

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La cáscara de plátano ha despertado un creciente interés científico debido a su alto contenido de compuestos bioactivos y su potencial de aprovechamiento en diferentes industrias. Diversas investigaciones indican que este residuo representa aproximadamente el 30% del peso total del fruto y contiene compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, fibra dietaria y antioxidantes naturales, los cuales pueden ser aprovechados mediante procesos de extracción. (Análisis bromatológico de cáscaras de diferentes variedades de plátano (*Musa* spp.) para su posterior utilización en la formulación de harinas enriquecidas, 2019)

La cáscara de plátano contiene más de 40 compuestos fenólicos identificados, los cuales presentan propiedades antioxidantes y antimicrobianas con potencial aplicación en las industrias alimentaria y farmacéutica. Además, los autores destacan que la composición química depende de factores como la variedad, el estado de madurez y las condiciones de procesamiento. (Compuestos fenólicos en la cáscara de plátano y sus usos potenciales, 2018)

La cáscara de plátano verde posee una importante capacidad antioxidante y un contenido significativo de compuestos polifenólicos, concluyendo que este material puede ser aprovechado de manera técnica, económica y ambientalmente viable para la obtención de extractos bioactivos. (Rojas, Evaluación de Alternativas de Aprovechamiento Energético y Bioactivo de la Cáscara de Plátano , 2019)

En estudios relacionados con la obtención de colorantes naturales, se ha utilizado la cáscara de plátano hartón como fuente de pigmentos mediante procesos de extracción y secado, demostrando que este residuo vegetal puede emplearse para aplicaciones textiles y en la formulación de colorantes naturales.

Trabajos de investigación recientes sobre plátano inmaduro señalan que la cáscara presenta un mayor contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante cuando se encuentra en estado verde, lo cual favorece su utilización en investigaciones orientadas a la extracción de compuestos naturales. (Capacidad antioxidante y

compuestos fenólicos totales de la harina de plátano Clon hartón común en estado inmaduro, 2024)

La composición química de la cáscara de plátano depende de factores como la variedad, el grado de madurez y las condiciones de cultivo; sin embargo, generalmente contiene carbohidratos, fibra, minerales y compuestos fenólicos que pueden ser aprovechados en diferentes aplicaciones industriales. En el caso del plátano verde, la cáscara presenta una mayor concentración de ciertos compuestos fenólicos y taninos, responsables de tonalidades marrones y rojizas que pueden ser utilizadas como colorantes naturales.

En los últimos años, la cáscara de plátano ha despertado interés en investigaciones orientadas al aprovechamiento sostenible de residuos orgánicos, debido a su bajo costo, amplia disponibilidad y potencial de valorización. Diversos trabajos reportan su utilización en la obtención de harinas, biocombustibles, adsorbentes, antioxidantes y extractos naturales con aplicación en la industria alimentaria, cosmética y textil.

Los colorantes naturales han sido utilizados desde la antigüedad en aplicaciones textiles, alimentarias y cosméticas debido a su capacidad para aportar color a diferentes productos de origen natural. Sin embargo, con el desarrollo de los colorantes sintéticos en el siglo XIX, su uso disminuyó considerablemente debido a su menor costo y mayor estabilidad. En la actualidad, el interés por los colorantes naturales ha aumentado nuevamente debido a la creciente preocupación por los efectos ambientales y posibles riesgos para la salud asociados al uso de colorantes artificiales. (Impacto del uso de colorantes naturales en la industria alimentaria , 2023)

Los colorantes naturales pueden obtenerse a partir de frutas, vegetales, flores, semillas, microorganismos y residuos vegetales ricos en pigmentos naturales como antocianinas, carotenoides, clorofilas, betalainas y flavonoides. Estos compuestos, además de proporcionar color, presentan propiedades antioxidantes y bioactivas de interés para la industria alimentaria y farmacéutica. (Impacto del uso de colorantes naturales en la industria alimentaria , 2023)

Investigaciones recientes destacan que los colorantes naturales representan una alternativa sostenible frente a los colorantes artificiales, debido a que pueden obtenerse mediante procesos de extracción relativamente simples y utilizando materias primas renovables o residuos orgánicos. Además, su uso se encuentra alineado con las tendencias actuales de producción limpia y economía circular. (Exploración Integral de los Colorantes Naturales en la Industria Alimentaria: Desafíos y Oportunidades, 2024)

En relación con las técnicas de obtención, los métodos más utilizados para la extracción de colorantes naturales son la maceración, extracción sólido-líquido, extracción asistida por ultrasonido y extracción asistida por microondas. La elección del método depende de factores como la estabilidad del pigmento, rendimiento de extracción y costo del proceso. (Biotecnología para la extracción de pigmentos vegetales, para uso industrial, 2023)

Estudios científicos enfocados en aplicaciones textiles evidencian que los colorantes naturales pueden fijarse adecuadamente en fibras textiles mediante el uso de mordientes, logrando tonalidades estables y reduciendo el impacto ambiental generado por tintes sintéticos. Investigaciones realizadas en Bolivia sobre colorantes naturales del Valle de Zongo demostraron la viabilidad del uso de extractos vegetales para teñido textil mediante tratamientos ácidos y básicos. (Ibáñez-Calero & Loayza Afonso, Colorantes Naturales del Valle de Zongo (Bolivia) y sus aplicaciones textiles, 2020)

Los colorantes naturales son sustancias pigmentadas extraídas de fuentes orgánicas, que se utilizan para colorear diversos productos, desde alimentos hasta textiles. Su auge se debe a la creciente demanda de alternativas sostenibles y seguras frente a los colorantes sintéticos, derivados del petróleo y asociados a riesgos para la salud. Los colorantes naturales ofrecen mayor seguridad para el consumo y uso tópico, reducen el impacto ambiental al disminuir la dependencia de químicos contaminantes, aportan valor nutricional en algunos casos (como los carotenoides de frutas y verduras), pueden poseer propiedades adicionales como antioxidantes o antimicrobianas. La investigación en este campo busca optimizar la extracción y estabilidad de estos

colorantes, así como explorar nuevas fuentes y aplicaciones, contribuyendo a un desarrollo más ecológico y saludable.

La producción de colorantes naturales a nivel mundial está experimentando un crecimiento significativo, impulsado por la creciente demanda de los consumidores por productos más saludables y sostenibles.

Tabla IND-1 Datos sobre el mercado mundial de colorantes naturales

Mercado mundial de colorantes naturales	
Año	Millones de USD
2021	403,2
2022	440
2023	485,6
2024	516

Fuente: Global Market Insights (GMI), 2025

A continuación, se mostrarán tablas con datos de importaciones y exportaciones de colorantes naturales, señalando los 10 países con valores más significativos a nivel mundial.

Tabla IND-2 Datos de importaciones de colorantes naturales a nivel mundial

Importaciones Mundiales de Colorantes Naturales		
Países	Miles de USD	Toneladas
Estados Unidos de América	223096	14472
Alemania	138328	5687
Japón	119987	2865
Países Bajos	114919	2927
Francia	94912	5971
España	82492	4288
Italia	78867	10308
Reino Unido	71138	3808
Corea	68749	1542
Dinamarca	57168	1753

Fuente: Centro de Comercio Internacional (ITC), 2024

Tabla IND-3 Datos de exportaciones de colorantes naturales a nivel mundial

Exportaciones Mundiales de Colorantes Naturales		
Países	Miles de USD	Toneladas
China	265044	10953
Países Bajos	205209	8335
Alemania	165500	6614
Estados Unidos de América	151203	3279
Dinamarca	119926	3947
Perú	113259	2383
España	105650	7062
Italia	86038	8213
Francia	69687	3949
Irlanda	45947	1390

Fuente: Centro de Comercio Internacional (ITC), 2024

A continuación, se mostrarán tablas con datos de importaciones y exportaciones en de colorantes naturales, señalando los 10 países con valores más significativos de América Latina.

Tabla IND-4 Datos de importaciones en América Latina de colorantes naturales

Importaciones en América Latina de Colorantes Naturales		
Países	Miles de USD	Toneladas
México	32873	1205
Colombia	25406	3043
Brasil	24675	742
Perú	19564	1523
Guatemala	12857	1526
Chile	7008	171
Ecuador	6604	1201
Argentina	6590	218
República Dominicana	4416	144
El Salvador	2655	550

Fuente: Centro de Comercio Internacional (ITC), 2024

Tabla IND-5 Datos de exportaciones en América Latina de colorantes naturales

Exportaciones en América Latina de Colorantes Naturales		
Países	Miles de USD	Toneladas
Perú	113259	2383
México	119987	3057
Brasil	9654	980
Ecuador	2381	39
Guatemala	12580	347
Colombia	1172	88
Chile	751	56
Panamá	401	21
Costa Rica	354	47
El Salvador	258	34

Fuente: Centro de Comercio Internacional (ITC), 2024

Según la información técnica reportada por el Centro de Comercio Internacional (ITC) y diferentes publicaciones científicas relacionadas con el comercio de colorantes naturales, estos productos se comercializan principalmente en forma de extractos líquidos concentrados, extractos secos en polvo y soluciones diluidas, dependiendo de la aplicación industrial y del tipo de pigmento natural. En la industria alimentaria y cosmética, los colorantes naturales suelen comercializarse como extractos líquidos concentrados obtenidos mediante extracción hidroalcohólica o acuosa, debido a que esta presentación facilita su incorporación en bebidas, cosméticos y alimentos procesados. Asimismo, los extractos secos atomizados o en polvo son ampliamente utilizados por su mayor estabilidad, facilidad de transporte, almacenamiento y dosificación industrial. (Centro de Comercio Internacional (ITC), 2024)

Objetivos

Objetivo general

Obtener un extracto natural con capacidad colorante a partir de la cáscara de plátano verde mediante extracción sólido-líquido.

Objetivos específicos

- Caracterizar la cáscara de plátano verde mediante análisis fisicoquímico y microbiológico necesarios.
- Seleccionar un método de extracción sólido-líquido.
- Determinar los parámetros más importantes que participan en el proceso de extracción.
- Determinar las variables óptimas del proceso de extracción, con el fin de obtener el mejor rendimiento del proceso y la mejor calidad de su producto.
- Caracterizar el extracto natural colorante mediante análisis fisicoquímico y microbiológico necesarios.
- Realizar balance de materia y energía del proceso de obtención del colorante natural.
- Determinar costos para la obtención del extracto natural con capacidad colorante.

Justificación

Justificación tecnológica

La extracción sólido-líquido se utiliza para la obtención del extracto natural colorante debido a su capacidad para recuperar compuestos fenólicos y pigmentos presentes en la cáscara de plátano verde mediante el contacto entre el sólido y un solvente adecuado. Este tipo de extracción destaca su simplicidad operativa, bajo costo de implementación, facilidad de aplicación y uso de equipos accesibles tanto a nivel de laboratorio como industrial. Además, permite optimizar variables como la concentración del solvente, la relación soluto-solvente y el tiempo de extracción para mejorar el rendimiento del proceso y la recuperación de compuestos colorantes. Otro dato importante es su versatilidad y escalabilidad, ya que puede adaptarse a diferentes materias primas vegetales y niveles de producción, convirtiéndose en una técnica adecuada para el aprovechamiento de residuos orgánicos como la cáscara de plátano verde.

Justificación económica

La obtención de un extracto natural colorante mediante extracción sólido-líquido a partir de la cáscara de plátano verde representa una alternativa económicamente viable debido al aprovechamiento de una materia prima de bajo costo y amplia disponibilidad. La cáscara de plátano, considerada un residuo generado por el consumo y procesamiento del fruto, puede valorizarse mediante un proceso de extracción simple y accesible. Asimismo, el empleo de este residuo contribuye a disminuir los costos asociados a la adquisición de colorantes sintéticos, muchos de los cuales son importados y presentan un elevado costo de comercialización. De esta manera, el proceso favorece el aprovechamiento de recursos disponibles y la generación de productos de valor agregado a partir de materiales comúnmente desechados.

Justificación social

La presente investigación posee relevancia social debido a que promueve el aprovechamiento de la cáscara de plátano verde como materia prima para la obtención de un extracto colorante natural, brindando una alternativa sostenible para el uso de residuos orgánicos generados diariamente. El desarrollo de este tipo de productos contribuye al aprovechamiento de recursos disponibles y puede generar oportunidades de innovación y desarrollo económico en distintos sectores productivos. Asimismo, el uso de extractos naturales como alternativa parcial a los colorantes sintéticos ayuda a disminuir el uso de sustancias químicas que pueden afectar la salud y el medio ambiente. De igual manera, la investigación fomenta una mayor conciencia sobre la importancia del aprovechamiento responsable de los residuos y la implementación de prácticas más sostenibles, mediante la transformación de materiales comúnmente desechados en productos con valor agregado.

Justificación ambiental

La obtención de un extracto colorante natural a partir de la cáscara de plátano verde genera un impacto ambiental positivo, ya que permite aprovechar un residuo orgánico que normalmente es desechado y que, al acumularse sin un tratamiento adecuado, puede contribuir a la contaminación ambiental. Al transformar este material en un producto con valor agregado, se reduce la generación de residuos y se promueve el aprovechamiento eficiente de recursos naturales disponibles. Asimismo, el uso de extractos naturales como alternativa parcial a los colorantes sintéticos contribuye a disminuir el empleo de sustancias químicas asociadas a procesos industriales contaminantes y a la generación de efluentes con impacto negativo sobre el medio ambiente. De esta manera, la investigación fomenta prácticas orientadas a la sostenibilidad, el aprovechamiento responsable de residuos vegetales y el desarrollo de procesos con menor impacto ambiental.

Justificación personal

El interés por la obtención de un extracto colorante natural a partir de la cáscara de plátano verde surge debido al amplio consumo de esta fruta y a la constante generación de residuos provenientes de su cáscara, la cual generalmente es desechada sin recibir un aprovechamiento adecuado. Esta situación motiva la búsqueda de alternativas que permitan valorizar este material y transformarlo en un producto con potencial aplicación en diferentes sectores.

Este interés se fortalece al conocer que la cáscara de plátano verde contiene compuestos fenólicos y pigmentos naturales que pueden recuperarse mediante procesos de extracción, permitiendo obtener un producto con valor agregado a partir de un residuo orgánico. El uso de extractos naturales representa una alternativa frente al empleo de colorantes sintéticos en distintas aplicaciones industriales.

De esta manera, el presente proyecto permite aplicar conocimientos de Ingeniería Química relacionados con procesos de extracción y aprovechamiento de recursos naturales, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles y a la valorización de residuos orgánicos.

Alcance y Limitaciones

La presente investigación se enfoca en la obtención de un extracto colorante natural a partir de la cáscara de plátano verde mediante extracción sólido-líquido por maceración, evaluando la influencia de variables como la concentración del solvente, la relación soluto-solvente y el tiempo de extracción sobre el volumen final obtenido. Asimismo, comprende la caracterización cualitativa y cuantitativa del extracto obtenido mediante pruebas fisicoquímicas y microbiológicas, con la finalidad de determinar su potencial aplicación como extracto colorante natural. El estudio se desarrolla a escala de laboratorio, utilizando equipos y condiciones operativas accesibles para el análisis experimental.

La investigación se limita al uso de cáscara de plátano verde como materia prima y al empleo del método de extracción sólido-líquido por maceración, sin utilizar otras

técnicas de extracción avanzadas o procesos de purificación del extracto obtenido. Los análisis que se realiza corresponden a pruebas cualitativas y parámetros fisicoquímicos básicos, por lo que no se incluye una identificación específica ni cuantificación individual de los compuestos presentes en el extracto. El estudio no contempla evaluaciones de estabilidad a largo plazo y aplicaciones industriales a gran escala.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Descripción de la materia prima

1.1.1. Cáscara de plátano verde

La cáscara de plátano verde contiene diversos compuestos bioactivos responsables de la coloración y de las propiedades del extracto natural obtenido mediante extracción sólido-líquido. Entre los principales compuestos presentes se encuentran los compuestos fenólicos, taninos, flavonoides, carotenoides y clorofilas, los cuales aportan tonalidades características y capacidad antioxidante. Diversos estudios científicos reportan que la cáscara de plátano posee una alta concentración de compuestos fenólicos, incluso superior a la pulpa del fruto. (Compuestos fenólicos en la cáscara de plátano y sus usos potenciales, 2018)

Los compuestos fenólicos son considerados los principales responsables de la capacidad colorante del extracto, debido a la presencia de estructuras aromáticas son capaces de generar tonalidades marrones, rojizas y amarillentas. Dentro de estos compuestos destacan los taninos, catequinas, epicatequinas y ácido gálico, los cuales presentan además propiedades antioxidantes y reactividad frente a agentes químicos como el cloruro férrico. (Compuestos fenólicos en la cáscara de plátano y sus usos potenciales, 2018)

En el caso del plátano verde, también se encuentra una cantidad importante de clorofilas, responsables de la coloración verde inicial de la cáscara. Durante los procesos de maduración y oxidación, parte de estas clorofilas se degradan y permiten la aparición de otros pigmentos como carotenoides y compuestos fenólicos oxidados, generando tonalidades amarillas, marrones y rojizas en los extractos. (Cambios en los fitoquímicos y la capacidad antioxidante de la cáscara de plátano durante el proceso de maduración; con y sin tratamiento con etileno, 2019)

1.1.1.1. Composición química y física de la cáscara de plátano verde

Tabla I-1 Datos de la composición de la cáscara de plátano verde

Componente	Rango reportado	Compuesto bioactivo	Rango reportado
Humedad	6 – 17.8 %	Fenoles totales	0.90 – 3.0 g/100 g base seca
Proteínas	1.94 – 12.86 %	Dopamina	80 – 560 mg/100 g
Lípidos (grasas)	0.25 – 3.67 %	Gallocatequina	158 – 160 mg/100 g base seca
Carbohidratos totales	48.4 – 68 %	Catequina	0.24 mg/g base seca
Fibra dietética	14.2 – 50 %	Epicatequina	Presente en trazas
Cenizas (minerales totales)	7 – 14.7 %	Antocianinas	434 ± 97 µg equivalentes de cianidina-3-glucósido/100 g
Azúcares reductores	2 – 5 %	Carotenoides totales	300 – 400 µg equivalentes de luteína/100 g
Almidón	15 – 25 %	β-caroteno	0.84 µg/g
Potasio (K)	27.3 – 600 mg/100g	Xantofilas	0.57 µg/g
Calcio (Ca)	15.94 – 400 mg/100g	Clorofilas	Disminuyen hasta un 90 % durante la maduración
Magnesio (Mg)	3.5 – 120 mg/100g	Flavonoides totales	Presentes en concentraciones variables
Fósforo (P)	40 – 100 mg/100g	Ácido gálico	0.22 mg/g base seca
Hierro (Fe)	0.6 – 1.5 mg/100g	Ácido p-cumárico	0.58 mg/g base seca
Zinc (Zn)	0.3 – 0.8 mg/100g	Ácido rosmarínico	0.93 mg/g base seca
pH	5.0 – 6.46		
Densidad aparente	0.4 – 0.7 g/cm ³		
Capacidad de absorción de agua	3.83 – 6.45 g agua/g		

Fuente: Elaboración Propia, Recopilación de Información Teórica Variable, 2026

Los datos presentados en las tablas evidencian que la cáscara de plátano verde posee una composición química y fisicoquímica significativa, caracterizada por un elevado contenido de carbohidratos, fibra dietética, minerales y compuestos bioactivos con potencial funcional. La presencia de compuestos fenólicos, flavonoides, catequinas, carotenoides y clorofilas demuestra que este residuo vegetal constituye una fuente importante de sustancias con capacidad antioxidante y propiedades colorantes, las cuales pueden ser aprovechadas mediante procesos de extracción. Asimismo, los rangos reportados de humedad, pH, densidad aparente y capacidad de absorción de agua reflejan características favorables para su procesamiento y manejo en operaciones de extracción sólido-líquido. La diversidad y concentración de estos compuestos bioactivos respaldan el potencial de la cáscara de plátano verde como materia prima para la obtención de extractos naturales con posibles aplicaciones en las industrias alimentaria, cosmética y textil.

1.1.1.2. Beneficios de la cáscara de plátano verde

La cáscara de plátano verde presenta características favorables para la obtención de extractos naturales con capacidad colorante debido a su contenido de compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, carotenoides y otros metabolitos bioactivos que aportan coloración y actividad antioxidante. Estos compuestos contribuyen a la estabilidad del extracto y a la generación de tonalidades marrones, amarillas y rojizas, dependiendo de las condiciones de extracción y del pH del medio. Asimismo, la presencia de antioxidantes naturales favorece la protección de los pigmentos frente a procesos de oxidación, mejorando la estabilidad del color obtenido. Otra ventaja importante es la amplia disponibilidad y bajo costo de la cáscara de plátano verde, lo que permite aprovechar un residuo orgánico como materia prima para la obtención de productos con valor agregado y potencial aplicación en las industrias alimentaria, cosmética y textil. Estudios científicos reportan que la cáscara de plátano contiene concentraciones significativas de compuestos fenólicos y actividad antioxidante superiores a otras partes del fruto, lo que respalda su potencial para aplicaciones como extracto natural con propiedades colorantes.

1.1.1.3. Aplicaciones de la cáscara de plátano verde

La cáscara de plátano verde utilizada como extracto natural con capacidad colorante presenta diversas aplicaciones debido a su contenido de compuestos fenólicos, carotenoides y pigmentos naturales.

1.1.1.3.1. Industria textil

Una de las principales aplicaciones se encuentra en la industria textil, donde los extractos obtenidos de la cáscara de plátano se emplean para el teñido de fibras naturales y sintéticas, proporcionando tonalidades amarillas, marrones y rojizas con adecuada fijación y resistencia al lavado. Estudios reportan su uso exitoso en tejidos de algodón, lana y mezclas de poliamida, destacando además propiedades antioxidantes y antibacterianas en los materiales teñidos (Cáscara de plátano en el teñido de tejido de mezcla de poliamida/elastano, 2019).

1.1.1.3.2. Industria alimentaria

En la industria alimentaria, los pigmentos presentes en la cáscara de plátano poseen potencial aplicación como colorantes naturales y fuentes de antioxidantes debido a la presencia de carotenoides y compuestos fenólicos. Investigaciones recientes indican que estos extractos pueden emplearse como ingredientes funcionales y colorantes de origen natural en productos alimenticios, contribuyendo al reemplazo parcial de colorantes sintéticos. (KY & Chandimala, 2025)

1.1.1.3.3. Industria de cosmética y farmacéutica

Asimismo, en el área cosmética y farmacéutica, los extractos de cáscara de plátano son estudiados por sus propiedades antioxidantes y capacidad para proteger compuestos sensibles frente a procesos oxidativos, lo que favorece su incorporación en formulaciones naturales. Además, algunos estudios destacan el potencial de los pigmentos naturales obtenidos de residuos vegetales para aplicaciones tecnológicas y biomateriales sostenibles. (Manzoor & Ahmad, 2021)

1.2. Métodos de extracción del colorante natural

La extracción sólido-líquido es un proceso de separación que consiste en la transferencia de uno o varios componentes solubles desde una fase sólida hacia una fase líquida que actúa como disolvente. Este método se basa en la diferencia de solubilidad de los compuestos presentes en el sólido, permitiendo que el disolvente disuelva selectivamente las sustancias de interés sin afectar significativamente la matriz sólida restante. El principio fundamental de la extracción sólido-líquido radica en la difusión del soluto desde el interior del sólido hacia la superficie, seguido de su disolución en el disolvente líquido. Este fenómeno está regido por leyes fisico-químicas, como el gradiente de concentración, que impulsa la migración del soluto, y la afinidad polar o apolar entre el soluto y el disolvente, lo cual determina la eficacia de la extracción.

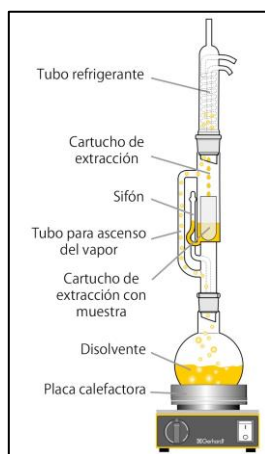
El principio explicado de manera más detallada es que al poner en contacto íntimo la fase sólida, generalmente pulverizada o en partículas pequeñas para maximizar el área superficial de contacto, con la fase líquida (el disolvente). La fuerza impulsora del proceso es el gradiente de concentración del soluto entre la interfaz sólido-líquido y el seno del disolvente. El soluto se transfiere desde el interior de las partículas sólidas hacia la superficie, se disuelve en el disolvente en la interfaz y luego se difunde hacia el volumen principal del líquido.

La aplicación de este tipo de extracción es de gran relevancia en diversas industrias, tales como la alimentaria, farmacéutica, cosmética, agrícola y minera, permitiendo la obtención de principios activos, compuestos bioactivos, aceites esenciales, minerales y otros productos de valor. En el contexto del aprovechamiento de subproductos agroindustriales como la cáscara de plátano verde, la extracción sólido-líquido representa una herramienta clave para recuperar compuestos funcionales como polifenoles, flavonoides, taninos y minerales, que pueden ser utilizados en la formulación de alimentos funcionales, productos cosméticos o suplementos nutricionales, contribuyendo a una economía circular y a la valorización de residuos orgánicos.

1.2.1. Extracción sólido-líquido por extractor Soxhlet

La extracción Soxhlet es un método convencional de extracción sólido-líquido se emplea para la recuperación de compuestos bioactivos presentes en matrices vegetales. Su funcionamiento se basa en la recirculación continua de un solvente a temperatura de ebullición mediante ciclos sucesivos de evaporación, condensación y percolación sobre la muestra sólida, favoreciendo la transferencia de masa y la solubilización de compuestos de interés. Este proceso permite mantener un contacto constante entre la matriz y el solvente fresco, incrementando la eficiencia de extracción y el rendimiento extractivo. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

Fig. I-1 Extracción sólido-líquido por extractor Soxhlet



Fuente: Pakopm, 2015

1.2.1.1. Variables de control en la extracción Soxhlet

Las variables de control en la extracción Soxhlet son la temperatura de extracción, el tipo y concentración del solvente, el tiempo de extracción, el tamaño de partícula de la muestra, la relación sólido-solvente y el número de ciclos de sifonado. La temperatura influye directamente sobre la solubilidad y difusión de los compuestos hacia el solvente, mientras que la polaridad del solvente determina la afinidad química con los compuestos de interés y, por tanto, la eficiencia extractiva. El tamaño de partícula afecta el área superficial de contacto entre el sólido y el solvente, favoreciendo la transferencia de masa cuando las partículas son más pequeñas. Asimismo, el tiempo de

extracción y la cantidad de ciclos de recirculación permiten incrementar el agotamiento del sólido y mejorar el rendimiento del proceso. La relación sólido-solvente también representa una variable crítica, debido a que influye sobre el gradiente de concentración y la capacidad de saturación del solvente durante la extracción. (González, Valdez, & Trujillo, 2024)

1.2.1.2. Ventajas y Desventajas de la extracción Soxhlet

La extracción Soxhlet destaca su elevada eficiencia de extracción, la muestra permanece en contacto continuo con solvente fresco mediante ciclos sucesivos de evaporación y condensación, favoreciendo la recuperación de compuestos bioactivos y aumentando la transferencia de masa. Además, presenta una alta reproducibilidad experimental, simplicidad operativa y bajo requerimiento de filtración posterior, debido a que el extracto se acumula directamente en el matraz de extracción. Otra ventaja importante es su amplio uso como método de referencia en investigaciones y métodos oficiales para la extracción de compuestos naturales, grasas, fenoles, pigmentos y metabolitos secundarios.

Sin embargo, la extracción Soxhlet presenta limitaciones relacionadas principalmente con el elevado tiempo de operación y el alto consumo de solventes orgánicos. La exposición prolongada de la muestra y del extracto a temperaturas cercanas al punto de ebullición del solvente puede provocar degradación de compuestos termosensibles, oxidación de metabolitos y pérdida parcial de sustancias volátiles. Asimismo, el proceso implica un mayor consumo energético y generación de residuos solventes en comparación con técnicas modernas como la extracción asistida por ultrasonido o microondas. Otra desventaja importante es la limitada escalabilidad industrial y la necesidad de controles adecuados de temperatura y seguridad durante la operación debido al uso continuo de solventes inflamables. (Organomation, 2025)

1.2.2. Extracción sólido-líquido por maceración

La extracción por maceración es método de extracción sólido-líquido que consiste en mantener una matriz vegetal en contacto directo con un solvente durante un determinado período de tiempo, permitiendo la difusión y solubilización de los

compuestos de interés hacia el medio líquido. Este proceso se fundamenta en fenómenos de transferencia de masa y gradiente de concentración, donde el solvente penetra en la estructura celular del material vegetal, favoreciendo la liberación de compuestos bioactivos como fenoles, flavonoides, pigmentos y antioxidantes. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

Fig. I-2 Extracción sólido-líquido por Maceración



Fuente: Métodos De Extracción En El Análisis De Grasas, n.d.

1.2.2.1. Variables de control en la extracción por maceración

Las principales variables de control en la extracción por maceración son el tipo y concentración del solvente, la relación soluto-solvente, el tiempo de extracción, la temperatura, la agitación y el tamaño de partícula de la muestra. La selección del solvente y su polaridad determinan la solubilidad y afinidad química con los compuestos de interés, influyendo directamente sobre la eficiencia extractiva. La relación sólido-solvente afecta el gradiente de concentración y la capacidad de difusión del soluto hacia el medio líquido, mientras que el tiempo de maceración condiciona el grado de agotamiento de la matriz vegetal y la recuperación de metabolitos bioactivos. Asimismo, la temperatura y la agitación favorecen la transferencia de masa al incrementar la difusión y el contacto entre el solvente y el material sólido. El tamaño de partícula también representa una variable importante, debido a que partículas más pequeñas incrementan el área superficial disponible para la extracción.

1.2.2.2. Ventajas y Desventajas la extracción por maceración

La extracción por maceración destaca en su simplicidad operativa, bajo costo de implementación, facilidad de aplicación y uso de equipos accesibles tanto a nivel de laboratorio como industrial. Además, puede realizarse a temperatura ambiente, lo que favorece la conservación de compuestos termosensibles y reduce la degradación de pigmentos, compuestos fenólicos y antioxidantes. Otra ventaja importante es su versatilidad, ya que permite utilizar diferentes solventes y adaptarse a distintos tipos de matrices vegetales. Debido a estas características, la maceración continúa siendo una de las técnicas más empleadas para la obtención de extractos naturales y compuestos bioactivos de origen vegetal.

Las limitaciones de esta extracción son los largos tiempos de extracción y el elevado consumo de solventes en comparación con técnicas asistidas por ultrasonido o microondas. Otra desventaja corresponde a la posible oxidación o degradación de metabolitos durante periodos prolongados de extracción, así como la necesidad de etapas posteriores de filtración y concentración del extracto. Además, el uso de solventes orgánicos puede generar residuos y riesgos ambientales si no se manejan adecuadamente.

1.2.3. Extracción sólido-líquido por cocción

La extracción por cocción es un método de extracción sólido-líquido que consiste en someter una matriz vegetal al calentamiento en presencia de un solvente, generalmente agua o soluciones hidroalcohólicas, con el objetivo de favorecer la liberación y solubilización de compuestos bioactivos presentes en el material sólido. El incremento de temperatura produce una mayor permeabilidad de las paredes celulares, disminuye la viscosidad del solvente y aumenta la velocidad de difusión de los compuestos hacia el medio líquido, mejorando la transferencia de masa y el rendimiento extractivo. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

Fig. I-3 Extracción sólido-líquido por cocción



Fuente: Cómo Fabricar Pigmentos Naturales – Julien Guinet – Artiste Peintre, n.d.

1.2.3.1. Variables de control en la extracción por cocción

Las principales variables de control en este proceso son la temperatura de extracción, el tiempo de cocción, la relación sólido-solvente, el tamaño de partícula y la agitación del sistema. La temperatura influye directamente sobre la velocidad de difusión y la solubilidad de los compuestos, incrementando la transferencia de masa; sin embargo, temperaturas excesivas pueden provocar degradación térmica de compuestos termosensibles. El tiempo de extracción determina el grado de agotamiento del sólido, mientras que la relación sólido-solvente afecta el gradiente de concentración y la capacidad de extracción del medio líquido. Asimismo, el tamaño de partícula influye sobre el área superficial disponible para el contacto con el solvente, favoreciendo la eficiencia extractiva cuando se utilizan partículas de menor tamaño. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

1.2.3.2. Ventajas y Desventajas de la extracción por cocción

Las principales ventajas de la extracción por cocción destacan su simplicidad operativa, bajo costo de implementación y facilidad de aplicación a nivel de laboratorio e industrial. Además, permite utilizar agua como solvente, reduciendo el uso de compuestos orgánicos y favoreciendo procesos más seguros y sostenibles. El calentamiento facilita la ruptura parcial de estructuras celulares vegetales, mejorando la liberación de compuestos fenólicos, pigmentos y metabolitos bioactivos. Otra

ventaja importante es la accesibilidad de los equipos requeridos y la posibilidad de procesar grandes volúmenes de materia prima.

Las limitaciones asociadas principalmente a la degradación térmica de compuestos sensibles al calor, pérdida de compuestos volátiles y posibles cambios en las propiedades fisicoquímicas del extracto debido a exposiciones prolongadas a altas temperaturas. Asimismo, el calentamiento continuo puede incrementar el consumo energético y favorecer reacciones de oxidación o pardeamiento en algunos compuestos naturales. Otra desventaja es la menor selectividad del proceso frente a técnicas avanzadas de extracción, lo que puede ocasionar la extracción simultánea de sustancias no deseadas presentes en la matriz vegetal. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

1.2.4. Extracción sólido-líquido asistida por Microondas (EAM)

La extracción asistida por microondas es un método de extracción sólido-líquido se utiliza para la recuperación de compuestos bioactivos mediante la aplicación de energía electromagnética en frecuencias de microondas. El principio de esta técnica se basa en el calentamiento rápido y volumétrico del solvente y de la matriz vegetal debido a la interacción de las microondas con moléculas polares, provocando el incremento de la presión interna y la ruptura parcial de las paredes celulares, lo que favorece la liberación y difusión de compuestos fenólicos, pigmentos, flavonoides y antioxidantes hacia el medio líquido. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

Fig. I-4 Extracción solido-liquido asistida por Microondas



Fuente: De Equipar S.A De C.V, 2020

1.2.4.1. Variables de control en la extracción asistida por Microondas

Las variables de control en la extracción asistida por microondas son la potencia de microondas, el tiempo de extracción, la temperatura, el tipo y volumen de solvente, la relación sólido-solvente, el tamaño de partícula y las características de la matriz vegetal. La potencia de microondas influye directamente sobre la velocidad de calentamiento y la ruptura de las paredes celulares, favoreciendo la liberación de compuestos bioactivos; sin embargo, niveles excesivos pueden provocar degradación térmica de compuestos sensibles. El tiempo y la temperatura de extracción determinan la eficiencia de transferencia de masa y el rendimiento extractivo, mientras que la polaridad del solvente condiciona la absorción de energía electromagnética y la solubilidad de los compuestos de interés. Asimismo, el tamaño de partícula influye sobre el área superficial de contacto entre la matriz y el solvente, favoreciendo la difusión de los compuestos hacia el medio líquido. (Lozano, Lozada, & Guerrero, 2024)

1.2.4.2. Ventajas y Desventajas de la extracción asistida por Microondas

La extracción asistida por microondas destaca en la reducción significativa del tiempo de extracción, menor consumo de solventes, incremento del rendimiento extractivo y mayor eficiencia de transferencia de masa en comparación con métodos convencionales. Además, el calentamiento rápido y uniforme favorece la ruptura celular y la liberación de compuestos fenólicos, pigmentos, flavonoides y antioxidantes presentes en materiales vegetales. Esta técnica también presenta menor consumo energético y menor impacto ambiental, siendo considerada una tecnología de extracción eficiente y sostenible para la recuperación de compuestos naturales.

Esta extracción presenta algunas limitaciones como el elevado costo de los equipos y la necesidad de un control preciso de las condiciones operativas. El uso de altas potencias o tiempos prolongados puede ocasionar degradación de compuestos termosensibles, pérdida de compuestos volátiles y sobrecalentamiento localizado de la muestra. Asimismo, la técnica presenta limitaciones en el procesamiento de grandes volúmenes y dificultades para el monitoreo directo del proceso durante la extracción.

Otra desventaja importante es que no todos los solventes presentan una adecuada absorción de energía microondas, lo que puede afectar la eficiencia extractiva dependiendo de la polaridad del sistema utilizado. (Lozano, Lozada, & Guerrero, 2024)

1.2.5. Extracción sólido-líquido asistida por Ultrasonido (EAU)

La extracción asistida por ultrasonido es un método de extracción sólido-líquido se utiliza para la recuperación de compuestos bioactivos presentes en matrices vegetales mediante la aplicación de ondas ultrasónicas de alta frecuencia. El principio de esta técnica se basa en el fenómeno de cavitación acústica, donde la formación, crecimiento y colapso de microburbujas en el medio líquido generan microturbulencias, incrementos locales de presión y ruptura parcial de las paredes celulares, favoreciendo la liberación y difusión de compuestos fenólicos, pigmentos, flavonoides y antioxidantes hacia el solvente. Este mecanismo mejora la transferencia de masa entre la matriz sólida y el medio líquido, permitiendo reducir significativamente el tiempo de extracción, el consumo de solventes y el gasto energético en comparación con métodos convencionales. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

Fig. I-5 Extracción solido-liquido asistida por Ultrasonido



Fuente: Ultrasonics, 2025

1.2.5.1. Variables de control en la extracción asistida por Ultrasonido

Las variables de control en la extracción asistida por ultrasonido son la frecuencia ultrasónica, potencia del ultrasonido, tiempo de extracción, temperatura, tipo y concentración del solvente, relación sólido-solvente y tamaño de partícula de la muestra. La potencia y frecuencia ultrasónica influyen directamente sobre el fenómeno de cavitación acústica, responsable de la formación y colapso de microburbujas que generan microturbulencias y ruptura parcial de las paredes celulares, favoreciendo la liberación de compuestos bioactivos hacia el solvente. El tiempo y la temperatura de extracción afectan la eficiencia de transferencia de masa y la estabilidad de compuestos termosensibles, mientras que la polaridad del solvente determina la solubilidad y recuperación de los compuestos de interés. Asimismo, la reducción del tamaño de partícula incrementa el área superficial de contacto entre la matriz vegetal y el solvente, mejorando el rendimiento extractivo.

1.2.5.2. Ventajas y Desventajas de la extracción asistida por Ultrasonido

Entre las principales ventajas de la extracción asistida por ultrasonido destacan la reducción significativa del tiempo de extracción, menor consumo de solventes y energía, incremento del rendimiento extractivo y mejora de la transferencia de masa en comparación con técnicas convencionales. Además, esta técnica permite trabajar a temperaturas moderadas, disminuyendo la degradación térmica de compuestos sensibles al calor y favoreciendo la conservación de compuestos fenólicos, pigmentos y antioxidantes. Otra ventaja importante es su simplicidad operativa, facilidad de aplicación y potencial para ser considerada una tecnología de extracción más sostenible y amigable con el medio ambiente.

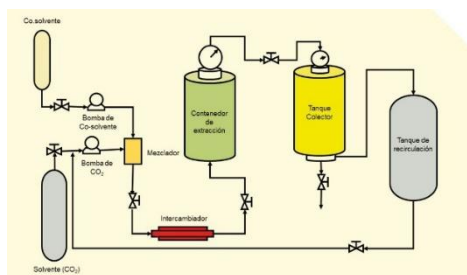
Sin embargo, la extracción asistida por ultrasonido presenta algunas limitaciones relacionadas con la posible degradación de compuestos bioactivos cuando se emplean potencias elevadas o tiempos prolongados de sonicación. Asimismo, la cavitación excesiva puede provocar oxidación de metabolitos y alteraciones estructurales en algunos compuestos sensibles. Otra desventaja corresponde al costo inicial de los equipos ultrasónicos y a las dificultades para escalar el proceso a nivel industrial en

determinadas aplicaciones. Además, la eficiencia del proceso depende considerablemente de las propiedades físicas del solvente y de la matriz vegetal utilizada. (Zhang, Zhao, Dai, & Li, 2023)

1.2.6. Extracción sólido-líquido con Fluidos Supercríticos

La extracción con fluidos supercríticos es un método avanzado de extracción se utiliza para la recuperación selectiva de compuestos bioactivos presentes mediante el empleo de sustancias en condiciones superiores a su temperatura y presión crítica, donde presentan propiedades intermedias entre un líquido y un gas. El fluido supercrítico más utilizado es el dióxido de carbono (CO_2) debido a su baja toxicidad, estabilidad química, fácil eliminación y reducido impacto ambiental. En estado supercrítico, el CO_2 posee elevada difusividad y baja viscosidad, lo que favorece una mayor penetración en la matriz sólida y mejora la transferencia de masa y la solubilización de compuestos como aceites esenciales, pigmentos, compuestos fenólicos y antioxidantes. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

Fig. I-6 Extracción solido-liquido con Fluidos Supercríticos



Fuente: Extracción Por Fluidos Supercríticos: Una Alternativa Verde, n.d.

1.2.6.1. Variables de control en la extracción con Fluidos Supercríticos

Las principales variables de control en la extracción con fluidos supercríticos son la presión, temperatura, flujo del fluido supercrítico, tiempo de extracción, tipo de co-solvente, tamaño de partícula de la muestra y relación sólido-solvente. La presión es una de las variables más importantes, debido a que influye directamente sobre la densidad del fluido supercrítico y, por tanto, sobre su capacidad de solubilización de los compuestos de interés. La temperatura afecta tanto la volatilidad de los solutos como la densidad del fluido, condicionando la selectividad y eficiencia del proceso. El

flujo del solvente y el tiempo de extracción determinan el grado de agotamiento de la matriz vegetal y la transferencia de masa, mientras que el tamaño de partícula influye sobre el área superficial disponible para el contacto entre el fluido y la muestra. Asimismo, el empleo de co-solventes como etanol permite incrementar la polaridad del sistema y mejorar la extracción de compuestos fenólicos y otros metabolitos polares.

1.2.6.2. Ventajas y Desventajas de la extracción con Fluidos Supercríticos

La extracción con fluidos supercríticos destaca en la obtención de extractos de alta pureza, ausencia de residuos tóxicos de solventes orgánicos y elevada selectividad en la recuperación de compuestos bioactivos. Además, el dióxido de carbono supercrítico presenta baja toxicidad, es no inflamable y puede eliminarse fácilmente del extracto por despresurización, permitiendo conservar la calidad y estabilidad de compuestos termosensibles debido al empleo de temperaturas moderadas. Otra ventaja importante es la reducción del impacto ambiental y la posibilidad de ajustar las condiciones operativas para obtener diferentes fracciones de compuestos específicos, lo que convierte a esta técnica en una alternativa eficiente y sostenible para la extracción de pigmentos, antioxidantes, aceites esenciales y metabolitos naturales.

Las limitaciones de esta extracción son el elevado costo de inversión y operación de los equipos, debido a la necesidad de trabajar a altas presiones y utilizar sistemas especializados de control y seguridad. Asimismo, el dióxido de carbono supercrítico presenta limitada capacidad para solubilizar compuestos altamente polares, por lo que frecuentemente se requiere el uso de co-solventes para mejorar la eficiencia extractiva. Otra desventaja importante corresponde a la complejidad operativa del proceso y a las dificultades de implementación en pequeñas escalas de producción. Además, el control inadecuado de presión y temperatura puede afectar la selectividad y estabilidad de los compuestos extraídos. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

1.2.7. Extracción por Prensado

La extracción por prensado es una técnica física utilizada para la obtención de compuestos líquidos presentes en materias primas vegetales mediante la aplicación de presión mecánica sobre la matriz sólida. Este método se basa en la compresión del

material para provocar la ruptura de estructuras celulares y facilitar la liberación de aceites, jugos, pigmentos y compuestos bioactivos sin necesidad de emplear altas temperaturas ni grandes cantidades de solventes. La eficiencia del proceso depende de variables como la presión aplicada, tiempo de prensado, contenido de humedad, temperatura y características físicas de la materia prima, factores que influyen directamente en el rendimiento y calidad del extracto obtenido.

Fig. I-7 Extracción por Prensado



Fuente: MUCIZA, 2026

1.2.7.1. Variables de control en la extracción por prensado

Las variables de control en la extracción por prensado son la presión aplicada, el tiempo de prensado, la temperatura de operación, el contenido de humedad de la materia prima, el tamaño de partícula y la velocidad de compresión. La presión influye directamente sobre la ruptura de las estructuras celulares y la liberación de compuestos líquidos presentes en la matriz vegetal, mientras que el tiempo de prensado determina el grado de recuperación del extracto y el agotamiento del sólido. La temperatura es un factor importante debido a que puede disminuir la viscosidad del extracto y mejorar el flujo del líquido liberado; sin embargo, temperaturas elevadas pueden ocasionar degradación de compuestos termosensibles. Asimismo, el contenido de humedad y el tamaño de

partícula condicionan la resistencia mecánica de la matriz vegetal y la eficiencia de liberación de compuestos bioactivos durante la compresión.

1.2.7.2. Ventajas y Desventajas de la extracción por prensado

La extracción por prensado destaca en su simplicidad operativa, bajo costo de implementación y reducción del uso de solventes químicos, lo que disminuye el impacto ambiental y facilita la obtención de extractos más seguros y libres de residuos tóxicos. Además, esta técnica permite trabajar a temperaturas moderadas o incluso en frío, favoreciendo la conservación de compuestos bioactivos, pigmentos y antioxidantes sensibles al calor. Otra ventaja importante es el bajo consumo energético y la facilidad de escalamiento para aplicaciones industriales, especialmente en la obtención de aceites vegetales, jugos y extractos naturales.

Las limitaciones están relacionadas con una menor eficiencia extractiva en comparación con métodos asistidos por solventes o tecnologías avanzadas, debido a que parte de los compuestos de interés puede permanecer retenida en la matriz sólida después del prensado. Asimismo, la aplicación de presiones elevadas puede generar oxidación o alteraciones fisicoquímicas en algunos compuestos sensibles.

1.2.8. Selección del método para la extracción del colorante natural

La selección del método de extracción es fundamental porque determina la eficiencia, pureza y estabilidad del colorante natural obtenido a partir de la cáscara de plátano verde. Elegir un método adecuado permite optimizar el rendimiento del pigmento, preservar sus propiedades fisicoquímicas y garantizar que el proceso sea reproducible, viable a nivel técnico y económico. Además, una correcta selección asegura que los compuestos responsables de la coloración no se degraden durante la extracción, lo que es esencial para evaluar su potencial aplicación en la industria alimentaria, cosmética o textil. Para la selección del método de extracción del colorante a partir de la cáscara de plátano verde se muestra el siguiente cuadro donde se tomaron en cuenta los diferentes factores que son importantes para llevar a cabo el proceso de extracción.

Tabla II-2 Selección del método para la extracción

Nº	Factores importantes para el proceso	Valoración por fracción	Método 1 Extractor Soxhlet		Método 2 Maceración		Método 3 Cocción		Método 4 Microondas		Método 5 Ultrasonido		Método 6 Fluidos Supercríticos		Método 7 Pensado	
			Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
1	Extracción del colorante	0,4	80	32	40	16	60	24	70	28	70	28	90	36	30	12
2	Tiempo de duración	0,1	60	6	40	4	50	5	70	7	60	6	80	8	60	6
3	Acceso al equipamiento necesario	0,3	100	15	100	30	70	21	10	3	10	3	10	3	100	30
4	Costos en general	0,2	50	10	90	18	40	8	10	2	20	4	10	2	40	8
Total				63		68		58		40		41		49		56

Fuente: Elaboración propia, 2026

Para el factor de la extracción de colorante se toma en cuenta la eficiencia de los diferentes métodos, los métodos que tienen una mayor eficiencia tienen un valor mayor y los que tienen una menor eficiencia tienen un valor menor.

Para el factor de tiempo de duración se toma en cuenta el tiempo en que se tarda la extracción del colorante en los diferentes métodos, los métodos que tienen un mayor tiempo de duración tienen un valor menor y los que tienen un menor tiempo de duración tienen un valor mayor.

Para el factor de acceso al equipamiento necesario se toma en cuenta si es que en los laboratorios de la carrera tenemos todos los equipos necesarios para realizar el método, los métodos a los cuales si se tienen acceso al equipamiento tienen un valor mayor y los que no se tiene acceso al equipamiento tienen un valor menor.

Para el factor de costos en general se toma en cuenta los costos de los disolventes y el costo del consumo energético de los diferentes métodos, los métodos que tienen un costo elevado tienen un valor menor y los que tienen un costo bajo tienen un valor mayor.

Al realizar los cálculos mediante la valorización por fracción obtenemos los totales para cada método, estos resultados obtenidos son en la escala de 1 al 100 y el método que tenga el valor mayor es el que vamos a utilizar para realizar el proceso de extracción.

El método que obtuvo el mayor puntaje total fue el método 2 que es la extracción sólido-líquido por maceración, por lo cual este el método que utilice para realizar la extracción de colorante natural a partir de la cáscara de plátano verde.

Al considerar simultáneamente los factores más importantes para el proceso de extracción, la maceración ofrece el mejor equilibrio entre eficiencia y viabilidad práctica. Este método destaca especialmente por su bajo costo, su fácil acceso al equipamiento, y por lograr un rendimiento adecuado sin necesidad de equipos complejos o costosos, lo cual lo convierte en la opción más conveniente y sostenible para la extracción del colorante a partir de la cáscara de plátano verde.

1.2.9. Selección del solvente para la extracción

La selección del solvente representa un factor fundamental en el proceso de extracción sólido-líquido, debido a que influye directamente sobre la eficiencia de recuperación, solubilidad y estabilidad de los compuestos bioactivos presentes en la cáscara de plátano verde. La afinidad química entre el solvente y los compuestos de interés determina la capacidad de disolución de pigmentos, flavonoides y compuestos fenólicos responsables de las propiedades colorantes del extracto. Asimismo, propiedades fisicoquímicas del solvente, como polaridad, viscosidad, volatilidad y capacidad de penetración en la matriz vegetal, afectan la transferencia de masa y el rendimiento del proceso extractivo. La adecuada selección del solvente también contribuye a minimizar la extracción de compuestos no deseados, preservar la estabilidad del extracto y optimizar variables operacionales como tiempo y temperatura de extracción. En investigaciones relacionadas con extractos naturales, el uso de solventes hidroalcohólicos como el etanol resulta ampliamente favorable debido a su elevada capacidad extractiva, menor toxicidad y compatibilidad con aplicaciones alimentarias, cosméticas y farmacéuticas. Por estas razones, la selección adecuada del solvente constituye un aspecto clave para garantizar la eficiencia, calidad y viabilidad del proceso de obtención del extracto natural.

Tabla I-3 Selección del solvente para la extracción

Nº	Factores importantes	Valoración por fracción	Metanol		Agua		Acetona		Etanol		Hexano	
			Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
1	Capacidad de extracción	0,25	90	22,5	70	17,5	85	21,25	95	23,75	35	8,75
2	Toxicidad	0,25	20	5	100	25	50	12,5	95	23,75	20	5
3	Facilidad de recuperación	0,2	90	18	60	12	95	19	85	17	80	16
4	Costo	0,08	65	5,2	100	8	70	5,6	85	6,8	15	1,2
5	Disponibilidad	0,07	50	3,5	100	7	60	4,2	100	7	20	1,4
6	Impacto ambiental	0,15	45	6,75	100	15	60	9	90	13,5	40	6
	Puntaje total	1		60,95		84,5		71,55		91,8		38,35

Fuente: Elaboración propia, 2026

Para el factor de capacidad de extracción se toma en cuenta la eficiencia de los solventes al extraer los pigmentos colorantes, los solventes que tienen mayor capacidad tienen un valor mayor y los que tienen menor capacidad tienen un valor menor.

Para el factor de toxicidad se toma en cuenta el daño a la salud que puede causar, los solventes que tienen menor toxicidad tienen un valor mayor y los que tienen mayor toxicidad tienen un valor menor.

Para el factor de la facilidad de recuperación se toma en cuenta la volatilidad y el requerimiento de energía, los solventes que tienen mayor facilidad de recuperación tienen un valor mayor y los que tienen una menor facilidad un valor menor.

Para el factor de costo se toma en cuenta el valor monetario al realizar la compra, los solventes que tienen bajo costo tienen un valor mayor y los que tienen alto costo tienen un valor menor.

Para el factor de disponibilidad se toma en cuenta el acceso para conseguir el solvente, los solventes que tienen mayor disponibilidad tienen un valor mayor y los que tienen menor disponibilidad tienen un valor menor.

Para el factor de impacto ambiental se toma en cuenta el daño que puede provocar al medio ambiente, los solventes que tienen menor impacto ambiental tienen un valor mayor y los que tienen mayor impacto ambiental tienen un valor menor.

1.3. Descripción de colorantes naturales

Un colorante natural es una sustancia con capacidad cromófora obtenida a partir de fuentes biológicas o minerales, utilizada para conferir color a diferentes productos mediante la absorción selectiva de determinadas longitudes de onda de la luz visible. Estos compuestos se encuentran principalmente en tejidos vegetales, animales y algunos minerales, y están constituidos por metabolitos bioactivos como carotenoides, antocianinas, clorofilas, flavonoides, betalainas y compuestos fenólicos, responsables de generar diversas tonalidades naturales. Los colorantes naturales son extraídos mediante procesos físicos, químicos o biotecnológicos que permiten recuperar los pigmentos presentes en la materia prima conservando sus propiedades funcionales. Debido a su origen natural, biodegradabilidad y menor impacto ambiental en comparación con los colorantes sintéticos, su aplicación ha incrementado en industrias como la alimentaria, cosmética, farmacéutica y textil, impulsada por la demanda de productos más sostenibles y seguros para el consumidor. (Amaya, 2019)

1.3.1. Factores que afectan la estabilidad de los colorantes naturales

La estabilidad de un colorante natural depende de diversos factores fisicoquímicos y ambientales que pueden provocar modificaciones en su estructura molecular y, en consecuencia, alteraciones en su coloración, intensidad y capacidad funcional. Entre los factores más importantes se encuentran el pH, la temperatura, la exposición a la luz, la presencia de oxígeno, la actividad de agua y la interacción con agentes metálicos o compuestos químicos presentes en el medio. El pH influye significativamente sobre la estabilidad de pigmentos como antocianinas y flavonoides, debido a que puede inducir cambios estructurales responsables de variaciones en la tonalidad del colorante. Asimismo, temperaturas elevadas y exposición prolongada a la luz favorecen procesos de degradación térmica, oxidación y fotodegradación de compuestos sensibles, reduciendo la estabilidad cromática del extracto. La presencia de oxígeno y metales de transición puede acelerar reacciones oxidativas que afectan compuestos fenólicos y carotenoides, mientras que la actividad de agua condiciona la velocidad de deterioro y crecimiento microbiano. Debido a ello, el control de las condiciones de

almacenamiento y procesamiento resulta fundamental para preservar la calidad, estabilidad y funcionalidad de los colorantes naturales en sus aplicaciones. (Amaya, 2019)

1.3.2. Contenido del extracto natural para uso de colorante natural

El extracto natural extraído de la cáscara de plátano verde es una sustancia de origen vegetal rica en compuestos fenólicos y pigmentos naturales que le otorgan color y propiedades bioactivas. Diversos estudios han identificado su potencial como colorante alimentario, cosmético o textil, especialmente por sus propiedades antioxidantes. A continuación, se detallarán los compuestos que se encuentran en un colorante natural.

1.3.2.1. Antocianinas

Las antocianinas son pigmentos hidrosolubles pertenecientes al grupo de los flavonoides, responsables de las tonalidades rojas, púrpuras y azules presentes en numerosas flores, frutos y tejidos vegetales. Químicamente son glucósidos de antocianidinas y su coloración depende del pH, temperatura y composición del medio. Además de su función como pigmentos naturales, presentan elevada actividad antioxidante y propiedades biológicas asociadas a efectos antiinflamatorios y protectores frente al estrés oxidativo. Debido a estas características, las antocianinas son ampliamente estudiadas para aplicaciones alimentarias, farmacéuticas y cosméticas como colorantes naturales y compuestos funcionales. (Khoo, Azlan, Tang, & Lim, 2017)

1.3.2.2. Flavonoides

Los flavonoides son metabolitos secundarios de origen vegetal pertenecientes al grupo de los compuestos fenólicos, caracterizados por poseer una estructura química basada en dos anillos aromáticos unidos por un heterociclo oxigenado. Estos compuestos participan en mecanismos de defensa vegetal y contribuyen a la coloración, protección frente a radiación ultravioleta y actividad antioxidante de los tejidos vegetales. Los flavonoides incluyen subgrupos como flavonas, flavonoles, catequinas y antocianinas,

y presentan propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas de interés para aplicaciones alimentarias y farmacéuticas. (Panche, Diwan, & Chandra, 2016)

1.3.2.3. Taninos

Los taninos son compuestos fenólicos de alto peso molecular presentes en diversas especies vegetales, caracterizados por su capacidad de formar complejos con proteínas, polisacáridos y minerales. Se clasifican principalmente en taninos hidrolizables y taninos condensados, dependiendo de su estructura química. Estos compuestos desempeñan funciones de defensa en las plantas frente a microorganismos y herbívoros, además de contribuir a propiedades antioxidantes y colorantes. Los taninos poseen importancia tecnológica en industrias alimentarias, farmacéuticas y textiles debido a su capacidad antioxidante, astringente y de fijación sobre fibras naturales. (Fraga-Corral, 2021)

1.3.2.4. Lignina

La lignina es un polímero fenólico complejo presente en las paredes celulares de plantas vasculares, formado principalmente por unidades derivadas de alcoholes fenilpropanoides. Su principal función es proporcionar rigidez estructural, resistencia mecánica e impermeabilidad a los tejidos vegetales. La lignina representa uno de los biopolímeros más abundantes en la naturaleza y posee propiedades antioxidantes y capacidad de absorción de radiación ultravioleta. Debido a su composición aromática y elevada estabilidad química, actualmente es estudiada para aplicaciones en materiales biodegradables, biocombustibles y productos con propiedades funcionales.

1.3.2.5. Carotenoides

Los carotenoides son pigmentos liposolubles de origen natural pertenecientes a la familia de los terpenoides, responsables de las tonalidades amarillas, anaranjadas y rojizas presentes en frutas, vegetales y algunos microorganismos. Químicamente están constituidos por cadenas de dobles enlaces conjugados que les confieren capacidad cromófora y actividad antioxidante. Se clasifican en carotenos y xantofilas según la presencia de oxígeno en su estructura molecular. Además de su función en la

fotosíntesis y protección frente a la fotooxidación en plantas, los carotenoides poseen importancia nutricional y funcional debido a su capacidad antioxidante y actividad provitamínica A. (Rodríguez-Concepcion, 2018)

1.3.3. Aplicaciones del extracto natural como colorante

Los colorantes naturales son una alternativa sostenible y funcional en diversas industrias, aprovechando compuestos como taninos, flavonoides y otros metabolitos secundarios. A continuación, se describirán las aplicaciones más comunes.

1.3.3.1. Industria Textil

Los colorantes naturales han adquirido un creciente interés en la industria textil debido a su origen renovable, biodegradabilidad y menor impacto ambiental en comparación con los colorantes sintéticos convencionales. Estos pigmentos, obtenidos principalmente de fuentes vegetales, son utilizados en el teñido de fibras naturales como algodón, lana, seda y lino, proporcionando tonalidades variadas mediante la interacción de compuestos fenólicos, flavonoides, taninos y carotenoides con las fibras textiles. La aplicación de colorantes naturales en procesos textiles contribuye a la reducción del uso de sustancias químicas tóxicas y a la disminución de efluentes contaminantes generados durante el teñido industrial, promoviendo tecnologías más sostenibles y compatibles con las exigencias ambientales actuales. Sin embargo, factores como la estabilidad del color, la fijación sobre las fibras y la resistencia al lavado continúan siendo aspectos relevantes de investigación para optimizar su aplicación industrial y ampliar su competitividad frente a los colorantes sintéticos. (Yusuf, Shabbir, & Mohammad, 2017)

1.3.3.2. Industria Alimentaria

Los colorantes naturales representan una alternativa de gran importancia en la industria alimentaria debido a la creciente demanda de productos más seguros, saludables y obtenidos a partir de fuentes naturales. Estos compuestos extraídos son utilizados para mejorar o restituir la apariencia visual de alimentos y bebidas, aportando tonalidades atractivas sin recurrir a colorantes sintéticos potencialmente asociados a efectos

adversos para la salud. Pigmentos como antocianinas, carotenoides, clorofilas y betalainas no solo cumplen una función cromática, sino que también aportan propiedades antioxidantes y bioactivas que pueden contribuir a la estabilidad y valor funcional de los productos alimenticios. Asimismo, el uso de colorantes naturales favorece el desarrollo de tecnologías alimentarias más sostenibles y alineadas con las tendencias actuales de consumo, enfocadas en ingredientes naturales y etiquetado limpio. Sin embargo, factores como la sensibilidad al pH, temperatura, luz y oxidación continúan siendo desafíos importantes para garantizar la estabilidad y permanencia del color durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos. (Amaya, 2019)

1.3.3.3. Industria Cosmética

Los colorantes naturales tienen aplicación en la industria cosmética debido al interés por desarrollar productos formulados con ingredientes de origen natural, biodegradables y con menor impacto sobre la salud y el medio ambiente. Estos pigmentos, obtenidos principalmente de extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos, carotenoides, antocianinas y clorofilas, son utilizados en productos como labiales, cremas, jabones, maquillaje, tintes capilares y productos para el cuidado de la piel, proporcionando coloración y, en muchos casos, propiedades funcionales adicionales como actividad antioxidante, antimicrobiana y fotoprotectora. La incorporación de colorantes naturales responde a la tendencia actual de la industria cosmética hacia formulaciones más seguras y sostenibles, reduciendo el uso de colorantes sintéticos asociados a posibles efectos irritantes o tóxicos. Asimismo, estos compuestos contribuyen a mejorar la aceptación de los productos por parte de consumidores que priorizan ingredientes naturales y procesos respetuosos con el medio ambiente. (Yusuf, Shabbir, & Mohammad, 2017)

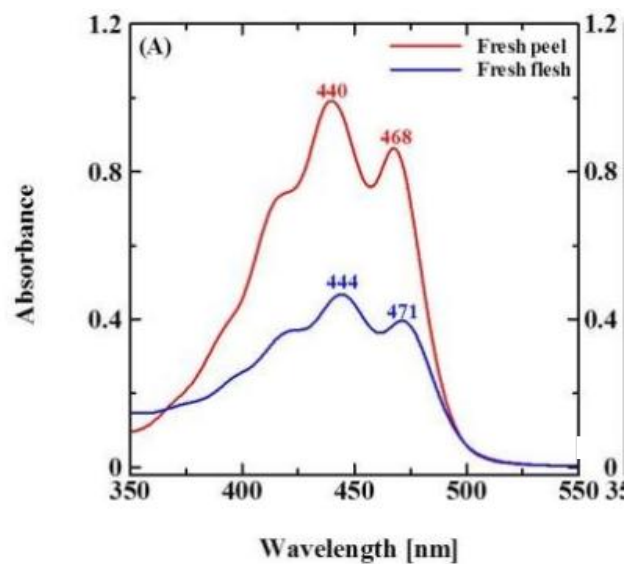
1.3.4. Absorbancia en un colorante natural

La absorbancia en un colorante natural es una medida de la cantidad de luz que el colorante puede absorber a una determinada longitud de onda cuando se analiza con un espectrofotómetro.

En el caso de un colorante natural obtenido de la cáscara de plátano, los compuestos responsables del color (carotenoides, flavonoides o compuestos fenólicos) absorben luz en ciertas longitudes de onda específicas. El espectrofotómetro mide la absorción y se expresa como un valor de absorbancia, que se utiliza para determinar la concentración del pigmento, evaluar la intensidad del color y analizar la estabilidad del colorante durante el proceso de extracción o almacenamiento. (Amaya, 2019)

La absorbancia permite cuantificar el colorante obtenido y comparar diferentes condiciones de extracción, ya que valores más altos de absorbancia generalmente indican mayor presencia de compuestos colorantes en el extracto.

Fig. I-8 Espectros de absorción de extractos de carne de pulpa fresca y cáscara fresca de plátano



Fuente: Research Gate, 2019

La línea roja de la figura I-8 representa la absorbancia del extracto de la cáscara fresca de plátano frente a diferentes longitudes de onda, los picos de 440 nm y 468 nm indican las longitudes de onda óptimas para la lectura de la absorbancia del extracto natural, ese rango determinado por bibliografía se utiliza al momento de verificar la concentración del extracto natural.

1.3.5. Diseño Factorial para el proceso de extracción

El diseño factorial 2^k representa una herramienta estadística adecuada para esta investigación debido a que permite evaluar simultáneamente el efecto de múltiples variables de proceso y sus interacciones sobre la obtención del extracto natural a partir de la cáscara de plátano verde. Este tipo de diseño experimental resulta especialmente eficiente cuando se busca analizar factores operacionales con dos niveles de estudio, como la concentración del solvente, la relación soluto-solvente y el tiempo de extracción, optimizando el número de experimentos requeridos y reduciendo costos, tiempo y consumo de materiales. Además, el diseño factorial 2^k facilita la identificación de los factores con mayor influencia sobre la variable respuesta y permite determinar interacciones dobles y triples entre variables, información fundamental para comprender el comportamiento del proceso de extracción sólido-líquido. Desde el punto de vista estadístico, este diseño proporciona modelos matemáticos con elevada capacidad predictiva y confiabilidad experimental, contribuyendo a la optimización de las condiciones de extracción y al análisis integral del sistema estudiado. Por estas razones, el diseño factorial 2^k es ampliamente utilizado en investigaciones de ingeniería y procesos químicos relacionados con optimización de extracciones y aprovechamiento de compuestos naturales. (Montgomery, 2022)

CAPÍTULO II
DESCRIPCIÓN DE LA PARTE
EXPERIMENTAL DEL
PROCEDIMIENTO

2.1. Metodología

A continuación, se lleva a cabo la explicación de las metodologías que se utilizan para el presente estudio de investigación sobre la obtención de colorante natural a partir de la cáscara de plátano verde, como consecuencia permite evaluar las distintas variables importantes del proceso, utilizar metodologías adecuadas permite validar todo el proceso de experimentación desde la recolección de la materia prima hasta la obtención del producto.

2.1.1. Metodología Experimental

La presente investigación se desarrolla bajo una metodología experimental con enfoque cuantitativo, debido a que contempla la manipulación controlada de variables operacionales con el propósito de evaluar su influencia sobre el proceso de extracción sólido-líquido del extracto natural obtenido a partir de la cáscara de plátano verde. Para ello, se analizan como variables independientes la concentración del solvente, la relación soluto-solvente y el tiempo de maceración, mientras que la variable dependiente corresponde al volumen final del extracto obtenido. Este enfoque permite establecer relaciones causa-efecto entre las variables del proceso mediante la obtención y análisis estadístico de datos cuantificables, favoreciendo la identificación de las condiciones óptimas de extracción y garantizando la reproducibilidad, confiabilidad y validez científica de los resultados experimentales. Asimismo, la metodología experimental facilita la optimización del proceso mediante la aplicación de diseños estadísticos que permiten evaluar tanto los efectos individuales como las interacciones entre los factores estudiados. (Hernández Sampieri & Collado, 2018)

2.1.2. Metodología Analítica

En la presente investigación, la metodología analítica se enfoca en la caracterización fisicoquímica, cualitativa y cuantitativa de la cáscara de plátano verde y del extracto obtenido mediante extracción sólido-líquido. Para ello, se aplican métodos y técnicas de laboratorio orientados a determinar propiedades físicas, químicas y funcionales de la cáscara de plátano y del extracto natural obtenido, incluyendo análisis de color,

absorbancia, pH, y evaluación microbiológica. El análisis cualitativo permite identificar la presencia de metabolitos y compuestos bioactivos responsables de la coloración y estabilidad del extracto, mientras que el análisis cuantitativo proporciona datos medibles relacionados con el rendimiento del proceso, concentración de compuestos y comportamiento del sistema experimental. La aplicación de esta metodología permite generar información científica confiable sobre las características y calidad del extracto obtenido, contribuyendo a evaluar su potencial aplicación como colorante natural y sustentando técnicamente la viabilidad del aprovechamiento de la cáscara de plátano verde como fuente de compuestos colorantes.

2.1.3. Metodología Documental

Se aplicó la metodología documental ya que se centra en la revisión, análisis y sistematización de información científica, técnica y académica relacionada con la extracción de colorantes naturales y específicamente el uso de la cáscara de plátano verde como materia prima. Esta metodología permitió fundamentar el marco teórico, formular los objetivos específicos y definir criterios técnicos para la experimentación y selección de materiales, métodos y parámetros de evaluación.

2.1.4. Justificación de la metodología

La utilización de las metodologías experimental, analítica y documental se justifica porque cada una aportó elementos esenciales para el desarrollo del presente estudio. La metodología experimental permitió manipular variables y establecer las condiciones óptimas de extracción del colorante mediante pruebas controladas. La metodología analítica fue necesaria para caracterizar la materia prima y el extracto obtenido, aportando datos fisicoquímicos que respaldan científicamente su calidad y viabilidad de uso. Finalmente, la metodología documental proporcionó el sustento teórico al estudio, permitiendo fundamentar el marco conceptual, definir los parámetros de trabajo y orientar adecuadamente el diseño experimental basándose en investigaciones previas. Cada metodología cumple un rol complementario y necesario para garantizar la validez científica, la solidez teórica y la confiabilidad de los resultados.

2.2. Pruebas preliminares

La realización de pruebas preliminares constituye una etapa fundamental dentro del desarrollo experimental de la presente investigación, debido a que permite obtener información técnica necesaria para establecer las condiciones operacionales adecuadas del proceso de extracción sólido-líquido. Estas pruebas iniciales se emplean para evaluar el comportamiento de la cáscara de plátano verde y del sistema de extracción bajo diferentes condiciones de operación, facilitando la determinación de parámetros requeridos en las distintas etapas del procedimiento experimental. Asimismo, permitieron identificar las variables independientes con mayor influencia sobre el proceso, tales como la concentración del solvente, la relación sólido-solvente y el tiempo de maceración, además de definir sus respectivos niveles de estudio para la aplicación del diseño experimental. La ejecución de estas pruebas contribuye a reducir incertidumbres experimentales, optimizar recursos y garantizar que las condiciones seleccionadas sean técnicamente viables y adecuadas para obtener resultados confiables, reproducibles y estadísticamente significativos.

2.2.1. Datos bibliográficos

Las principales variables de control en la extracción por maceración son la concentración del solvente, la relación soluto-solvente, el tiempo de extracción, la temperatura, la agitación y el tamaño de partícula de la muestra. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023)

A partir de estos datos bibliográficos expuestos en el anterior capítulo se empieza con las pruebas preliminares de la siguiente manera.

2.2.2. Datos de las pruebas preliminares

En la siguiente tabla se visualiza los datos experimentales obtenidos de las pruebas preliminares realizadas en el laboratorio de operaciones unitarias en Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Tabla II-1 Datos de las pruebas preliminares

Nº de Prueba	Concentración del etanol (%)	Relación soluto(g)-solvente(ml)	Tiempo de maceración (días)	Temperatura (°C)	Agitación	Tamaño de partícula
1	70	1:10	2	25	-	pequeño
2	70	1:10	4	25	-	pequeño
3	70	1:50	7	25	-	pequeño
4	70	1:5	2	25	-	pequeño
5	70	1:20	4	25	-	pequeño
6	70	1:40	5	25	-	pequeño
7	50	1:5	8	25	-	pequeño
8	50	1:10	7	25	-	pequeño
9	50	1:20	6	25	-	pequeño
10	80	1:10	5	25	-	pequeño
11	85	1:10	3	25	-	pequeño
12	85	1:20	3	25	-	pequeño

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Esos son los datos obtenidos de las pruebas preliminares que se realiza, se observa un cambio de datos en la concentración del etanol, relación soluto-solvente y el tiempo de maceración, pero no se ven cambios en la temperatura, agitación y tamaño de la partícula. Esas variables que no cambian tienen una justificación bibliográfica que se explica a continuación.

La temperatura no se considera como variable independiente en la presente investigación debido a que el proceso de extracción por maceración se desarrolla a temperatura ambiente con el propósito de minimizar la degradación térmica de los compuestos bioactivos y pigmentos presentes en la cáscara de plátano verde. Diversos compuestos fenólicos y sustancias responsables de la coloración natural presentan sensibilidad a temperaturas elevadas, pudiendo sufrir oxidación, degradación estructural o alteraciones en sus propiedades cromáticas y funcionales cuando son expuestos a calentamiento prolongado. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023). Desde el punto de vista económico y energético, la incorporación de la temperatura como variable de estudio implica la necesidad de utilizar sistemas de calentamiento eléctricos o a gas para mantener condiciones térmicas controladas durante todo el proceso, lo que incrementa el consumo energético, los costos operativos y la complejidad

experimental. Por esta razón, trabajar a temperatura ambiente representa una alternativa técnicamente viable, más económica y energéticamente eficiente para la obtención del extracto natural mediante maceración.

La agitación no se considera como variable independiente en la presente investigación debido a que el proceso de extracción por maceración se realizó bajo condiciones estáticas controladas, priorizando la simplicidad operativa y la reducción de variables que pudieran incrementar la complejidad experimental. Aunque la agitación puede favorecer la transferencia de masa y acelerar la difusión de compuestos desde la matriz vegetal hacia el solvente, diversos estudios reportan que en procesos de maceración prolongada su efecto puede ser menos significativo en comparación con variables como la concentración del solvente, la relación soluto-solvente y el tiempo de extracción, las cuales presentan una influencia más directa sobre el rendimiento extractivo. (Abdullah, Abhipriya, & Rama, 2022). Asimismo, la incorporación de sistemas de agitación constante implica un mayor consumo energético, uso de equipos adicionales y posibles variaciones mecánicas durante el proceso, lo que incrementa los costos operativos y la variabilidad experimental. Por esta razón, se opta que la agitación no sea un factor de estudio, permitiendo enfocar la investigación en las variables con mayor relevancia estadística y técnica para la optimización del proceso de extracción sólido-líquido.

El tamaño de partícula no se considerada como variable independiente en la presente investigación debido a que la cáscara de plátano verde fue previamente acondicionada mediante el secado y luego triturada utilizando un mortero, obteniéndose partículas de tamaño pequeño relativamente uniforme para todo el proceso experimental. Este acondicionamiento permitió incrementar el área superficial de contacto entre el sólido y el solvente, favoreciendo la transferencia de masa y la difusión de los compuestos bioactivos durante la extracción sólido-líquido. Debido a que se trabajó únicamente con partículas finas obtenidas después de la trituración, no fue necesario realizar un proceso de tamizado, ya que el objetivo experimental no contempla la evaluación de diferentes granulometrías. Aunque la reducción del tamaño de partícula puede influir en la eficiencia extractiva, diversos estudios indican que, una vez alcanzado un tamaño

adecuado que facilite la penetración del solvente, variables como la concentración del solvente, la relación soluto-solvente y el tiempo de extracción presentan una mayor influencia sobre el rendimiento del proceso. (Martín, Barbosa, & Advinha, 2023). Por esta razón, el tamaño de partícula se mantiene constante durante todas las pruebas preliminares, permitiendo reducir variaciones operacionales y enfocar el análisis experimental en las variables de mayor relevancia técnica y estadística.

Luego de la justificación respectiva de las variables que no cambian, se obtiene la siguiente tabla con las variables independientes en el proceso de extracción por maceración.

Tabla II-2 Tabla de variables independientes del proceso de extracción

Nº de Prueba	Concentración del etanol (%)	Relación soluto(g)-solvente(ml)	Tiempo de maceración (días)
1	70	1:10	2
2	70	1:10	4
3	70	1:50	7
4	70	1:5	2
5	70	1:20	4
6	70	1:40	5
7	50	1:5	8
8	50	1:10	7
9	50	1:20	6
10	80	1:10	5
11	85	1:10	3
12	85	1:20	3

Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.2.3. Selección de los niveles de las variables independientes

La selección de los niveles correspondientes a las variables independientes se realiza mediante pruebas preliminares orientadas a evaluar el comportamiento del extracto obtenido bajo diferentes condiciones de extracción sólido-líquido. Para ello, se determina la absorbancia de los extractos obtenidos en cada ensayo experimental, tanto

en estado inicial sin concentrar como después de la etapa de concentración, utilizando análisis espectrofotométrico como criterio de evaluación de la intensidad colorante y presencia de compuestos pigmentarios, esta medición se realiza con un espectrofotómetro. Estos resultados permitieron verificar si los extractos obtenidos se encontraban dentro o próximos al rango de longitudes de onda establecido previamente en el acápite 1.3.4. del capítulo I (rango 440nm-468nm), el cual fue definido como referencia técnica para garantizar una adecuada concentración de compuestos colorantes en el extracto final.

Tabla II-3 Resultados de absorbancia de los extractos obtenidos sin concentrar

Nº de Prueba	Absorbancia	Longitud de onda (nm)	Nº de Prueba	Absorbancia	Longitud de onda (nm)
1	1,245	500	7	2,301	500
	1,42	550		2	550
	0,939	600		1,426	600
2	1,172	500	8	2,243	500
	1,337	550		1,658	550
	1,097	600		1,082	600
3	0,038	500	9	1,284	500
	0,052	550		0,842	550
	0,015	600		0,739	600
4	1,834	500	10	1,152	500
	1,959	550		1,247	550
	1,745	600		0,984	600
5	0,682	500	11	1,395	500
	0,754	550		1,462	550
	0,654	600		1,237	600
6	0,045	500	12	1,453	500
	0,053	550		1,579	550
	0,036	600		1,395	600

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Con estos primeros resultados se puede observar que las pruebas 1, 2, 5, 10 son las más cercanas de absorbancia en la longitud de onda de 500nm, eso significa que se acercan al rango establecido de 468nm. No se coloca longitudes de ondas más bajas porque directamente el espectrofotómetro no muestra resultados y solo da un valor de absorbancia de 3, ese valor significa que la lectura es nula.

Tabla II-4 Resultados de absorbancia de los extractos obtenidos concentrados

Nº de Prueba	Absorbancia	Longitud de onda (nm)	Nº de Prueba	Absorbancia	Longitud de onda (nm)
1	0,845	460	7	2,285	460
	0,934	480		2,241	480
	1,146	500		2,162	500
2	0,863	460	8	2,483	460
	0,923	480		2,239	480
	1,158	500		2,157	500
3	0,016	460	9	1,481	460
	0,025	480		1,326	480
	0,031	500		1,284	500
4	1,549	460	10	0,852	460
	1,673	480		0,973	480
	1,725	500		1,027	500
5	0,736	460	11	1,345	460
	0,769	480		1,394	480
	0,827	500		1,437	500
6	0,026	460	12	1,497	460
	0,032	480		1,463	480
	0,038	500		1,376	500

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Con los resultados finales de la tabla II-4, se concluye que las pruebas más próximas a los rangos establecidos, son la prueba 1, la prueba 2, la prueba 5 y la prueba 10, en la siguiente tabla se muestran los datos de las pruebas mencionadas.

Tabla II-5 Pruebas preliminares con resultados positivos

Nº de Prueba	Concentración del etanol (%)	Relación soluto(g)-solvente(ml)	Tiempo de maceración (días)
1	70	1:10	2
2	70	1:10	4
5	70	1:20	4
10	80	1:10	5

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Mediante los datos de la tabla II-5, se obtiene los niveles máximos y mínimos de los variables independientes, los cuales se van a utilizar en la parte experimental para llevar a cabo la realización del diseño factorial. A continuación, se muestra la tabla con los

niveles correspondientes, que son el resultado de la realización de las 12 pruebas preliminares detalladas anteriormente.

Tabla II-6 Niveles de las variables independientes

Variables	Unidades	Niveles	
		Min	Max
A=Proporción soluto-solvente	(g)-(ml)	1:10	1:20
B=Concentración de etanol	%	70	80
C=Tiempo de maceración	día	2	5

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Con base en este análisis, se seleccionaron los niveles más adecuados de las variables independientes, permitiendo establecer condiciones experimentales técnicamente viables para posteriormente evaluar la variable dependiente correspondiente al volumen final obtenido de extracto natural concentrado. Este procedimiento contribuyó a optimizar el diseño experimental y asegurar la obtención de resultados reproducibles y científicamente sustentados.

2.2.4. Selección de la variable dependiente

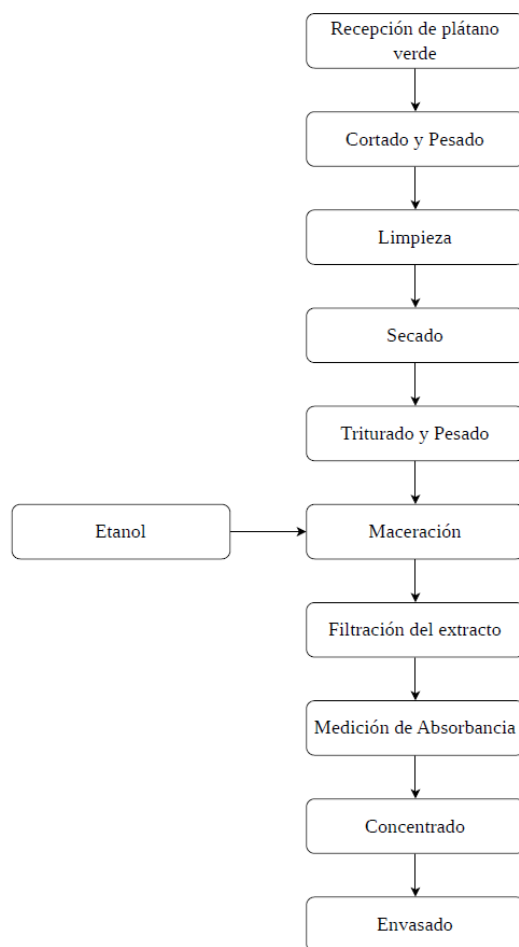
La selección del volumen final obtenido como variable dependiente se justifica desde un enfoque técnico–experimental, en concordancia con el objetivo general del estudio orientado a la obtención de un extracto natural con capacidad colorante funcional. Bajo esta premisa, el propósito no se centra en la cuantificación o aislamiento de un pigmento específico, sino en la obtención de un sistema extractivo multicomponente que preserve y concentre el conjunto de compuestos cromóforos responsables de la actividad colorante. En consecuencia, el volumen final del extracto concentrado constituye un parámetro integral de rendimiento del proceso, ya que refleja la eficiencia global de las etapas de extracción y concentración aplicadas, así como la capacidad del sistema para conservar la fracción soluble de interés tecnológico. Asimismo, la maximización del volumen útil de extracto, manteniendo su carga pigmentaria efectiva,

resulta fundamental para garantizar su disponibilidad como insumo funcional en posteriores aplicaciones, donde su desempeño depende de la sinergia de los compuestos presentes y no de un único pigmento aislado.

2.3. Descripción del procedimiento para la extracción del colorante natural

El proceso para la extracción del colorante natural se desarrolla en una serie de pasos que permiten transformar la materia prima, la cáscara de plátano verde en un producto final con un amplio potencial de uso en diferentes áreas industriales. A continuación se detalla cada uno de los pasos y operaciones unitarias que están involucradas en el proceso de extracción.

Diag. II-1 Diagrama de Extracción sólido-liquido por Maceración



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.1. Recepción del plátano verde

Se obtuvo el plátano verde del mercado campesino de la ciudad de Tarija, al momento de comprar se visualizó que los plátanos se encuentren en buen estado y no tengan detalles de putrefacción.

Fig. II-1 Plátanos de cáscara verde



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.2. Cortado y Pesado

Se realiza el cortado en láminas delgadas de la cáscara del plátano verde con un cuchillo común previamente esterilizado, con guantes de látex y barbijo, se realiza este corte porque incrementa del área superficial de contacto y favorece los fenómenos de transferencia de masa durante las etapas posteriores de secado y extracción sólido-líquido. La reducción del tamaño y espesor del material facilita la eliminación uniforme de humedad, disminuyendo el tiempo de secado y reduciendo el riesgo de degradación microbiológica y enzimática de los compuestos bioactivos presentes en la cáscara. (Abdullah, Abhipriya, & Rama, 2022). Luego se realiza el pesado de las láminas de cáscara obtenido en una balanza analítica.

Fig. II-2 Cortado de la cáscara de plátano verde



Fuente: Elaboración Propia, 2026

Fig. II-3 Pesado de la cáscara de plátano verde



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.3. Limpieza de la cáscara de plátano

Posteriormente se realiza el lavado de la cáscara con agua destilada, en todo momento utilizando guantes de látex en las manos para no contaminar la materia prima.

Fig. II-4 Limpieza de la cáscara de plátano verde



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.4. Secado

Luego del lavado se lo coloca en una malla de amianto y posteriormente en una estufa de secado a 50°C durante 14 horas para eliminar toda la humedad posible que tenga la cáscara de plátano verde. En este tipo de procesos, temperaturas moderadas (generalmente entre 40–60 °C) son recomendadas debido a que permiten una eliminación eficiente de la humedad sin promover una degradación significativa de compuestos termo-sensibles, como polifenoles, flavonoides y pigmentos naturales, los cuales son relevantes en la capacidad colorante del material vegetal. Asimismo, el tiempo de secado se ajusta en función de la matriz y del espesor del material, con el objetivo de alcanzar una humedad residual mínima que garantice estabilidad del extracto y una mejor eficiencia en la posterior etapa de extracción. (Dursun, Aksüt, Öcalan, & Taşova, 2023)

Fig. II-5 Secado de la cáscara de plátano verde



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.5. Triturado y pesado

Después del proceso de secado, la cáscara se colocó en un mortero y se trituro cuidadosamente hasta obtener fragmentos de tamaño pequeño y uniforme, posteriormente se lo pesa en una balanza analítica. En todo momento utilizando guantes de látex en las manos y barbijo para no contaminar la materia prima

Fig. II-6 Triturado de la cáscara de plátano verde



Fuente: Elaboración Propia, 2026

Fig. II-7 Pesado de la cáscara de plátano verde triturada



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.6. Maceración

Luego de pesar la cáscara seca y triturada en una balanza analítica, se realiza el cálculo del volumen del etanol, la proporción que se utiliza se rige en base a lo expuesto en las pruebas preliminares, posteriormente con una probeta de vidrio se va a colocar en la mezcla con la cáscara dentro de un frasco ámbar con cuidado para no tener pérdidas considerables. Luego se lo cierra herméticamente el frasco con su tapón y su tapa. Se

lo deja macerar durante un tiempo de 2 y 5 días, estos tiempos se obtiene mediante las pruebas preliminares que se realiza.

Fig. II-8 Preparación de la mezcla



Fuente: Elaboración Propia, 2026

Fig. II-9 Maceración



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.7. Filtración del extracto

Luego que pasa el tiempo determinado de 2 o 5 días macerando, se abre el frasco ámbar y el extracto obtenido se lo vierte en un embudo de vidrio que tiene papel filtro, el extracto obtenido luego de esa filtración se convierte en un extracto natural.

Fig. II-10 Filtración del extracto

Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.9. Medición de Absorbancia

Con el extracto natural líquido ya obtenido se realiza la medición de la absorbancia mediante un espectrofotómetro. Se coloca un volumen de 5ml de etanol en un frasco, luego en otro frasco se coloca 5ml del colorante obtenido, se introduce los dos frascos dentro del espectrofotómetro y se procede a la medición. Si es que da una absorbancia alta dentro o aproximado del rango de longitud de onda establecido mediante bibliografía (440nm-468nm), ese volumen obtenido es el final, pero si la medición de absorbancia no pertenece al rango establecido se debe realizar el concentrado.

Fig. II-11 Medición de Absorbancia

Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.10. Concentrado

Después de obtener el extracto natural colorante se realiza el concentrado solo si es necesario como se explica en el anterior paso, mediante el uso de un rotavapor a 45°C en donde se evapora una cierta cantidad de etanol lo cual hace que el colorante se concentre y se encuentre dentro de los parámetros establecidos, posteriormente se mide el volumen final con una probeta.

Fig. II-12 Concentrado



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.3.11. Envasado

Luego de obtener el extracto natural concentrado se lo envasa en un frasco ámbar previamente esterilizado, para su respectivo almacenamiento y posterior aplicación como colorante, siempre utilizando guantes de látex y barbijo para manejar los equipos y materiales.

Fig. II-13 Envasado



Fuente: Elaboración Propia, 2026

2.4. Variables del proceso experimental

Para la obtención del colorante natural las variables que tienen más influencia en el proceso es la concentración del solvente (etanol), proporción soluto-solvente y el tiempo de maceración. Estas variables son importantes para que el proceso sea eficiente por lo que se debe controlar de manera cuidadosa para obtener el colorante natural.

Estas variables están relacionadas entre sí, su control y ajuste deber ser escrupuloso para poder conseguir los mejores resultados. Es importante realizar un diseño experimental que permita explorar diferentes niveles de concentración del solvente, proporción de mezcla y tiempo de maceración, con el propósito de determinar las mejores condiciones para la obtención del extracto natural colorante con características deseadas. Las tres variables independientes que se menciona fueron seleccionadas en base a pruebas preliminares y referencias bibliográficas

2.4.1. Variable de concentración de etanol

La concentración de etanol es una variable clave en el proceso de maceración porque determina la capacidad del solvente para extraer los compuestos colorantes presentes en la cáscara de plátano verde. Diferentes concentraciones modifican la polaridad del solvente, lo que influye directamente en qué tan eficiente es la disolución de los pigmentos y otros compuestos bioactivos. Un etanol demasiado concentrado puede no hidratar adecuadamente la matriz vegetal, mientras que uno muy diluido puede disminuir la solubilidad del colorante. Por ello, ajustar esta variable permite optimizar el rendimiento de extracción, garantizar que los compuestos no se degraden y obtener un extracto con mejores características de color, estabilidad y calidad.

2.4.2. Variable de proporción soluto-solvente

La proporción entre la cantidad de cáscara de plátano y el volumen de etanol es una variable esencial en el proceso de maceración porque define la relación sólido-líquido, la cual influye directamente en la eficiencia de extracción. Una proporción adecuada garantiza que el solvente cubra completamente la materia prima y tenga la capacidad suficiente para disolver y transportar los compuestos colorantes. Si se utiliza demasiada

cáscara para poco volumen de solvente, la extracción será limitada por saturación; por el contrario, un exceso de solvente puede diluir innecesariamente el extracto, reduciendo su concentración efectiva. Por ello, elegir la proporción correcta permite maximizar el rendimiento, mejorar la transferencia de masa y asegurar la calidad y uniformidad del colorante obtenido.

2.4.3. Variable de tiempo de maceración

El tiempo de maceración es una variable fundamental porque determina cuánto tiempo permanece la cáscara en contacto con el solvente, lo que influye directamente en la cantidad de compuestos colorantes que pueden ser liberados y disueltos. Un tiempo insuficiente puede resultar en una extracción incompleta, ya que los pigmentos no alcanzan a difundirse totalmente hacia el solvente. Por otro lado, un tiempo excesivo no siempre mejora el rendimiento y puede incluso degradar ciertos compuestos sensibles, afectando el color y la calidad del extracto. Por ello, controlar esta variable permite optimizar la eficiencia de extracción, asegurar la estabilidad del colorante y obtener un producto con características reproducibles y adecuadas para su uso.

2.4.4. Variable respuesta: Volumen final

La variable respuesta es el volumen final obtenido concentrado, es decir, que ese volumen este dentro de los rangos establecidos en la medición de la absorbancia. La justificación de la elección de esta variable se encuentra en la selección de la variable dependiente en el acápite 2.2.4. del presente capítulo.

2.5. Diseño experimental

Un diseño experimental es un plan estructurado que se utiliza para manipular intencionadamente una o más variables independientes y observar su efecto en una o más variables dependientes, bajo condiciones controladas. Su objetivo principal es establecer relaciones de causa y efecto entre variables.

El diseño experimental es fundamental porque permite organizar, planificar y ejecutar los experimentos de manera controlada y lógica, garantizando que los resultados obtenidos sean confiables, válidos y comparables. A través del diseño experimental se

pueden identificar y manipular las variables clave del proceso, evaluar su influencia sobre la respuesta, minimizar errores y riesgos, y asegurar que las conclusiones se basen en evidencia objetiva. Además, este enfoque facilita la optimización de procesos, la reproducibilidad de los resultados y la justificación científica de las decisiones tomadas durante la investigación. En resumen, un buen diseño experimental fortalece la calidad metodológica del estudio y respalda su aplicación práctica.

El diseño experimental del presente estudio se realizó en el proceso de maceración donde sucede la extracción sólido-líquido del colorante natural para obtener el mayor volumen de colorante natural con las características deseadas.

2.5.1. Diseño factorial

Un diseño factorial es un tipo de diseño experimental utilizado para estudiar los efectos de dos o más factores (variables independientes) sobre una o más variables dependientes (variable respuesta). Su característica principal es que se analizan todos los posibles niveles de cada factor en combinación con todos los niveles de los otros factores.

El diseño factorial que se utilizará en el presente estudio es el diseño 2^k , en este diseño la letra “k” es el número de variables que influyen en el proceso, el número “2” es el número de niveles por cada factor, y el resultado “ 2^k ” es el número total de experimentos o combinaciones.

$$\text{Diseño factorial} = 2^k$$

$$\text{N}^\circ \text{ variables} = 3$$

$$\text{Subniveles} = 2$$

$$\text{N}^\circ \text{ experiencias} = 2^3 = 8$$

$$\text{N}^\circ \text{ replicas} = 2$$

$$\text{N}^\circ \text{ experimentos} = 2^3 \times 2 = 16 \quad (\text{Ecuación II-1})$$

Esto implica que se ejecutaron 8 experiencias, cada una con su respectiva replica, lo que resultó en un total de 16 experimentos realizados.

Las variables dependientes son:

- Proporción soluto-solvente (A) = cáscara (g)-etanol(ml)
- Concentración de etanol (B)
- Tiempo de maceración (C)

La variable respuesta es:

- Volumen final (V)

Tabla II-7 Variables y niveles

Variables	Unidades	Niveles	
		Min	Max
A=Proporción soluto-solvente	(g)-(ml)	1:10	1:20
B=Concentración de etanol	%	70	80
C=Tiempo de maceración	días	2	5

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Tabla II-8 Codificación de variables

Variables	Niveles	
	Min	Max
Concentración de etanol	-1	+1
Proporción soluto-solvente	-1	+1
Tiempo de maceración	-1	+1

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Como se puede observar en la tabla II-8 el valor mínimo de cada variable está representada por “-1” y el valor máximo de cada variable está representada por “+1”.

La siguiente tabla muestra la matriz de diseño para los 8 experimentos con su réplica.

Tabla II-9 Matriz de diseño

N° Corrida	A	B	C	V	
1	-1	-1	-1	V1	Replica 1
2	+1	-1	-1	V2	
3	-1	+1	-1	V3	
4	+1	+1	-1	V4	
5	-1	-1	+1	V5	
6	+1	-1	+1	V6	
7	-1	+1	+1	V7	
8	+1	+1	+1	V8	
9	-1	-1	-1	V9	Replica 2
10	+1	-1	-1	V10	
11	-1	+1	-1	V11	
12	+1	+1	-1	V12	
13	-1	-1	+1	V13	
14	+1	-1	+1	V14	
15	-1	+1	+1	V15	
16	+1	+1	+1	V16	

Fuente: Elaboración Propia, 2026

En la tabla II-9 se puede observar el número de corridas, con todas las combinaciones en orden de las 3 variables, según sus respectivos niveles mínimos y máximos ya codificados en la tabla II-8, teniendo como variable respuesta el volumen final en los 8 experimentos con su réplica.

La siguiente tabla muestra el plan de experimentación para los 8 experimentos con su réplica.

Tabla II-10 Plan de experimentación

Nº Corrida	Proporción soluto-solvente	Concentración del etanol (%)	Tiempo de maceración (días)	Volumen final (ml)	
1	1:10	70	2	V1	Replica 1
2	1:20	70	2	V2	
3	1:10	80	2	V3	
4	1:20	80	2	V4	
5	1:10	70	5	V5	
6	1:20	70	5	V6	
7	1:10	80	5	V7	
8	1:20	80	5	V8	
9	1:10	70	2	V9	Replica 2
10	1:20	70	2	V10	
11	1:10	80	2	V11	
12	1:20	80	2	V12	
13	1:10	70	5	V13	
14	1:20	70	5	V14	
15	1:10	80	5	V15	
16	1:20	80	5	V16	

Fuente: Elaboración Propia, 2026

En la tabla II-10 se puede observar el número de corridas, con todas las combinaciones en orden de las 3 variables con sus respectivos nombres, según sus niveles mínimos y máximos, pero con los datos que están en la tabla II-7, teniendo como variable respuesta el volumen final en los 8 experimentos con su réplica.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS

RESULTADOS

3.1. Introducción al análisis y discusión de resultados

El presente capítulo tiene como propósito interpretar y evaluar los resultados obtenidos durante la parte experimental del estudio, relacionándolos con los objetivos planteados y con la teoría previamente revisada. El análisis permite identificar variaciones y tendencias de las variables estudiadas, así como determinar la efectividad del método utilizado para la extracción del colorante natural. Asimismo, la discusión contrasta los hallazgos con investigaciones previas, permitiendo validar, explicar o cuestionar los resultados obtenidos. De este modo, esta sección constituye un espacio fundamental para comprender el alcance real del estudio, justificar científicamente los resultados y establecer las bases para futuras aplicaciones o investigaciones relacionadas.

3.2. Presentación de los resultados de la caracterización de la materia prima

El análisis de la materia prima para el desarrollo experimental del presente trabajo se realizó en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija - Bolivia. En la tabla III-1 se muestra los resultados obtenidos, (ver Anexo 1)

Tabla III-1 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de la cáscara de plátano verde

Parámetro	Técnica y/o Método de Ensayo	Unidad	Resultado
Acidez titulable (como ácido málico)	NB 36002:02	g/100 g	0,11
Ceniza	NB 33042:23	g/100 g	1,35
Fibra	NB 35004:14 (MOD)	g/100 g	1,12
Grasa	NB 313019:06 (MOD)	g/100 g	0,62
Hidratos de carbono	NB 312031:10	g/100 g	6,07
Humedad	NB 313010:05 (MOD)	g/100 g	90,63
Proteína total (Nx6,25)	NB/ISO 8968-1:22 (MOD)	g/100 g	7,33
pH (20°C)	NB 338006:09	-	4,8
Bacterias aerobias mesófilas	NB 32003:05	UFC/g	1,2 x 10³
Coliformes fecales	NB 32005:02	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)
Coliformes totales	NB 32005:02	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)
Escherichia coli	NB 32005:03	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)
Mohos y levaduras	NB 32006:03	UFC/g	6,3 x 10²
Salmonella	NB/ISO 6579:08	P/A en 25 g	Ausencia
Staphylococcus	NB 32004:02	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)

Fuente: CEANID, 2025

La cáscara de plátano verde presentó un alto contenido de humedad (90,63%), característica típica de matrices vegetales frescas que favorece la preservación de compuestos fenólicos responsables del color, aunque exige un secado previo para evitar deterioro. El pH ligeramente ácido (4,8) y la baja acidez titulable generan un medio favorable para la estabilidad de los pigmentos durante la extracción, mientras que los valores obtenidos de carbohidratos (6,07 g/100 g), fibra (1,12 g/100 g) y ceniza (1,35 g/100 g) indican una matriz estructural adecuada para la liberación del colorante sin interferencias significativas. A nivel microbiológico, la materia prima mostró baja carga microbiana, destacando la presencia reducida de coliformes, *Escherichia. coli* y

Staphylococcus, además de la ausencia de Salmonella, lo que confirma que la cáscara es segura e inocua para su procesamiento. En conjunto, estos parámetros demuestran que la cáscara de plátano verde posee condiciones fisicoquímicas y microbiológicas favorables para la obtención de un colorante natural estable y apto para su uso.

3.3. Presentación de los resultados del producto obtenido

3.3.1. Resultados obtenidos con el diseño factorial

3.3.1.1. Variable respuesta Volumen final

En la tabla III-2, se muestran los datos introducidos al programa Minitab de acuerdo al diseño factorial planteado para el volumen final como variable respuesta, cada variable independiente tiene un nivel máximo y un nivel mínimo.

Tabla III-2 Datos para el diseño factorial

N° Corrida	Variables independientes			Variable dependiente
	Proporción soluto-solvente	Concentración del etanol (%)	Tiempo de maceración (día)	Volumen final (mL)
1	1:10	70	2	13,5
2	1:20	70	2	15
3	1:10	80	2	13,7
4	1:20	80	2	14,5
5	1:10	70	5	14,6
6	1:20	70	5	15,2
7	1:10	80	5	14,6
8	1:20	80	5	13,6
9	1:10	70	2	13,3
10	1:20	70	2	15,1
11	1:10	80	2	13,8
12	1:20	80	2	14,4
13	1:10	70	5	14,5
14	1:20	70	5	15,4
15	1:10	80	5	14,7
16	1:20	80	5	13,5

Fuente: Elaboración Propia, 2026

A continuación, en la tabla III-3, se presenta el resumen del diseño factorial.

Tabla III-3 Resumen del diseño factorial

Resumen del diseño			
Factores:	3	Diseño de la base:	3; 8
Corridas:	16	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Fuente: Minitab, 2026

3.3.1.2. Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla III-4 Coeficientes codificados variable respuesta Volumen final

Coeficientes codificados						
Término	Efecto	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		14,3375	0,0234	613,1	0	
Proporción soluto-solvente	0,5	0,25	0,0234	10,69	0	1
Concentración del etanol	-0,475	-0,2375	0,0234	-10,16	0	1
Tiempo de maceración	0,35	0,175	0,0234	7,48	0	1
Proporción soluto-solvente*Concentración del etanol	-0,7	-0,35	0,0234	-14,97	0	1
Proporción soluto-solvente*Tiempo de maceración	-0,675	-0,3375	0,0234	-14,43	0	1
Concentración del etanol*Tiempo de maceración	-0,35	-0,175	0,0234	-7,48	0	1
Proporción soluto-solvente*Concentración del etanol*Tiempo de maceración	-0,225	-0,1125	0,0234	-4,81	0,001	1

Fuente: Minitab, 2026

La tabla III-4, muestra que las tres variables principales del proceso influyen significativamente en el volumen final del extracto, ya que todas presentan valores p iguales a 0, indicando un efecto estadísticamente significativo. La proporción soluto-solvente tiene un efecto positivo (coef. 0,25), lo que implica que un mayor contenido de soluto incrementa el volumen obtenido. En contraste, la concentración del etanol presenta un efecto negativo (coef. -0,2375), evidenciando que concentraciones más altas reducen el volumen final, posiblemente por mayor capacidad de solubilización y

evaporación del solvente. El tiempo de maceración muestra un efecto positivo moderado (coef. 0,175), indicando que tiempos mayores favorecen el rendimiento. Además, las interacciones entre factores también resultan significativas, destacándose las interacciones proporción*etanol (coef. $-0,35$) y proporción*tiempo ($-0,3375$), que muestran que la combinación de niveles extremos puede disminuir el volumen final. Finalmente, la interacción triple presenta un coeficiente negativo ($-0,1125$), lo que sugiere que la combinación simultánea de altos niveles de los tres factores reduce aún más el volumen.

En conjunto, el modelo evidencia que el proceso está fuertemente influenciado tanto por los efectos principales como por las interacciones, permitiendo identificar combinaciones óptimas para maximizar el volumen final del colorante.

3.3.1.3 Resumen del modelo

Tabla III-5 Resumen del modelo

Resumen del modelo			
S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)
0,0935414	98,99%	98,11%	95,96%

Fuente: Minitab, 2026

El resumen del modelo muestra que el ajuste obtenido para la variable respuesta volumen final es altamente satisfactorio, con un R-cuadrado de 98,99%, lo que indica que casi la totalidad de la variabilidad observada en el volumen puede explicarse por los factores estudiados y sus interacciones. El R-cuadrado ajustado (98,11%) confirma que el modelo se mantiene sólido incluso al considerar el número de términos incluidos, evidenciando que no existe sobreajuste y que cada factor aporta información relevante. Por su parte, el R-cuadrado predicho (95,96%) demuestra que el modelo tiene un excelente poder predictivo, es decir, puede estimar con alta precisión valores futuros o no incluidos en el ajuste original. Finalmente, el valor de $S = 0,0935$ refleja una desviación estándar residual muy baja, lo que indica que los errores entre los valores observados y los valores predichos son mínimos. En conjunto, estos indicadores

confirman que el modelo es estadísticamente robusto, preciso y adecuado para describir y predecir el volumen final en el proceso de obtención del colorante.

3.3.1.4. Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla III-6 Análisis de varianza (ANOVA)

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	6,8675	0,98107	112,12	0
Lineal	3	2,3925	0,7975	91,14	0
Proporción soluto-solvente	1	1	1	114,29	0
Concentración del etanol	1	0,9025	0,9025	103,14	0
Tiempo de maceración	1	0,49	0,49	56	0
Interacciones de 2 términos	3	4,2725	1,42417	162,76	0
Proporción soluto-solvente*Concentración del etanol	1	1,96	1,96	224	0
Proporción soluto-solvente*Tiempo de maceración	1	1,8225	1,8225	208,29	0
Concentración del etanol*Tiempo de maceración	1	0,49	0,49	56	0
Interacciones de 3 términos	1	0,2025	0,2025	23,14	0,001
Proporción soluto-solvente*Concentración del etanol*Tiempo de maceración	1	0,2025	0,2025	23,14	0,001
Error	8	0,07	0,00875		
Total	15	6,9375			

Fuente: Minitab, 2026

El análisis demuestra que el modelo es altamente significativo ($p = 0.000$), indicando que las variables estudiadas explican de manera efectiva la variación en la respuesta obtenida del extracto. Siendo la proporción soluto-solvente el factor con mayor influencia individual sobre el volumen final. Asimismo, las interacciones de dos términos muestran una contribución altamente significativa ($p = 0.000$), especialmente la interacción proporción soluto-solvente*concentración del etanol, que presenta el valor F más elevado, evidenciando que el comportamiento del extracto depende

fuertemente de la combinación de ambos factores. La interacción proporción soluto-solvente*tiempo de maceración también es significativa, mientras que la interacción entre concentración del etanol*tiempo de maceración muestra un efecto menor pero igualmente significativo. Finalmente, la interacción de tres factores resulta significativa ($p = 0.001$), aunque con menor magnitud, lo que sugiere que el efecto conjunto de las tres variables también influye, pero en menor proporción que las interacciones dobles. El bajo valor del error experimental confirma la confiabilidad del modelo y la buena precisión de los datos.

3.3.1.5. Ecuación de regresión lineal

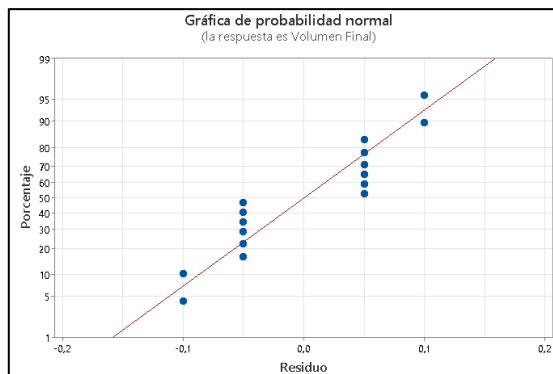
La ecuación de regresión lineal para la variable respuesta volumen final es:

Volumen Final = 14,3375 + 0,2500 Proporción soluto-solvente - 0,2375 Concentración del etanol + 0,1750 Tiempo de maceración - 0,3500 Proporción soluto-solvente*Concentración del etanol - 0,3375 Proporción soluto-solvente*Tiempo de maceración - 0,1750 Concentración del etanol*Tiempo de maceración - 0,1125 Proporción soluto-solvente*Concentración del etanol*Tiempo de maceración

Esta ecuación permite predecir el volumen final del colorante natural en función de los niveles de proporción soluto-solvente, concentración del etanol y tiempo de maceración, de manera que se convierte en una herramienta de alto valor para la optimización y control del proceso de extracción.

3.3.1.6. Grafica de probabilidad normal

Diag. III-1 Grafica de probabilidad normal



Fuente: Minitab, 2026

La gráfica de probabilidad normal permite evaluar si los residuos del modelo siguen una distribución aproximadamente normal, lo cual es uno de los supuestos fundamentales del análisis ANOVA. En la figura se observa que la mayoría de los puntos se alinean de manera cercana a la línea de referencia, con desviaciones mínimas en los extremos, lo que indica que los residuos no presentan patrones anómalos y se distribuyen de forma aceptablemente normal. Esta alineación confirma que el modelo ajustado cumple con el supuesto de normalidad, por lo que los resultados del análisis estadístico son confiables y las conclusiones obtenidas a partir de los valores F y p del ANOVA mantienen su validez.

3.1.1.7. Comparación entre el volumen final observado y el volumen final del modelo

Tabla III-7 Comparación entre el Volumen final observado y el Volumen final del modelo

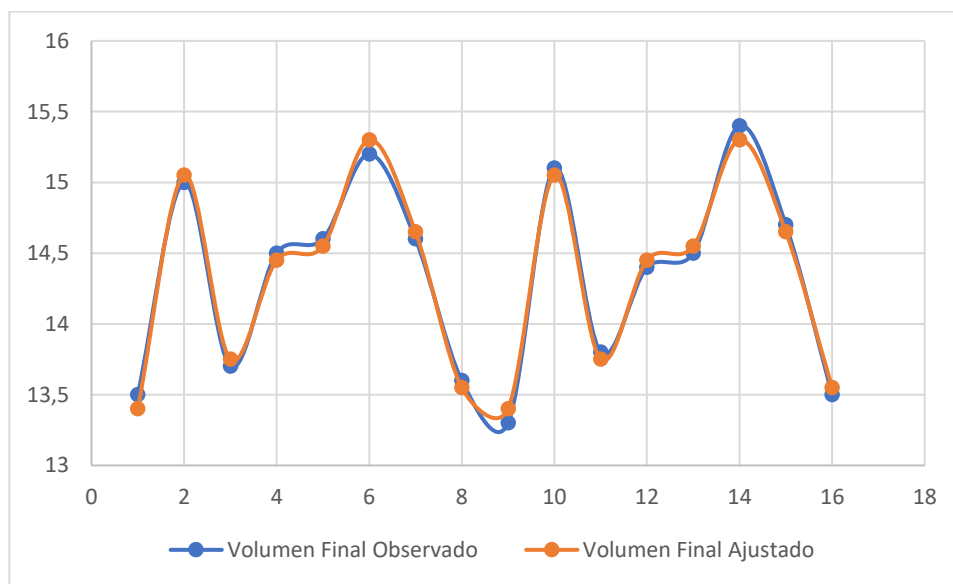
Nº Corrida	Volumen Final Observado	Volumen Final Ajustado	Residuo
1	13,5	13,4	0,1
2	15	15,05	-0,05
3	13,7	13,75	-0,05
4	14,5	14,45	0,05
5	14,6	14,55	0,05
6	15,2	15,3	-0,1
7	14,6	14,65	-0,05
8	13,6	13,55	0,05
9	13,3	13,4	-0,1
10	15,1	15,05	0,05
11	13,8	13,75	0,05
12	14,4	14,45	-0,05
13	14,5	14,55	-0,05
14	15,4	15,3	0,1
15	14,7	14,65	0,05
16	13,5	13,55	-0,05

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Al comparar los valores observados con los valores ajustados por el modelo, se evidencia que el error es mínimo ($\pm 0,1$ mL), lo que confirma que el modelo matemático predice adecuadamente el comportamiento del sistema. Para seleccionar la mejor condición experimental se tomó como referencia el valor ajustado, debido a que este representa la estimación más precisa del modelo. En este sentido, la condición óptima corresponde a la corrida N° 14 que presenta el mayor valor de volumen final (15,4 mL), lo cual indica que esta combinación de proporción, concentración del etanol y tiempo de maceración permite maximizar la obtención del extracto.

En esa corrida se utilizó la proporción soluto-solvente 1:20, la concentración de etanol al 70%, y el tiempo de maceración de 5 días, estos niveles de las variables independientes demuestran que dan el mayor volumen final obtenido de colorante natural mediante la extracción sólido-líquido por maceración.

Diag. III-2 Comparación entre el volumen final observado y el volumen final del modelo



Fuente: Elaboración Propia, 2026

3.3.2. Resultados de la caracterización del extracto natural obtenido

El análisis de la materia prima para el desarrollo experimental del presente trabajo se realizó en el Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) de la

Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, Tarija - Bolivia. En la tabla III-8 se muestra los resultados obtenidos, (ver Anexo 2)

Tabla III-8 Análisis fisicoquímicos y microbiológicos del extracto natural obtenido

Parámetro	Técnica y/o Método de Ensayo	Unidad	Resultado
Color	Sensorial		Marrón oscuro
Olor	Sensorial		Característico del producto, libre de olores extraños
Densidad relativa (20°C)	NB 33040:22	-	0.9523
Humedad	NB 367:98 (MOD)	g/100 g	97,97
pH (20°C)	NB 3318005:02 (MOD)	-	5,8
Sólidos insolubles	NB 38029:14	g/100 g	0,13
Sólidos Solubles (20°C)	NB 36003:2 (MOD)	°Brix	15.5
Bacterias aerobias mesófilas	NB 32003:05	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)
Coliformes totales	NB 32005:02	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)
Escherichia coli	NB 32005:03	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)
Mohos y levaduras	NB 32006:03	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)
Salmonella	NB/ISO 6579:08	P/A en 25 g	Ausencia
Staphylococcus aureus coagulasa positiva	NB 32004:02	UFC/g	< 1,0 x 10¹ (*)

Fuente: CEANID, 2026

El colorante natural obtenido presentó características fisicoquímicas y microbiológicas adecuadas para su uso potencial como ingrediente colorante en productos alimentarios o agroindustriales. El extracto mostró un color marrón oscuro y un olor característico del producto, libre de olores extraños, lo que indica que durante el proceso de extracción y concentración no se generaron compuestos de degradación que alteren sus propiedades organolépticas. En cuanto a sus propiedades fisicoquímicas, la densidad

relativa de 0,9523 a 20 °C evidencia que el extracto conserva características similares a las del solvente utilizado, lo cual es consistente con la presencia de etanol y compuestos solubles extraídos de la cáscara de plátano. Asimismo, el pH de 5,8 indica un medio ligeramente ácido, condición favorable para la estabilidad de compuestos fenólicos responsables del color. El contenido de sólidos solubles de 15,5 °Brix confirma la presencia de compuestos extraídos y refleja el grado de concentración del colorante, mientras que el bajo contenido de sólidos insolubles (0,13 g/100 g) sugiere que el extracto presenta buena claridad y estabilidad física, lo cual es importante para su aplicación en formulaciones líquidas.

En los análisis microbiológicos, los resultados muestran una muy baja carga microbiana, con valores inferiores al límite de detección ($<1,0 \times 10^1$ UFC/g) para bacterias aerobias mesófilas, coliformes totales, *Escherichia coli*, mohos, levaduras y *Staphylococcus aureus*, además de la ausencia de *Salmonella* en 25 g de muestra. Estos resultados indican que el proceso de obtención del colorante fue higiénicamente adecuado y que el producto presenta condiciones de inocuidad microbiológica que permiten su manejo seguro. La baja actividad microbiana también se atribuya a la presencia de etanol y al pH ligeramente ácido, factores que contribuyen a inhibir el crecimiento de microorganismos.

3.4. Pruebas cualitativas al extracto natural colorante

Se realiza pruebas cualitativas al colorante natural para validar y evidenciar que el producto final obtenido es un colorante natural y contiene pigmentos.

3.4.1. Prueba con cloruro férrico (FeCl_3) y ácido clorhídrico (HCl)

La prueba con cloruro férrico se realiza para la identificación de compuestos fenólicos, especialmente taninos, que son muy abundantes en la cáscara de plátano verde. Por consecuente estará presente en el colorante natural obtenido. El ion férrico (Fe^{3+}) reacciona con los grupos hidroxilo de los fenoles para formar complejos de coordinación coloreados.

La prueba con ácido clorhídrico se emplea para determinar la presencia de antocianinas (tipo de flavonoides). Las antocianinas cambian de color según el pH debido a la formación del catión flavilio en medios ácidos.

Materiales:

- 6 tubos de ensayo
- 2 pipetas de 10ml
- Propipeta
- Gradilla para tubos de ensayo
- Guantes de látex
- Barbijo

Reactivos:

- Cloruro férrico (FeCl_3) 0,05M
- Ácido clorhídrico (HCl) 0,1M
- Extracto natural concentrado
- Extracto natural sin concentrar
- Etanol 70°

Fig. III- 1 Materiales y reactivos para las pruebas cualitativas

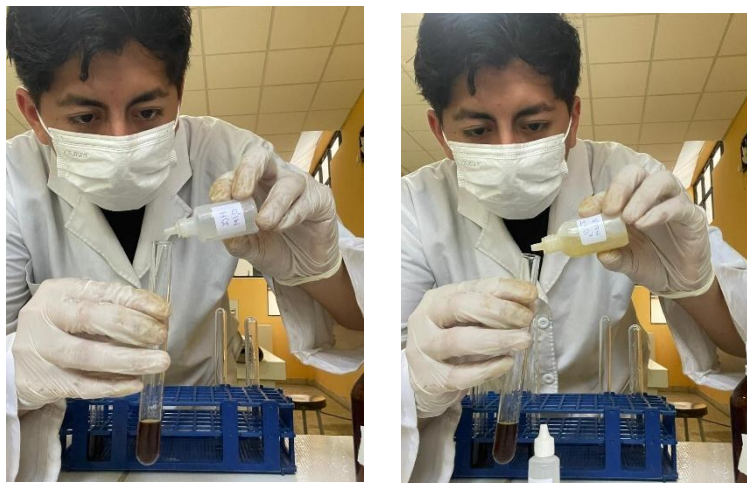


Fuente: Elaboración Propia, 2026

Procedimiento

Se coloca 2ml de etanol, colorante natural concentrado y colorante natural sin concentrar de manera individual en los tubos de ensayo utilizando las pipetas con la propipeta insertada en la parte superior para no contaminar los reactivos.

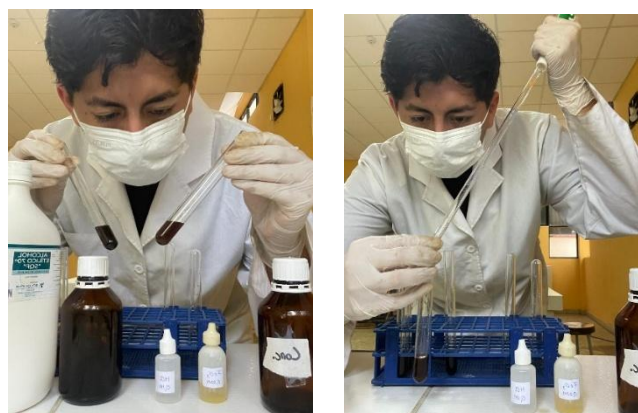
Fig. III- 2 Dosificación de reactivos en los tubos de ensayo



Fuente: Elaboración Propia, 2026

Luego se coloca de 3 gotas de cloruro férrico y 3 gotas de ácido clorhídrico en cada tubo de ensayo que contienen los respectivos reactivos mencionados anteriormente

Fig. III-3 Dosificación de cloruro férrico y ácido clorhídrico en los tubos de ensayo



Fuente: (Elaboración Propia, 2026)

Posteriormente, se agita un poco los tubos de ensayo, se observa si es que hay cambio de color o cambio de intensidad del color de los reactivos de manera individual y se compara con su respectivo blanco (tubo de ensayo con el reactivo sin la adición de cloruro de férrico y ácido clorhídrico).

Etanol 70°

Fig. III- 4 Observación de las pruebas cualitativas en el etanol 70°

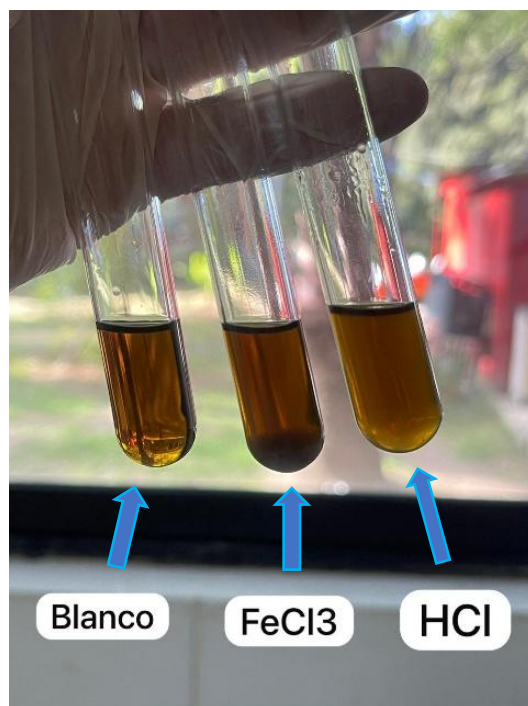


Fuente: Elaboración Propia, 2026

Las pruebas que se realiza con etanol como blanco se evidencia que la adición de cloruro férrico y ácido clorhídrico no produce cambios significativos en la coloración, confirmando la ausencia de compuestos fenólicos o sustancias reactivas en el solvente. Esto permite atribuir los cambios observados en el extracto a la presencia de compuestos propios de la cáscara de plátano, validando la naturaleza del colorante obtenido.

Extracto natural sin concentrar

Fig. III-5 Observación de las pruebas cualitativas en el extracto natural sin concentrar

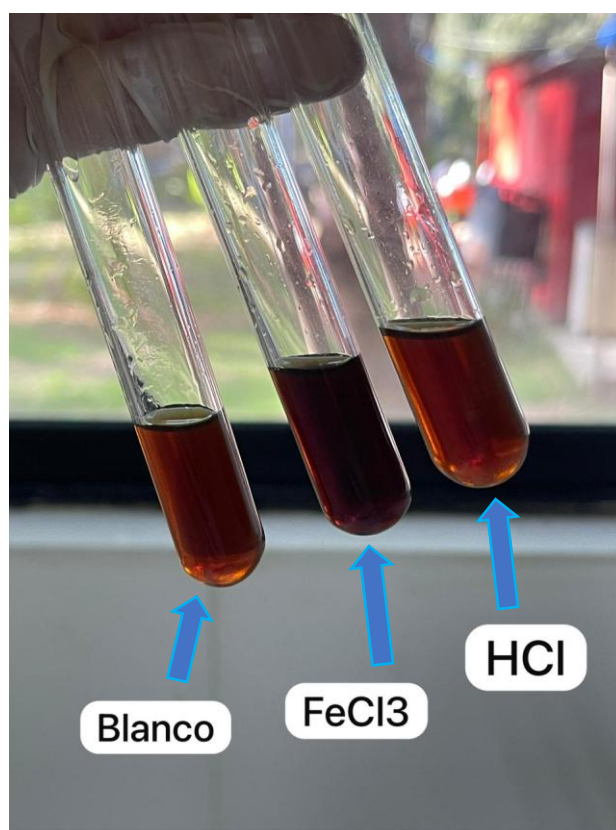


Fuente: Elaboración Propia, 2026

Las pruebas cualitativas que se realiza al extracto natural sin concentrar se evidencia un cambio de coloración hacia tonos más oscuros tras la adición de cloruro férrico, lo que indica la presencia de compuestos fenólicos, aunque con menor intensidad en comparación con el colorante natural concentrado. Asimismo, la adición de ácido clorhídrico produjo una disminución en la intensidad del color, confirma la presencia de antocianinas. Estos resultados demuestran que, aunque el extracto sin concentrar contiene compuestos con capacidad colorante, su respuesta es menos evidente debido a su menor concentración.

Extracto natural concentrado

Fig. III-6 Observación de las pruebas cualitativas en el extracto natural concentrado



Fuente: Elaboración Propia, 2026

Las pruebas cualitativas que se realiza al extracto natural concentrado se evidencia un cambio de coloración significativamente más intenso tras la adición de cloruro férrico, indicando una mayor presencia de compuestos fenólicos en comparación con el extracto sin concentrar. Asimismo, la adición de ácido clorhídrico produjo una disminución en la intensidad del color, confirma la presencia de antocianinas. Estos resultados demuestran que la concentración del extracto incrementa tanto la intensidad del color como la respuesta química del sistema, validando la presencia de compuestos con capacidad colorante en mayor proporción.

CAPÍTULO IV

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

4.1 Introducción al balance de materia y energía

El balance de materia y energía es fundamental para validar, optimizar y escalar el proceso de extracción del colorante natural a partir de la cáscara de plátano verde. El balance de materia permite cuantificar con precisión la masa de los componentes que entran (cáscara, solvente) y salen (extracto, residuo sólido) del proceso de maceración, determinando el rendimiento real de extracción y la eficiencia en la recuperación del colorante. Por otro lado, el balance de energía identifica y cuantifica todas las entradas y salidas de calor (en el secado), lo que es crucial para optimizar los costos operativos y diseñar los equipos necesarios para el secado o concentración del extracto, asegurando la viabilidad técnica y económica del proceso a escala industrial.

4.2. Balance de materia por etapa

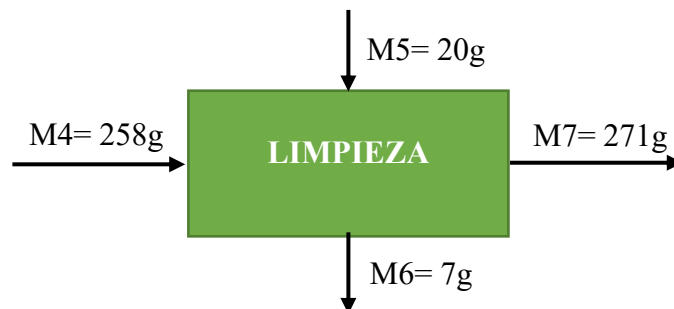
4.2.1. Etapa de Limpieza

M4= 258g de cáscara de plátano verde

M5= 20g de agua destilada

M6= masa de impurezas

M7= masa de cáscara de plátano verde lavada



M7= 271g de cáscara de plátano verde lavada

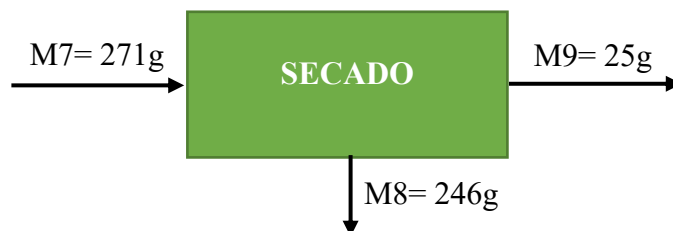
$M6 = M4 + M5 - M7 = 258g + 20g - 271g = 7g$ de impurezas

4.2.2. Etapa de Secado

M7= 271g de cáscara de plátano verde lavada

M8= masa de agua eliminada

M9= masa de cáscara de plátano verde seca



M9= 25g de cáscara de plátano verde seca

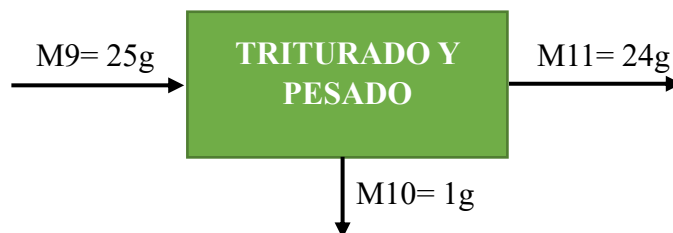
$M8 = M7 - M9 = 271g - 25g = 246g$ de agua eliminada

4.2.3. Etapa de Triturado y Pesado

M9= 25g de cáscara de plátano verde seca

M10= masa de pérdidas de cáscara

M11= masa de cáscara de plátano verde triturada



M11= 24g de cáscara de plátano verde triturada

$M10 = M9 - M11 = 25g - 24g = 1g$ de pérdidas de cáscara

4.2.4. Etapa de Maceración

M11= 24g de cáscara de plátano verde triturada

M12= 268,8g de etanol

M13= masa de la mezcla soluto-solvente



M13= 292,8g de la mezcla soluto-solvente

4.2.5. Etapa de Filtración del extracto

M13= 292,8g de la mezcla soluto-solvente

M14= masa de cáscara retenida

M15= masa de extracto natural



M15= 226,88g de extracto natural

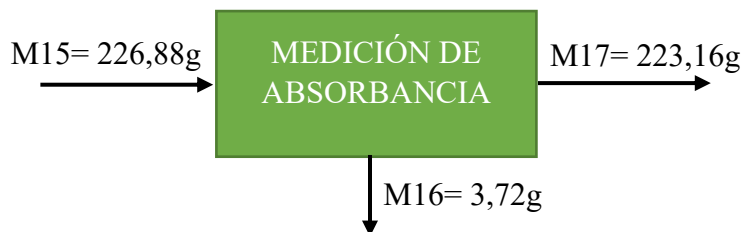
M14= M113 – M15 = 293,8g – 226,88g = 65,92g de cáscara retenida

4.2.6. Etapa de Medición de Absorbancia

M15= 226,88g de extracto natural

M16= masa de pérdidas de extracto natural

M17= masa de extracto natural



M17= 223,16g de colorante natural

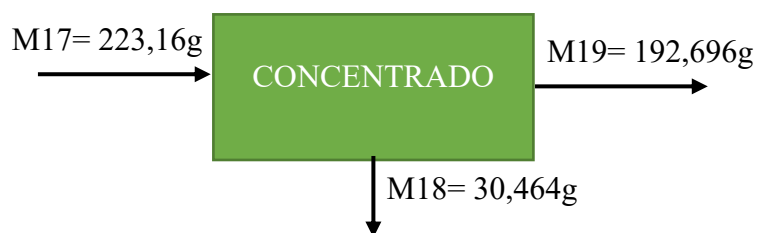
$$M16 = M15 - M17 = 226,88\text{g} - 223,16\text{g} = 3,72\text{g de pérdidas de extracto}$$

4.2.7. Etapa de Concentrado

$$M17 = 223,16\text{g de extracto natural}$$

$$M18 = \text{masa de etanol recuperado}$$

$$M19 = \text{masa de extracto natural concentrado}$$



$$M19 = 192,696\text{g de extracto natural concentrado}$$

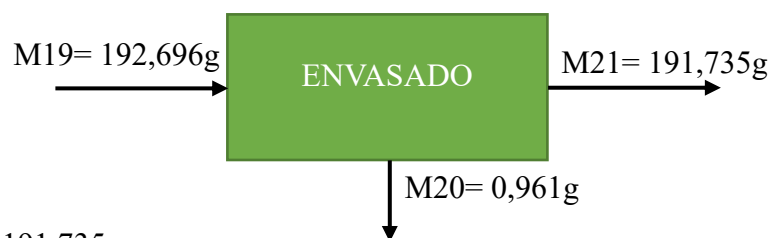
$$M18 = M17 - M19 = 223,16\text{g} - 192,696\text{g} = 30,464\text{g de etanol recuperado}$$

4.2.8. Etapa de envasado

$$M19 = 192,696\text{g de extracto natural concentrado}$$

$$M20 = \text{pérdida de masa de extracto natural concentrado}$$

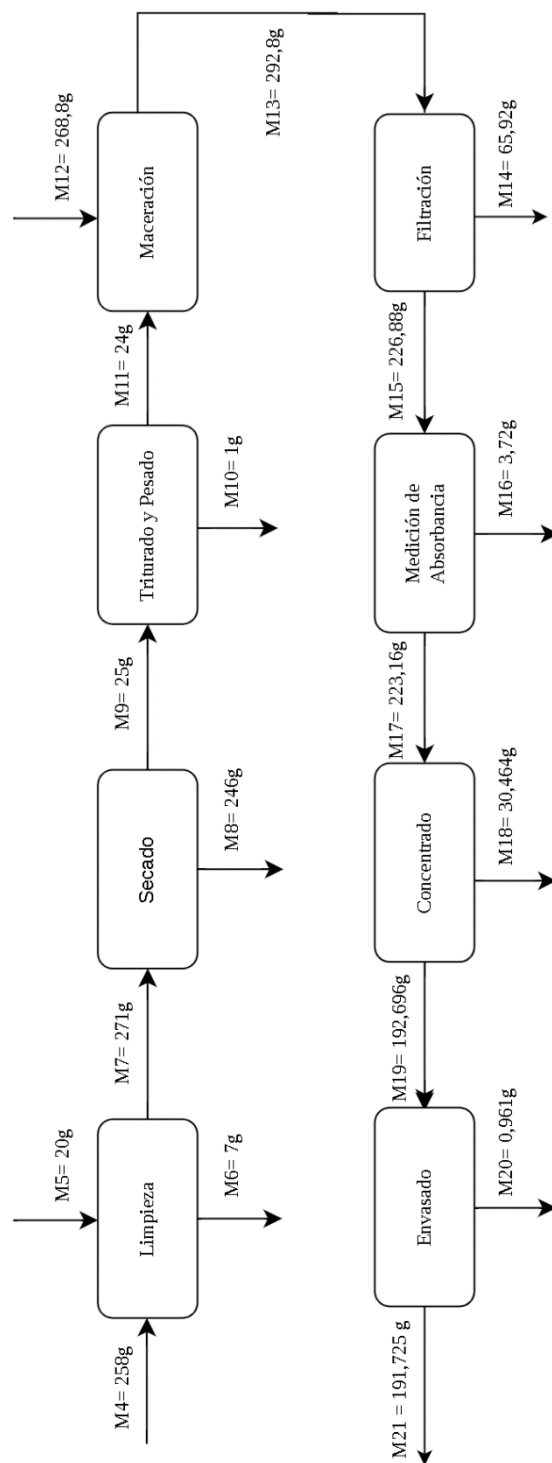
$$M21 = \text{masa de extracto natural envasado}$$



$$M21 = 191,735\text{g}$$

$$M20 = M19 - M21 = 192,696\text{g} - 191,735\text{g} = 0,961\text{g}$$

Fig. IV-1 Balance global del procedimiento



Fuente: Elaboración Propia, 2026

4.2.9. Rendimiento

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{colorante natural obtenido}}{\text{cáscara de plátano}} \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{191,735g}{258g} \times 100$$

$$\text{Rendimiento (\%)} = 74,32\%$$

El rendimiento del proceso de extracción fue de 74,32%, lo que indica que se recuperó aproximadamente tres cuartas partes del material colorante potencialmente disponible en la cáscara de plátano verde. Este valor sugiere que las condiciones empleadas en el diseño experimental permiten una extracción eficiente del pigmento.

El rendimiento obtenido en la extracción del colorante natural fue de 74,68%. Este valor se encuentra dentro del rango alto reportado en la literatura para extractos etanólicos de cáscara de plátano, típicamente entre 45% y 72% (Albak & Tekin, 2021; Ramli et al., 2019). Además, se aproxima a los valores más elevados observados en matrices vegetales ricas en compuestos fenólicos (40–82%). Por lo tanto, el rendimiento obtenido indica que el proceso desarrollado presenta una eficiencia destacable en la recuperación del pigmento.

4.2.10. Comparación de rendimiento con proyectos similares

En la siguiente tabla se muestra la comparación de rendimientos con proyectos en donde se utilizó variables similares en el diseño factorial.

Tabla IV-1 Comparación de rendimiento con proyectos similares

Proyecto de Grado	Rendimiento	Variables similares
El presente proyecto	74,32%	Relación solvente-soluto, concentración de solvente y tiempo de extracción
Obtención de colorante natural Betalaina a partir de la remolacha (Variedad Detroit) producida en el departamento de Tarija (2017)	72,79%	Relación solvente-soluto y tiempo de extracción
Extracción De Colorante Natural de la Semilla de Palta Variedad (Hass). Producida en el Municipio de Yacuiba (2018)	18,90%	Relación solvente-soluto y tiempo de extracción
Obtención experimental de colorante natural en polvo a partir de tegumento de maní (2019)	35,15%	Cantidad de solvente
Obtención experimental de colorante natural (Antocianinas) de mora cultivada en el departamento de Tarija	49,62%	Relación solvente-soluto
Obtención de Colorante Natural a Partir de la Cebolla Morada (Allium Cepa) Producida en el Departamento de Tarija (2024)	57,85%	Relación solvente-soluto y tiempo de extracción

Fuente: Elaboración Propia, 2026

La tabla muestra una comparación del rendimiento obtenido en esta investigación con otros estudios sobre la obtención de colorantes naturales a partir de diferentes materias primas. Se observa que el rendimiento alcanzado en el presente trabajo (74,32%) es superior al reportado en investigaciones similares, como las realizadas con remolacha (72,79%), mora (49,62%), cebolla morada (57,85%), maní (35,15%) y semilla de palta (18,90%). Además, se evidencia que las variables de proceso empleadas son similares entre los estudios, destacando la relación soluto-solvente y el tiempo de extracción, lo que permite inferir que la adecuada optimización de estas condiciones influye

directamente en la eficiencia del proceso. En este sentido, los resultados obtenidos confirman que el método aplicado en esta investigación es eficiente y que la cáscara de plátano verde representa una alternativa viable para la obtención de colorantes naturales.

4.3. Balance de energía por etapa

El balance de energía permite analizar y cuantificar la energía requerida durante el proceso de obtención del colorante natural, especialmente en etapas como el calentamiento, la evaporación del solvente y la concentración del extracto. Este análisis ayuda a comprender cómo se utiliza la energía dentro del proceso, identificar posibles pérdidas energéticas y evaluar la eficiencia de las operaciones realizadas. Además, el balance de energía permite estimar el consumo energético del proceso, lo cual es fundamental para determinar su viabilidad técnica y económica, así como para proponer mejoras que optimicen el uso de la energía en una posible aplicación a mayor escala.

4.3.1. Balance en el secado

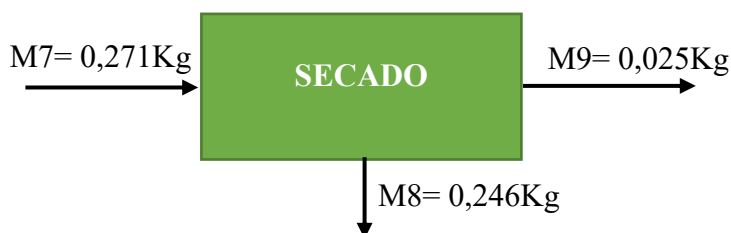
El calor específico de la cáscara de plátano depende principalmente de su contenido de humedad. Diversos estudios reportan valores entre 3,3 y 3,8 kJ/kg·°C para material fresco, debido a su alta proporción de agua, aproximándose al calor específico del agua (4.18 kJ/kg·°C).

M7= masa de cáscara de plátano verde lavada

M8= masa de agua eliminada

M9= masa de cáscara de plátano verde seca

Qs= calor total en la etapa de secado



Calor sensible de la cáscara de plátano			
Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Cáscara de plátano	M7	Kg	0,271
Calor específico	Cp	kJ/kg.°C	3,5
Temperatura inicial	Ti	°C	25
Temperatura final	Tf	°C	50

Calor latente del agua			
Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Agua	M8	Kg	0,246
Entalpía de evaporización	Hvap	kJ/kg	2382,9

$Q_s = \text{calor sensible de la cáscara de plátano} + \text{calor latente del agua}$

$$Q_s = M7 * Cp * \Delta T + M8 * H_{vap}$$

$$Q_s = 0,27 * 3,5 * (50 - 25) + 0,246 * 2382,9$$

$$Q_s = 609,818 \text{ kJ}$$

4.3.2. Balance en el concentrado

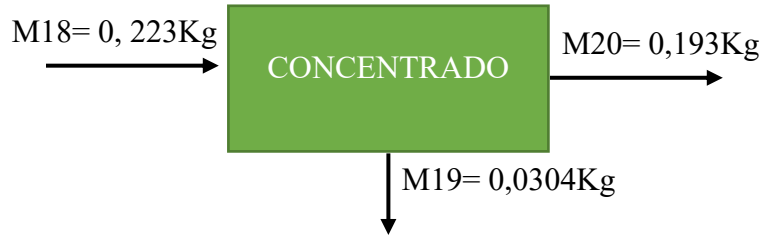
El calor específico del colorante natural obtenido depende principalmente de su contenido de humedad. Diversos estudios reportan valores entre 3,5 y 4,2 kJ/kg.°C para material fresco, debido a su alta proporción de agua, aproximándose al calor específico del agua (4.18 kJ/kg.°C).

M18= masa de colorante natural

M19= masa de etanol recuperado

M20= masa de colorante natural concentrado

Qc= calor total en la etapa de concentrado



Calor sensible del colorante natural			
Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Colorante Natural	M18	Kg	0,223
Calor específico	Cp	kJ/kg.°C	3,9
Temperatura inicial	Ti	°C	25
Temperatura final	Tf	°C	45

Calor latente del etanol			
Variable	Símbolo	Unidades	Valor
Etanol	M19	Kg	0,0304
Entalpía de evaporización	Hvap	kJ/kg	854

$Q_c = \text{calor sensible del colorante natural} + \text{calor latente del etanol}$

$$Q_c = M18 * Cp * \Delta T + M19 * H_{vap}$$

$$Q_c = 0,223 * 3,9 * (45 - 25) + 0,0304 * 854$$

$$Q_c = 43,356kJ$$

4.3.3. Energía total del proceso

E_S= energía en el secado

E_C= energía en el concentrado

E_B= energía de la bomba

E_R = energía del rotavapor

E_T = Energía total del proceso

P_s = Potencia del secador

t_s = tiempo de uso del secador

P_B = Potencia de la bomba de vacío

t_b = tiempo de uso de la bomba de vacío

P_R = Potencia del rotavapor

t_r = tiempo de uso del rotavapor

$$E_T = E_S + E_C \dots\dots\dots(\text{ecuación IV-1})$$

Reemplazando valores en E_S de la ecuación IV-1

$$E_S = P_S * t_s$$

$$E_S = 1,2kW * 12h$$

$$E_S = 14,4kWh$$

Reemplazando valores en E_C de la ecuación IV-1

$$E_C = E_B + E_R \dots\dots\dots(\text{ecuación IV-2})$$

Reemplazando valores de E_B y E_R de la ecuación IV-2

$$E_C = P_B * t_b + P_R * t_r$$

$$E_C = 0,23kW * 2h + 1,32kW * 2h$$

$$E_C = 3,1kWh$$

Reemplazando valores de E_S y E_C en la ecuación IV-1

$$E_T = 14,4kWh + 3,1kWh$$

$$E_T = 17,5kWh$$

4.4. Evaluación de costos

La evaluación de costos permite determinar si la obtención del colorante natural no solo es técnicamente viable, sino también económicamente rentable. Este análisis ayuda a identificar los gastos del proceso y optimizar recursos, lo que demuestra la posible aplicación industrial del producto y fortalece el valor práctico de la investigación.

4.4.1. Costos de materias primas

En la tabla IV-2 se muestra los costos que corresponden a la materia prima utilizada para obtener el colorante natural. El plátano verde, el etanol 70°, etanol 96° y el agua destilada.

Tabla IV-2 Costos de materias primas

N°	Descripción de insumos	Costo unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Plátano verde	1	pieza	80	80
2	Etanol 70°	23	1 L	3	69
3	Etanol 96°	34	1 L	3	102
4	Agua destilada	12	1 L	2	24
Costo Total					275

Fuente: Elaboración Propia, 2026

4.4.2. Costos de materiales

En la tabla IV-3 se muestra los costos que corresponden a todos los materiales utilizados en el proceso de obtención del colorante natural.

Tabla IV-3 Costos de materiales

N°	Descripción del material	Costo unitario (Bs)	Capacidad o Tamaño	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	probeta graduada	50	50 ml	pieza	1	50
2	probeta graduada	96	100 ml	pieza	1	96
3	varilla	33	mediano	pieza	1	33
4	mortero	111	pequeño	pieza	1	111
5	embudo de vidrio	61	100 mm	pieza	1	61
6	papel filtro	15	pliegue	pieza	3	45
7	frasco ambar	35	250 ml	pieza	10	350
8	marcador	5	grande	pieza	1	5
9	cuchillo	8	mediano	pieza	1	8
10	cinta adhesiva	6	pequeño	pieza	1	6
11	tijera	8	pequeño	pieza	1	8
Costo Total						773

Fuente: Elaboración Propia, 2026

4.4.3. Costos de análisis de la cáscara de plátano verde

En la tabla IV-4 se muestra el costo de cada análisis físicoquímico y microbiológico que se realizó a la cáscara de plátano verde para que sea apta para la obtención del colorante natural.

Tabla IV-4 Costos de análisis de la cáscara de plátano verde

N°	Descripción	Costo unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Acidez titulable (como ácido málico)	50	1	50
2	Ceniza	80	1	80
3	Fibra	120	1	120
4	Grasa	120	1	120
5	Hidratos de carbono	20	1	20
6	Humedad	50	1	50
7	Proteína total (Nx6,25)	120	1	120
8	pH (20°C)	25	1	25

9	Bacterias aerobias mesófilas	110	1	110
10	Coliformes fecales	110	1	110
11	Coliformes totales	110	1	110
12	Escherichia coli	110	1	110
13	Mohos y levaduras	110	1	110
14	Salmonella	140	1	140
15	Staphylococcus	140	1	140
Costo Total				1415

Fuente: CEANID, 2026

4.4.4. Costos de análisis del extracto natural obtenido

En la tabla IV-5 se muestra el costo de cada análisis fisicoquímico y microbiológico que se realiza al extracto natural obtenido para hallar el área del uso correspondiente.

Tabla IV-5 Costos de análisis del colorante natural obtenido

N°	Descripción	Costo unitario (Bs)	Cantidad	Costo (Bs)
1	Color	25	1	25
2	Olor	25	1	25
3	Densidad relativa (20°C)	50	1	50
4	Humedad	50	1	50
5	pH (20°C)	25	1	25
6	Sólidos insolubles	50	1	50
7	Sólidos Solubles (20°C)	30	1	30
8	Bacterias aerobias mesófilas	110	1	110
9	Coliformes totales	110	1	110
10	Escherichia coli	110	1	110
11	Mohos y levaduras	110	1	110
12	Salmonella	140	1	140
13	Staphylococcus aureus coagulasa positiva	140	1	140
Costo Total				975

Fuente: CEANID, 2026

4.4.5. Costos energéticos

En la tabla IV-6 se muestra el costo de energía eléctrica y agua que se utilizó en toda la parte experimental del presente proyecto.

Tabla IV-6 Costos energéticos

Nº	Descripción	Costo unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Energía Eléctrica	2,017	kWh	17,5	35,3
2	Agua	0,015	L	100L	1,5
Total					37

Fuente: Elaboración Propia, 2026

4.4.6. Costos de servicios y materiales directos e indirectos

En la tabla IV-7 se muestra el costo de los empastados, del transporte, del anillado, de la mano de obra, de la impresión y del internet que fueron los diferentes servicios y materiales que se utilizaron en todo el transcurso de la realización del presente proyecto.

Tabla IV-7 Costos de servicios y materiales directos e indirectos

Nº	Actividad	Costo unitario (Bs)	Unidad	Cantidad	Costo (Bs)
1	Impresión	0,5	hoja	360	230
2	Anillados	6	anillado	3	18
3	Internet	169	mes	5	845
4	Empastados	60	empastado	3	180
5	Transporte	5	día	100	500
6	Mano de obra del investigador	10	hora	500	5000
Total					6773

Fuente: Elaboración Propia, 2026

4.3.7. Costo Total del Proyecto

En la tabla IV-8 se muestra el costo total que se obtuvo mediante la suma de los costos de las materias primas, de los materiales utilizados, los análisis realizados a la cáscara de plátano verde, los análisis realizados al colorante natural obtenido, costos energéticos y además los servicios y materiales directos e indirectos que se requirió durante la realización del presente proyecto.

Tabla IV-8 Costos de servicios y materiales directos e indirectos

N°	Descripción	Costo (Bs)
1	Costos de materias primas	275
2	Costos de materiales	773
3	Costos del análisis de la cáscara de plátano	1415
4	Costos del análisis del colorante natural obtenido	975
5	Costos energéticos	37
6	Costos de servicios y materiales directos e indirectos	6773
Total		10248

Fuente: Elaboración Propia, 2026

4.3.8. Determinación del costo unitario del extracto natural colorante

En la tabla IV-9 se presenta los datos que se utiliza para la determinación del costo unitario del extracto natural con capacidad colorante.

Tabla IV-9 Resumen de gastos de producción en la obtención del extracto natural

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costos Total (Bs)
1	Costos de materia prima	gramos	1	0,011 Bs/g	0,011
2	Etanol 70°	L	0,02	23 Bs/L	0,46
3	Costos Energéticos	kwh	17,5	0,84	14,7
4	Mano de Obra	horas	15	10	150
Total					165,171

Fuente: Elaboración Propia, 2026

Para determinar el costo unitario del extracto natural obtenido, se considera el costo del proceso experimental de solo un experimento y la cantidad de producto final obtenida.

$$\text{Costo Unitario} = \frac{\text{Costo total}}{\text{Cantidad de producto}}$$

Reemplazando:

$$\text{Costo Unitario} = \frac{165,171\text{Bs}}{15,4\text{ml}}$$

$$\text{Costo Unitario} = 10,72 \text{ Bs/ml}$$

El costo unitario obtenido de 10,72 Bs/mL para el extracto natural con capacidad colorante puede considerarse elevado en comparación con muchos colorantes sintéticos comerciales, los cuales generalmente presentan menores costos de producción debido a sus altos rendimientos, producción a gran escala y procesos industriales altamente optimizados. Sin embargo, este valor es razonable para una investigación a escala experimental, ya que la obtención del extracto implicó etapas de procesamiento que demandan un consumo significativo de energía, particularmente el secado de la cáscara en horno y la concentración del extracto mediante rotavapor. En consecuencia, el elevado costo unitario se atribuye principalmente al consumo energético de estas operaciones y al bajo rendimiento propio de una producción a escala de laboratorio, por lo que se espera que dicho costo disminuya considerablemente mediante la optimización del proceso y su implementación a mayores escalas de producción.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La cáscara de plátano verde presenta características fisicoquímicas y microbiológicas que respaldan su utilización como materia prima para la obtención de un extracto natural con capacidad colorante, lo que permite su aprovechamiento y procesamiento experimental de manera segura y viable.

El proceso de extracción sólido-líquido por maceración aplicado a la cáscara de plátano verde permitió obtener de manera eficiente un extracto natural líquido con capacidad colorante, demostrando la viabilidad técnica del aprovechamiento de este residuo agroindustrial como fuente de compuestos pigmentarios. Esto evidencia el potencial de valorización de subproductos agrícolas mediante procesos de transformación que generan productos con valor agregado.

Las pruebas preliminares realizadas permitieron identificar y establecer los parámetros más relevantes que intervienen en el proceso de extracción por maceración de la cáscara de plátano verde. Mediante la evaluación experimental de diferentes condiciones de operación, fue posible determinar los rangos adecuados de las variables independientes, específicamente la concentración del solvente, la relación soluto-solvente y el tiempo de maceración, así como verificar su influencia sobre las características del extracto obtenido.

El análisis estadístico mediante ANOVA permitió determinar que las variables proporción soluto-solvente, concentración de etanol y tiempo de maceración, así como sus interacciones, influyen significativamente en el volumen final del colorante obtenido. Estos resultados confirman que el control y la optimización de los parámetros del proceso son determinantes para mejorar la eficiencia de extracción y el rendimiento del sistema.

Los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica del extracto natural obtenido evidencian que están presenta condiciones favorables de calidad, estabilidad e inocuidad, reflejadas en un pH ligeramente ácido, un adecuado contenido de sólidos solubles y bajos niveles de sólidos insolubles, además de la ausencia de

microorganismos patógenos. En conjunto, estos resultados respaldan su potencial aplicación como colorante natural en diferentes sectores industriales, constituyendo una alternativa viable frente a los colorantes sintéticos.

Las pruebas cualitativas realizadas al extracto natural concentrado evidencian un cambio de coloración significativamente más intenso tras la adición de cloruro férrico, indicando una mayor presencia de compuestos fenólicos en comparación con el extracto sin concentrar. Asimismo, la adición de ácido clorhídrico produjo una disminución en la intensidad del color, confirmando la sensibilidad del pigmento frente a variaciones de pH y la presencia de antocianinas. Estos resultados demuestran que la concentración del extracto incrementa tanto la intensidad del color como la respuesta química del sistema, validando la presencia de compuestos con capacidad colorante en mayor proporción.

El rendimiento del proceso de extracción alcanzó 74,32%, lo cual evidencia una recuperación eficiente del pigmento presente en la cáscara de plátano. Este resultado demuestra que las condiciones experimentales establecidas permiten maximizar la obtención del colorante natural, lo que respalda la viabilidad técnica del proceso y su posible aplicación a mayor escala.

El extracto natural con capacidad colorante presentó un costo unitario de 10,72 Bs/mL, valor que se considera elevado para una producción a escala experimental debido al consumo energético asociado al secado de la materia prima y a la etapa de concentración mediante rotavapor. No obstante, este costo podría reducirse mediante la optimización del proceso y su escalamiento productivo, evidenciando el potencial de viabilidad económica del extracto obtenido.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios de estabilidad del colorante natural frente a factores como temperatura, luz, pH y tiempo de almacenamiento, con el fin de determinar su comportamiento durante su conservación y aplicación en diferentes matrices.

Se sugiere evaluar métodos de extracción alternativos o asistidos, como ultrasonido o microondas, que podrían incrementar la eficiencia de extracción y reducir los tiempos de proceso en comparación con la maceración convencional.

Es recomendable estudiar la aplicación del colorante en diferentes productos alimentarios, cosméticos o textiles, con el propósito de evaluar su intensidad cromática, estabilidad del color y compatibilidad con otras formulaciones industriales.

Finalmente, se recomienda desarrollar estudios de escalamiento del proceso y evaluación económica, que permitan analizar la factibilidad de producir este colorante natural a nivel piloto o industrial, promoviendo el aprovechamiento sostenible de residuos agrícolas.