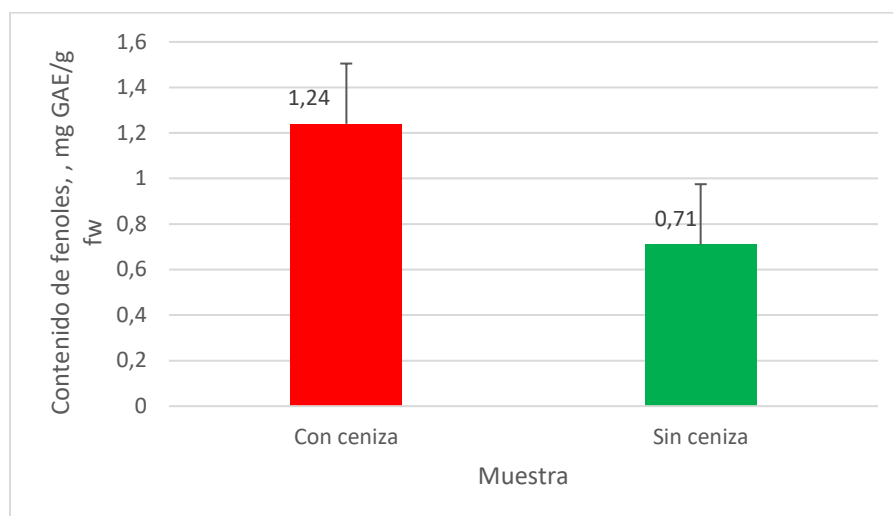
Estadística descriptiva del ensayo de fenoles totales

| | | TPC (mg GAE/g fw) | | | |
|---------------------|------------|-------------------|------|------|---------------------------------|
| | | R1 | R2 | R3 | Media \pm desviación estándar |
| <i>Solanum</i> | Con Ceniza | 1,3 | 1,25 | 1,17 | 1,24 \pm 0,07 |
| <i>tuberosum L.</i> | Sin Ceniza | 0,69 | 0,8 | 0,65 | 0,71 \pm 0,08 |

Nota. Contiene concentraciones que fueron transformados mediante una curva de calibración usando como solución estándar ácido gálico para el ensayo de TPC.

Los resultados obtenidos del método de Folin Ciocalteu se presentan en la Tabla 12, indicando las medias \pm el error estándar. Se observa una concentración más elevada de fenoles en la muestra con ceniza, con un valor de 1,24 \pm 0,07 mg GAE/g fw, en comparación con la muestra sin ceniza, que registró una concentración de 0,71 \pm 0,08 mg GAE/g fw.

Figura 7 Comparación del contenido de fenoles en *Solanum tuberosum* L. en muestras de presencia y ausencia de ceniza volcánica



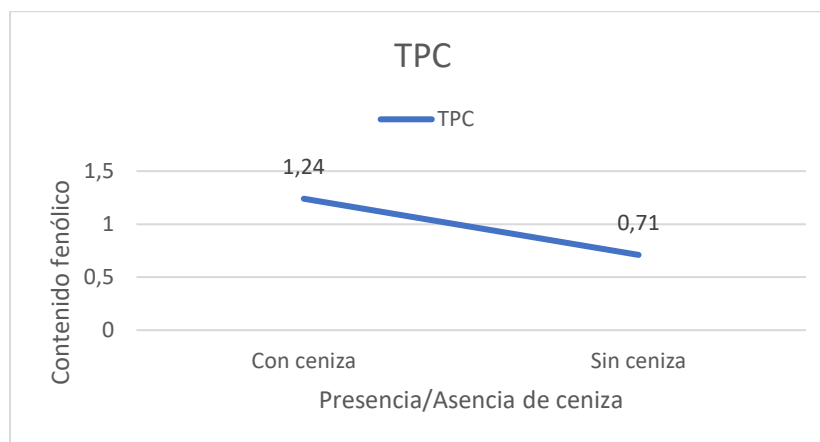
Nota. Los datos representan la media y el error estándar con un nivel de confianza del 95%.

Análisis estadístico

La Figura 8 presenta el análisis cuantitativo de la determinación del contenido fitoquímico en *Solanum tuberosum* L. en muestras con y sin ceniza volcánica, mostrando una ausencia de interacción en la respuesta experimental. El análisis de varianza (ANOVA) reveló la significancia estadística de los factores, niveles e interacciones ($p < 0,001$, infostat), con un nivel de significancia de $p = 0,05$.

Figura 8

Grafica interacción ceniza vs método



Nota. El contenido fenólico es mayor en la muestra afectada por ceniza volcánica

La prueba de Duncan se detalla en la Tabla 13, donde se evaluó el contenido fenólico de las muestras de papa, mostrando que difieren significativamente ya sea en presencia o ausencia de ceniza volcánica.

Tabla 13

Prueba de Duncan para el método TPC

| Método | Ceniza | Medias | n | E.E. | |
|--------|--------|--------|---|------|---|
| TPC | Con | 1,24 | 3 | 0,04 | A |
| TPC | Sin | 0,71 | 3 | 0,04 | B |

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El análisis de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk indicó que los datos presentados siguen una distribución normal, dado que el valor obtenido ($p=0,4386$) supera el umbral de confianza establecido en $p=0,05$. La homogeneidad de varianzas se confirmó mediante el test de Levene, donde el valor obtenido ($p=0,6933$) $p_{valor} > 0,01$, es decir, existe una homogeneidad en la varianza.

Capítulo V: Discusión

Los compuestos bioactivos son fundamentales para la salud y el bienestar humano, exhiben una amplia distribución en las plantas, presentes en distintas partes como los tubérculos, hojas, tallos y frutos (Martínez-Navarrete et al., 2008).

Según Dereje & Chibuzo (2021) en los tubérculos, como en el caso de la papa, se pueden encontrar una variedad de compuestos bioactivos, como polifenoles, flavonoides, carotenoides, y compuestos fenólicos, que contribuyen a su potencial antioxidante y a sus propiedades saludables. Estos compuestos no solo aportan beneficios nutricionales a las plantas, sino que también pueden tener efectos positivos en la salud humana, es por este motivo que se utilizó la papa para realizar este ensayo.

Rodrigo, (2013) menciona que la localidad Alaques ubicado en Cotopaxi, en la ciudad de Latacunga a una altitud de 2860 msnm posee una humedad y temperaturas que varían desde los 6 hasta 17°C este fue el lugar de donde se obtuvieron las muestras de *Solanum tuberosum* L. con presencia de ceniza y sin ceniza, según lo expuesto por (Andrade et al., 2002) se cumple las condiciones de altitud de cultivo, porque su altura de siembra adecuada esta entre 1,500 a 2,500 msnm.

La agricultura, particularmente en el caso de *Solanum tuberosum* L., es altamente vulnerable a los impactos adversos de las erupciones volcánicas, ya que pueden causar la destrucción de los cultivos. Las emisiones, cenizas y flujos piroclásticos de los volcanes han dejado una marcada huella en las comunidades rurales ecuatorianas que dependen significativamente de la agricultura (Biggs et al., 2010).

La presencia de ceniza volcánica puede generar un impacto significativo en los cultivos y la concentración de metabolitos secundarios en las plantas. Según Carrera-Beltrán et al. (2024), la ceniza depositada sobre los cultivos puede limitar la fotosíntesis al bloquear la luz

solar, puede llegar hacer perforaciones en las hojas, estresar a la planta y disminuir la disponibilidad de nutrientes esenciales en el suelo. Además, Epstein & Bloom (2005) mencionan que la composición química puede modificar el pH del suelo, afectando la absorción de nutrientes y desencadenando respuestas fisiológicas en las plantas.

Ante el estrés inducido por la ceniza, plantas como *Solanum tuberosum* L. pueden aumentar la producción de metabolitos secundarios, como los polifenoles, como parte de sus mecanismos de defensa para sobrevivir y adaptarse (Espinoza & Vallejo Reyna, 2019). No obstante, la cantidad y composición de estos metabolitos pueden variar según la especie vegetal y las condiciones ambientales, lo que potencialmente influye en la calidad y productividad de los cultivos (Bourgaud et al., 2001).

En este estudio, se investigaron las actividades antioxidantes utilizando los métodos DPPH, ABTS y FRAP en muestras de papa con y sin ceniza volcánica. Los resultados revelaron una captura significativa del radical DPPH y ABTS, indicando una inhibición de Trolox equivalente por gramo de muestra. Los valores obtenidos para la actividad antioxidante DPPH y ABTS (ver Tablas 8 y 9) mostraron una diferencia significativa mostrando un aumento en la muestra con ceniza, estos datos están en línea con los hallazgos de (Yamdeu Galani et al., 2017), quienes observaron que las muestras de papa, expuestas a fluctuaciones de temperatura y almacenadas durante 60 días a 4° C, mostraron los valores más altos, alcanzando 3,05 $\mu\text{mol Trolox/gfw}$ para DPPH y 4,19 $\mu\text{mol Trolox/gfw}$ para ABTS, estos resultados sugieren que el estrés ocasionado por las condiciones de almacenamiento contribuyó significativamente a la actividad antioxidante registrada en las muestras. Estos resultados están de acuerdo con los hallazgos de Madiwale et al. (2011), quienes observaron un aumento constante en la actividad antioxidante durante el almacenamiento.

Con respecto al potencial reductor del ion Fe^{+2} , mostró un incremento en la muestra con ceniza en comparación con la muestra sin ceniza (Tabla 10), siendo una concentración menor a

la que presento Madiwale et al. (2011) obteniendo un valor de $16,3 \pm 6,67 \mu\text{mol Fe}^{+2} / \text{g fw}$, estos resultados divergen posiblemente por la influencia del método de extracción de principios activos ya que es diferente al establecido en este trabajo.

El ensayo de Folin-Ciocalteu utilizado para medir el contenido fenólico total donde la mayor concentración fue de la muestra en presencia de ceniza (Tabla 12), estos valores son comparables con el rango informado de Samaniego et al. (2018) tuvo un rango entre 0,73 a 3,25 mg GAE/g fw, de 0,41 a 1,77 mg GAE/g fw y de 0,57 a 1,44 mg GAE/g fw para Cutuglahua, Pujilí y Pilahuín, respectivamente.

El nivel de compuestos fenólicos está principalmente determinado por el genotipo de la planta, y las discrepancias reportadas por diversos investigadores pueden atribuirse también a la variabilidad en la ubicación de cultivo, los procedimientos de extracción y la preparación de las muestras. Específicamente, los métodos de extracción intensivos podrían resultar en un incremento del contenido fenólico (Madiwale et al., 2011; Rumbaoa et al., 2009)

Tanto en las plantas como en los tubérculos de patata, se ha demostrado que el estrés ambiental, como el almacenamiento a baja temperatura, la luz intensa, las heridas o los ataques de patógenos, inducen la generación de compuestos fenólicos a través de la vía de los fenilpropanoides mediante la activación de la fenilalanina amonialiasa (PAL) (Jiang & Joyce, 2003).

Conclusiones

Se realizó un análisis fitoquímico exhaustivo para identificar antioxidantes y polifenoles en muestras de *Solanum tuberosum* L., utilizando un enfoque de muestreo aleatorio que abarcó tanto condiciones con la presencia de ceniza como sin ella.

Se obtuvo una mayor capacidad antioxidante en los extractos de *Solanum tuberosum* L. en la muestra con presencia de ceniza con una concentración de 9,08 $\mu\text{molTRX/g fw}$ (DPPH), en comparación a las otras pruebas con valores de $5,82\pm 1,44 \mu\text{molTRX/g fw}$ (ABTS) y $3,46\pm 0,03 \mu\text{mol Fe}^{2+}/\text{g fw}$ (FRAP).

Se analizó la concentración de metabolitos secundarios en muestras de *Solanum tuberosum* L. con y sin ceniza, obteniendo valores de $1,24\pm 0,07 \text{ mg GAE/g fw}$ y $0,71\pm 0,08 \text{ mg GAE/g fw}$ respectivamente para fenoles, utilizando el ensayo de Folin-Ciocalteu.

Tras analizar muestras de *Solanum tuberosum* L. con y sin presencia de ceniza, se observó que la ceniza volcánica puede influir significativamente en la presencia de antioxidantes y polifenoles en las muestras de papa. Los resultados sugieren que la presencia de ceniza puede desencadenar respuestas metabólicas en las plantas, lo que lleva a un aumento en la producción de compuestos bioactivos como parte de su mecanismo de defensa. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar el impacto de factores abióticos, como la ceniza volcánica, en la composición química de las plantas y su potencial nutricional. Sin embargo, se necesitan investigaciones adicionales para comprender completamente los mecanismos subyacentes y la relevancia de estos hallazgos en la agricultura y la nutrición.

Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios fitoquímicos de toda la planta de para conocer el porcentaje de principios activos para tener una información más completa.

Se recomienda ampliar la investigación en las demás provincias productoras de papa con presencia de ceniza para la determinación antioxidantes y polifenoles, y así contar con la información necesaria para mejorar las estrategias de tecnificación del cultivo.

Realizar la extracción utilizando varios disolventes con el fin de demostrar la variabilidad en los resultados obtenidos en este estudio.

Capítulo VI: Bibliografía

- Aguilera, E., Pareschi, M. T., Rosi, M. , & Zanchetta, G. (2004). *Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi volcano (Ecuador)*. 33(2), 161–189.
- Alami, M. M., Ouyang, Z., Zhang, Y., Shu, S., Yang, G., Mei, Z., & Wang, X. (2022). The Current Developments in Medicinal Plant Genomics Enabled the Diversification of Secondary Metabolites' Biosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 15932. <https://doi.org/10.3390/ijms232415932>
- Allan, J. F., & Simkin, T. (2000). Fernandina Volcano's evolved, well-mixed basalts: Mineralogical and petrological constraints on the nature of the Galapagos plume. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3), 6017–6041. <https://doi.org/10.1029/1999JB900417>
- Alvis, A., Vélez, C. A., Villada, H. S., & Rada-Mendoza, M. (2008). Análisis Físico-Químico y Morfológico de Almidones de Ñame, Yuca y Papa y Determinación de la Viscosidad de las Pastas. *Información Tecnológica*, 19(1). <https://doi.org/10.4067/S0718-07642008000100004>
- Andrade, H., Bastidas, O., & Sherwood, S. (2002). *La papa en Ecuador* (Pumisacho y Sherwood). INIAP, Estación Experimental Santa Catalina/CIP.
- Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., Bektaşoğlu, B., & Bener, M. (2010). *Cupric Ion Reducing Antioxidant Capacity Assay for Antioxidants in Human Serum and for Hydroxyl Radical Scavengers* (pp. 215–239). https://doi.org/10.1007/978-1-60761-411-1_15

- Apak, R., Özyürek, M., Güçlü, K., & Çapanoğlu, E. (2016). Antioxidant Activity/Capacity Measurement. 1. Classification, Physicochemical Principles, Mechanisms, and Electron Transfer (ET)-Based Assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *64*(5), 997–1027. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04739>
- Aravena-Sanhueza, F., Pérez-Rivera, M., Castillo-Felices, R., Mundaca-Uribe, R., Aranda Bustos, M., & Peña Farfal, C. (2020). Determination of antioxidant capacity (orac) of greigia sphacelata and correlation with voltammetric methods. *Journal of the Chilean Chemical Society*, *65*(3), 4925–4928. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072020000204925>
- Balandrin, M. F., Klocke, J. A., Wurtele, E. S., & Bollinger, Wm. H. (1985). Natural Plant Chemicals: Sources of Industrial and Medicinal Materials. *Science*, *228*(4704), 1154–1160. <https://doi.org/10.1126/science.3890182>
- Baliyan, S., Mukherjee, R., Priyadarshini, A., Vibhuti, A., Gupta, A., Pandey, R. P., & Chang, C.-M. (2022). Determination of Antioxidants by DPPH Radical Scavenging Activity and Quantitative Phytochemical Analysis of *Ficus religiosa*. *Molecules*, *27*(4), 1326. <https://doi.org/10.3390/molecules27041326>
- Basantes, F., Aragón Suárez, J. P., Albuja Illescas, L. M., & Vásquez Hernández, L. del R. (2020). Diagnóstico de la situación actual de la producción y comercialización de la papa (*Solanum tuberosum* L.) en la Zona 1 del Ecuador. *E-Agronegocios*, *6*(2), 103–120. <https://doi.org/10.18845/ea.v6i2.5103>
- Bednarek, P. (2012). Chemical warfare or modulators of defence responses – the function of secondary metabolites in plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology*, *15*(4), 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2012.03.002>
- Bedón, P. A. E., Sierra, D., Mothes, P. A., & Telenchana, E. (2017). *Volcan Cotopaxi breve resumen de su historia, actividad eruptiva y amenazas potenciales*. (ResearchGate).

- BENNETT, R. N., & WALLSGROVE, R. M. (1994). Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytologist*, 127(4), 617–633. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1994.tb02968.x>
- Benzie, I. F. F., & Devaki, M. (2017). The ferric reducing/antioxidant power (FRAP) assay for non-enzymatic antioxidant capacity: concepts, procedures, limitations and applications. In *Measurement of Antioxidant Activity & Capacity* (pp. 77–106). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119135388.ch5>
- 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. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Biggs, J., Mothes, P., Ruiz, M., Amelung, F., Dixon, T. H., Baker, S., & Hong, S. (2010). Stratovolcano growth by co-eruptive intrusion: The 2008 eruption of Tungurahua Ecuador. *Geophysical Research Letters*, 37(21). <https://doi.org/10.1029/2010GL044942>
- Blainski, A., Lopes, G., & de Mello, J. (2013). Application and Analysis of the Folin Ciocalteu Method for the Determination of the Total Phenolic Content from *Limonium Brasiliense* L. *Molecules*, 18(6), 6852–6865. <https://doi.org/10.3390/molecules18066852>
- Borlinghaus, J., Reiter, J., Ries, M., & Gruhlke, M. C. H. (2020). Screening procedures and tests for antioxidants. In *Pathology* (pp. 389–395). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815972-9.00037-8>
- Bourgaud, F., Gravot, A., Milesi, S., & Gontier, E. (2001). Production of plant secondary metabolites: a historical perspective. *Plant Science*, 161(5), 839–851. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00490-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00490-3)

- Brown, C. R. (2008). Breeding for Phytonutrient Enhancement of Potato. *American Journal of Potato Research*, 85(4), 298–307. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9028-0>
- Buckenhuskas, H. J. (2005). Nutritional Relevant Aspect of Potatoes and Potato Constituents. *Wageningen Academic Publishers*, 17–26.
- Buettner, G. R. (1993). The Pecking Order of Free Radicals and Antioxidants: Lipid Peroxidation, α -Tocopherol, and Ascorbate. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 300(2), 535–543. <https://doi.org/10.1006/abbi.1993.1074>
- Cerretani, L., & Bendini, A. (2010). Rapid Assays to Evaluate the Antioxidant Capacity of Phenols in Virgin Olive Oil. In *Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention* (pp. 625–635). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374420-3.00067-X>
- Cowan, G. H., Roberts, A. G., Jones, S., Kumar, P., Kalyandurg, P. B., Gil, J. F., Savenkov, E. I., Hemsley, P. A., & Torrance, L. (2018). Potato Mop-Top Virus Co-Opts the Stress Sensor HIP26 for Long-Distance Movement. *Plant Physiology*, 176(3), 2052–2070. <https://doi.org/10.1104/pp.17.01698>
- de Haan, S., & Rodriguez, F. (2016). Potato Origin and Production. In *Advances in Potato Chemistry and Technology* (pp. 1–32). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800002-1.00001-7>
- Dereje, B., & Chibuzo, N. (2021). Nutritional Composition and Biochemical Properties of *Solanum tuberosum*. In *Solanum tuberosum - A Promising Crop for Starvation Problem*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98179>
- Divekar, P. A., Narayana, S., Divekar, B. A., Kumar, R., Gadratagi, B. G., Ray, A., Singh, A. K., Rani, V., Singh, V., Singh, A. K., Kumar, A., Singh, R. P., Meena, R. S., & Behera, T. K. (2022). Plant Secondary Metabolites as Defense Tools against Herbivores for Sustainable

Crop Protection. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(5), 2690.

<https://doi.org/10.3390/ijms23052690>

Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2017). Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives.

Environmental Science and Pollution Research, 24(5), 4433–4446.

<https://doi.org/10.1007/s11356-016-8230-8>

Dodds, P. N., & Rathjen, J. P. (2010). Plant immunity: towards an integrated view of plant–pathogen interactions. *Nature Reviews Genetics*, 11(8), 539–548.

<https://doi.org/10.1038/nrg2812>

DOUCHES, D. S., & JASTRZEBSKI, K. (1993). Potato. In *Genetic Improvement of Vegetable Crops* (pp. 605–644). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040826-2.50048-5>

Eduardo, J. M., & Roberqui, M. M. (2012). *Comportamiento del crecimiento y el rendimiento de la variedad de papa (Solanum tuberosum L.) Spunta*. .

Epstein, E., & Bloom, A. (2005). *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives (second ed...)* (Sinauer Associates).

Espinoza, C., & Vallejo Reyna, M. Á. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>

FAOSTAT. (2015). *FAO Statistical Pocketbook: World Food and Agriculture*.

Flieger, J., Flieger, W., Baj, J., & Maciejewski, R. (2021). Antioxidants: Classification, Natural Sources, Activity/Capacity Measurements, and Usefulness for the Synthesis of Nanoparticles. *Materials*, 14(15), 4135. <https://doi.org/10.3390/ma14154135>

- Floegel, A., Kim, D.-O., Chung, S.-J., Koo, S. I., & Chun, O. K. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, *24*(7), 1043–1048.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.008>
- Fréchette, B., Bejan, M., Lucas, É., Giordanengo, P., & Vincent, C. (2010). Resistance of Wild *Solanum* Accessions to Aphids and Other Potato Pests in Quebec Field Conditions. *Journal of Insect Science*, *10*(161), 1–16. <https://doi.org/10.1673/031.010.14121>
- Fuleiki, T., & Francis, F. J. (1968). Quantitative Methods for Anthocyanins. *Journal of Food Science*, *33*(1), 72–77. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1968.tb00887.x>
- Gallegos, P. (1997). *El gusano blanco de la Papa en Ecuador: comportamiento y control*. .
- Gao, Y., Alyokhin, A., Nauen, R., Guedes, R. N. C., & Palli, S. R. (2022). Challenges and opportunities in managing pests of potato. *Pest Management Science*, *78*(9), 3729–3730.
<https://doi.org/10.1002/ps.7081>
- Garrett, A. R., Murray, B. K., Robison, R. A., & O'Neill, K. L. (2010). *Measuring Antioxidant Capacity Using the ORAC and TOSC Assays* (pp. 251–262). https://doi.org/10.1007/978-1-60761-411-1_17
- Gervasio, G., Jerez-Mompie, E., Morales, B., Caridad-Nápoles, M., Gervasio, G., Jerez-Mompie, E., Morales, B., & Caridad-Nápoles, M. (2019). *Selección de una rizobacteria promotora del crecimiento en papa (Solanum tuberosum L.)*. .
- Gulcin, İ. (2020). Antioxidants and antioxidant methods: an updated overview. *Archives of Toxicology*, *94*(3), 651–715. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02689-3>
- Harborne, J. B. (2007). *Role of Secondary Metabolites in Chemical Defence Mechanisms in Plants* (pp. 126–139). <https://doi.org/10.1002/9780470514009.ch10>

- Hardigan, M. A., Laimbeer, F. P. E., Newton, L., Crisovan, E., Hamilton, J. P., Vaillancourt, B., Wiegert-Rininger, K., Wood, J. C., Douches, D. S., Farré, E. M., Veilleux, R. E., & Buell, C. R. (2017). Genome diversity of tuber-bearing *Solanum* uncovers complex evolutionary history and targets of domestication in the cultivated potato. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(46). <https://doi.org/10.1073/pnas.1714380114>
- Herrera, M., Carpio, H., & Chávez, G. (1999). *Estudio sobre el subsector de la papa en el Ecuador*. INIAP, Estación Experimental Santa Catalina.
- Huang, X.-Q., & Dudareva, N. (2023). Plant specialized metabolism. *Current Biology*, *33*(11), R473–R478. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.01.057>
- Jácome, E. (2011). *Evaluación del Impacto de la Ceniza Volcánica Emitida por el Volcán Tungurahua, Sobre los Suelos Destinados a la Explotación Agrícola (Cantón Quero)*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Jansen, G., Flamme, W., Schüler, K., & Vandrey, M. (2001). Tuber and starch quality of wild and cultivated potato species and cultivars. *Potato Research*, *44*(2), 137–146. <https://doi.org/10.1007/BF02410100>
- Jiang, Y., & Joyce, D. C. (2003). ABA effects on ethylene production, PAL activity, anthocyanin and phenolic contents of strawberry fruit. *Plant Growth Regulation*, *39*(2), 171–174. <https://doi.org/10.1023/A:1022539901044>
- Kachroo, A., & Robin, G. P. (2013). Systemic signaling during plant defense. *Current Opinion in Plant Biology*, *16*(4), 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.06.019>
- Lakhotia, N., Joshi, G., Bhardwaj, A. R., Katiyar-Agarwal, S., Agarwal, M., Jagannath, A., Goel, S., & Kumar, A. (2014). Identification and characterization of miRNAs in root, stem, leaf

- and tuber developmental stages of potato (*Solanum tuberosum* L.) by high-throughput sequencing. *BMC Plant Biology*, 14(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-6>
- Lamuela-Raventós, R. M. (2017). Folin-Ciocalteu method for the measurement of total phenolic content and antioxidant capacity. In *Measurement of Antioxidant Activity & Capacity* (pp. 107–115). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119135388.ch6>
- Levy, D., & Kedar, N. (2019). *Solanum Tuberosum*. In *CRC Handbook of Flowering* (pp. 363–366). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351072564-47>
- Liu, J., He, X. Z., Ye, S., Zhou, J., Han, P., Gao, Y., & Yang, M. (2023). Pest management of postharvest potatoes: lethal, sublethal and transgenerational effects of the ectoparasitic mite *Pyemotes zhonghuajia* on the potato worm *Phthorimaea operculella*. *Pest Management Science*, 79(12), 5250–5259. <https://doi.org/10.1002/ps.7730>
- Luhar, S., Rajamane, N. P., Corbu, O., & Luhar, I. (2019). Impact of incorporation of volcanic ash on geopolymerization of eco-friendly geopolymer composites: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 572(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012001>
- Madiwale, G. P., Reddivari, L., Holm, D. G., & Vanamala, J. (2011). Storage Elevates Phenolic Content and Antioxidant Activity but Suppresses Antiproliferative and Pro-apoptotic Properties of Colored-Flesh Potatoes against Human Colon Cancer Cell Lines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(15), 8155–8166. <https://doi.org/10.1021/jf201073g>
- Martínez-Navarrete, N., Del Mar, C. V. M., & José, M. L. J. (2008). Los compuestos bioactivos de las frutas y sus efectos en la salud. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*.

- Matsumoto, K., & Geshi, N. (2021). Shallow crystallization of eruptive magma inferred from volcanic ash microtextures: a case study of the 2018 eruption of Shinmoedake volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 83(5), 31. <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01451-6>
- Millam, S. (2006). Potato (*Solanum tuberosum* L.). In *Agrobacterium Protocols Volume 2* (pp. 25–35). Humana Press. <https://doi.org/10.1385/1-59745-131-2:25>
- Mothes, P. A. (1992). Lahars of Cotopaxi Volcano, Ecuador: hazard and risk evaluation. In *Geohazards* (pp. 53–63). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2310-5_7
- Mueller, S. B., Kueppers, U., Ametsbichler, J., Cimarelli, C., Merrison, J. P., Poret, M., Wadsworth, F. B., & Dingwell, D. B. (2017). Stability of volcanic ash aggregates and break-up processes. *Scientific Reports*, 7(1), 7440. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07927-w>
- Mueller, W., Cowie, H., Horwell, C. J., Hurley, F., & Baxter, P. J. (2020). Health Impact Assessment of Volcanic Ash Inhalation: A Comparison With Outdoor Air Pollution Methods. *GeoHealth*, 4(7). <https://doi.org/10.1029/2020GH000256>
- Müller, L., Fröhlich, K., & Böhm, V. (2011). Comparative antioxidant activities of carotenoids measured by ferric reducing antioxidant power (FRAP), ABTS bleaching assay (α TEAC), DPPH assay and peroxy radical scavenging assay. *Food Chemistry*, 129(1), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.045>
- Murugan, R., & Parimelazhagan, T. (2014). Comparative evaluation of different extraction methods for antioxidant and anti-inflammatory properties from *Osbeckia parvifolia* Arn. – An in vitro approach. *Journal of King Saud University - Science*, 26(4), 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.09.006>

- Nakagawa, M., & Ohba, T. (2003). Minerals in Volcanic Ash 1 : Primary Minerals and Volcanic Glass. *NPJ Schizophrenia*. <https://doi.org/10.1038/s41537-019-0073-0>
- Nenadis, N., & Tsimidou, M. Z. (2017). DPPH (2,2-di(4-tert-octylphenyl)-1-picrylhydrazyl) radical scavenging mixed-mode colorimetric assay(s). In *Measurement of Antioxidant Activity & Capacity* (pp. 141–164). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9781119135388.ch8>
- Nenadis, N., Wang, L.-F., Tsimidou, M., & Zhang, H.-Y. (2004). Estimation of Scavenging Activity of Phenolic Compounds Using the ABTS ** Assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(15), 4669–4674. <https://doi.org/10.1021/jf0400056>
- Ochoa, C. M. (1990). *The potatoes of South America: Bolivia*. Cambridge University .
- Ortiz-Medina, E. (2007). *Potato tuber protein and its manipulation by chimeral disassembly using specific tissue explantation for somatic embryogenesis* (Ph.D. Diss).
- Ozgen, M., Reese, R. N., Tulio, A. Z., Scheerens, J. C., & Miller, A. R. (2006). Modified 2,2-Azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic Acid (ABTS) Method to Measure Antioxidant Capacity of Selected Small Fruits and Comparison to Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) and 2,2'-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) Methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(4), 1151–1157. <https://doi.org/10.1021/jf051960d>
- Özyürek, M., Güçlü, K., & Apak, R. (2011). The main and modified CUPRAC methods of antioxidant measurement. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 30(4), 652–664.
<https://doi.org/10.1016/j.trac.2010.11.016>
- Paredes-Mariño, J., Forte, P., Alois, S., Chan, K. L., Cigala, V., Mueller, S. B., Poret, M., Spanu, A., Tomašek, I., Tournigand, P.-Y., Perugini, D., & Kueppers, U. (2022). The lifecycle of

volcanic ash: advances and ongoing challenges. *Bulletin of Volcanology*, 84(5), 51.

<https://doi.org/10.1007/s00445-022-01557-5>

Pękal, A., & Pyrzynska, K. (2014). Evaluation of Aluminium Complexation Reaction for Flavonoid Content Assay. *Food Analytical Methods*, 7(9), 1776–1782.

<https://doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x>

Pérez, M., Dominguez-López, I., & Lamuela-Raventós, R. M. (2023). The Chemistry Behind the Folin–Ciocalteu Method for the Estimation of (Poly)phenol Content in Food: Total Phenolic Intake in a Mediterranean Dietary Pattern. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(46), 17543–17553. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04022>

Piasecka, A., Jedrzejczak-Rey, N., & Bednarek, P. (2015). Secondary metabolites in plant innate immunity: conserved function of divergent chemicals. *New Phytologist*, 206(3), 948–964.

<https://doi.org/10.1111/nph.13325>

Priestley, H. (2006). *How to think like consumers. . . and win! In: Potato developments in a changing Europe* (Haase and Haverkort, Vol. 22). Wageningen Academic Pub.

Ramon, P., Vargas, S. V, Mothes, P. A., & Santamaría, S. D. (2021). *Instituto Geofísico -Escuela Politécnica Nacional, el Servicio Sismológico y Volcanológico Ecuatoriano*.

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999).

Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)

Rodrigo, C. A. M. (2013). Comportamiento agronómico de la papa (*Solanum Tuberosum* L.) variedad superchola con la aplicación de tres tipos de abonos orgánicos en el cantón Latacunga. *Quevedo*.

- Rodríguez Salazar, M. de los Á., Urbina, G. R. O., Bezerra, P. do N., Cunha, V. M. B., da Silva, M. P., Pires, F. C. S., Silva, A. P. de S. e, Ferreira, M. C. R., Barbosa, J. R., de Sousa, S. H. B., & de Carvalho, R. N. (2023). Antioxidants extraction from vegetable matrices with green solvents. In *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science* (pp. 289–308). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95156-2.00010-6>
- Rojas-Padilla, C., & Vásquez-Villalobos, V. (2016). Phenolic compounds with antioxidant capacity of the native Andean potato (*Solanum tuberosum* L.) Huagalina variety in La Libertad- Peru. *Scientia Agropecuaria*, 7, 333–340. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.03.22>
- Ruggieri, F., Fernandez-Turiel, J., Gimeno, D., & Del, C. G. , V. (2008). Caracterización de cenizas volcánicas y su influencia en la calidad de las aguas superficiales de la región de Antofagasta de la Sierra, Catamarca, Argentina. *ResearchGate* .
- Rumbaoa, R. G. O., Cornago, D. F., & Geronimo, I. M. (2009). Phenolic content and antioxidant capacity of Philippine potato (*Solanum tuberosum*) tubers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22(6), 546–550. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.11.004>
- Samaniego, I., Espin, S., Cuesta, X., Arias, V., Rubio, A., Llerena, W., Angós, I., & Carrillo, W. (2018). Analysis of Environmental Conditions Effect in the Phytochemical Composition of Potato (*Solanum tuberosum*) Cultivars. *Plants*, 9(7), 815. <https://doi.org/10.3390/plants9070815>
- Santamaría, S. D., & Bernard, B. (2018). Hierarchization of the volcanoes of continental and insular Ecuador based on their threat potential. *ResearchGate*.
- Singaña, D. (2021). Los límites de la productividad del cultivo de papa en Ecuador entre 2017 y 2018. *Revista Latinoamericana de La Papa*, 25(1), 39–51.

- Sirivibulkovit, K., Nouanthavong, S., & Sameenoi, Y. (2018). Paper-based DPPH Assay for Antioxidant Activity Analysis. *Analytical Sciences*, 34(7), 795–800.
<https://doi.org/10.2116/analsci.18P014>
- Sukhotu, T., & Hosaka. (2006). Origin and evolution of *Andigena* potatoes revealed by chloroplast and nuclear DNA markers. *Genome*, 636–647.
- Sukhotu, T., Kamijima, & Hosaka. (2005). Genetic diversity of the Andean tetraploid cultivated potato (*Solanum tuberosum* L. ssp. *andigena* Hawkes) evaluated by chloroplast and nuclear DNA markers. *Genome*, 48, 55–66.
- Suktham, T., Jones, A., Soliven, A., Dennis, G. R., & Shalliker, R. A. (2019). A comparison of the performance of the cupric reducing antioxidant potential assay and the ferric reducing antioxidant power assay for the analysis of antioxidants using reaction flow chromatography. *Microchemical Journal*, 149, 104046.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104046>
- Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L., & Hawkins Byrne, D. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6–7), 669–675.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003>
- Thompson, A. K. (1990). The Potato: Third Edition. By W. G. Burton. Harlow: Longman Scientific and Technical (1989), pp. 742, £48.00. *Experimental Agriculture*, 26(1), 131–131.
<https://doi.org/10.1017/S0014479700015477>
- Vázquez, C. V., Rojas, M. G. V., Ramírez, C. A., Chávez-Servín, J. L., García-Gasca, T., Ferriz Martínez, R. A., García, O. P., Rosado, J. L., López-Sabater, C. M., Castellote, A. I., Montemayor, H. M. A., & de la Torre Carbot, K. (2015). Total phenolic compounds in milk from different species. Design of an extraction technique for quantification using the Folin–

Ciocalteu method. *Food Chemistry*, 176, 480–486.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.12.050>

Wink, M. (2003). Evolution of secondary metabolites from an ecological and molecular phylogenetic perspective. *Phytochemistry*, 64(1), 3–19. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(03\)00300-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(03)00300-5)

Xie, J., & Schaich, K. M. (2014). Re-evaluation of the 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl Free Radical (DPPH) Assay for Antioxidant Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(19), 4251–4260. <https://doi.org/10.1021/jf500180u>

Yamdeu Galani, J. H., Mankad, P. M., Shah, A. K., Patel, N. J., Acharya, R. R., & Talati, J. G. (2017). Effect of Storage Temperature on Vitamin C, Total Phenolics, UPLC Phenolic Acid Profile and Antioxidant Capacity of Eleven Potato (*Solanum tuberosum*) Varieties. *Horticultural Plant Journal*, 3(2), 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2017.07.004>

Capítulo VII: Apéndices