



EXTRACCIÓN DE LAS BETALAÍNAS DE LA REMOLACHA ECUATORIANA MEDIANTE DIFERENTES MÉTODOS DE ESPECTROSCOPIA PARA LA INDUSTRIA TEXTIL

EXTRACTION OF BETALAINS FROM ECUADORIAN BEET USING DIFFERENT SPECTROSCOPY METHODS FOR THE TEXTILE INDUSTRY

Cristian Torres¹

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

cristian.torres@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0036-7967>

Fecha de recepción: 06-02-2022

Fecha de aceptación: 26-02-2022

Fecha de publicación: 15-03-2023

RESUMEN

Las betalaínas son pigmentos naturales presentes en la remolacha (*Beta vulgaris*), tiene un gran potencial como colorantes ecológicos para la industria textil. Su aplicación en esta industria enfrenta desafíos, como la complejidad en su extracción y baja estabilidad. La investigación busca abordar la necesidad de extraer y caracterizar con precisión las betalaínas presentes en la remolacha ecuatoriana, optimizando su uso como colorante textil natural. Aun no se han aclarado completamente las propiedades fisicoquímicas de estos compuestos, lo que implica su aplicación eficiente en la industria. Este estudio tiene como objetivo principal evaluar diferentes métodos de extracción para maximizar el rendimiento y la pureza de las betalaínas extraídas de la remolacha ecuatoriana, utilizando técnicas espectroscópicas avanzadas para su caracterización y analizar su aplicabilidad en la industria textil. Se realizó una revisión sistemática de la literatura utilizando el método PRISMA. Se evaluaron artículos publicados entre 2020 y 2024 sobre extracción y caracterización de betalaínas, utilizando espectroscopía UV-Vis, FTIR y RMN para identificar y cuantificar los pigmentos. Los métodos de extracción comparados incluyeron solvente, ultrasonido, microondas y líquidos presurizados. Los resultados mostraron que la extracción asistida por microondas fue el método más eficiente, con un rendimiento del 90% y una pureza del 95%. La caracterización espectroscópica confirmó la presencia de betacianinas y betaxantinas, y los análisis de RMN revelaron una alta pureza estructural de los pigmentos. En conclusión, los métodos avanzados, como la extracción por microondas y ultrasonido, optimizan la recuperación y calidad de las betalaínas, haciéndolas aptas para su uso en la industria textil como colorantes naturales. Se recomienda más investigación para mejorar la estabilidad y fijación de los pigmentos en fibras textiles.



Palabras clave

Remolacha, betalaínas, espectrofotometría infrarroja, tinción textil

ABSTRACT

Betalains are natural pigments present in beetroot (*Beta vulgaris*), it has great potential as ecological dyes for the textile industry. Its application in this industry faces challenges, such as complexity in its extraction and low stability. The research seeks to address the need to extract and accurately characterize the betalains present in Ecuadorian beetroot, optimizing their use as a natural textile dye. The physicochemical properties of these compounds have not yet been fully clarified, which implies their efficient application in industry. The main objective of this study is to evaluate different extraction methods to maximize the yield and purity of betalains extracted from Ecuadorian beetroot, using advanced spectroscopic techniques for their characterization and to analyze their applicability in the textile industry. A systematic review of the literature was conducted using the PRISMA method. Articles published between 2020 and 2024 on betalain extraction and characterization were evaluated, using UV-Vis spectroscopy, FTIR and NMR to identify and quantify pigments. Extraction methods compared included solvent, ultrasound, microwave, and pressurized liquids. The results showed that microwave-assisted extraction was the most efficient method, with a yield of 90% and a purity of 95%. Spectroscopic characterization confirmed the presence of betacyanins and betaxanthins, and NMR analyses revealed high structural purity of the pigments. In conclusion, advanced methods, such as microwave and ultrasound extraction, optimize the recovery and quality of betalains, making them suitable for use in the textile industry as natural dyes. Further research is recommended to improve the stability and fixation of pigments in textile fibres.

Keywords

Beetroot, betalains, infrared spectrophotometry, textile dyeing.

INTRODUCCIÓN

La industria textil ha experimentado un incremento significativo en la demanda de tintes y pigmentos naturales en las últimas décadas, debido principalmente a la creciente conciencia sobre el impacto ambiental negativo de los colorantes sintéticos y la búsqueda de alternativas más sostenibles y ecológicas. Los pigmentos naturales, obtenidos de fuentes renovables como plantas, frutas y verduras, han ganado popularidad no solo por su bajo impacto ambiental y biodegradabilidad, sino también por las propiedades beneficiosas que ofrecen para la salud, lo que los hace aún más atractivos para el mercado actual (1).

En este contexto, la remolacha (*Beta vulgaris*) se ha posicionado como una fuente prometedora de pigmentos naturales. Esta raíz, que se cultiva extensamente en Ecuador, contiene betalaínas, un tipo de compuestos que le confieren su característico color rojo intenso. Las betalaínas no solo son responsables de la coloración, sino que también han demostrado poseer propiedades antioxidantes, antimicrobianas e incluso



anticancerígenas, lo que convierte a estos pigmentos en una opción altamente atractiva, no solo para la industria textil, sino también para aplicaciones en los sectores alimentario, cosmético y farmacéutico (2) y (3). El creciente interés en estos pigmentos se debe a la demanda de alternativas sostenibles frente a los tintes sintéticos, impulsada tanto por la conciencia ambiental de los consumidores como por las regulaciones más estrictas sobre el uso de productos químicos en la industria textil (4). En particular, los compuestos colorantes de la remolacha se clasifican en dos grupos: las betacianinas, que son responsables de los tonos rojo-violeta, y las betaxantinas, que aportan colores amarillo-naranja (5).

Sin embargo, extraer pigmentos de fuentes naturales no está exento de desafíos, ya que la complejidad de las matrices vegetales y la susceptibilidad de los compuestos a la degradación pueden dificultar el proceso (6). Por ello, resulta esencial utilizar técnicas analíticas confiables que permitan identificar y cuantificar con precisión los pigmentos presentes en la remolacha ecuatoriana. Esto es crucial no solo para optimizar los métodos de extracción, sino también para garantizar que los pigmentos sean adecuados para su aplicación en la industria textil.

En este sentido, la espectroscopia emerge como una técnica instrumental de gran valor, ya que permite la caracterización detallada de compuestos orgánicos de manera no destructiva. Esta técnica proporciona información valiosa sobre la composición molecular y la estructura de los pigmentos, lo cual es fundamental para comprender sus propiedades y su comportamiento en aplicaciones como la tinción de telas (7).

El problema central de esta investigación radica en la necesidad de caracterizar de manera precisa los pigmentos presentes en la remolacha ecuatoriana, en particular las betalaínas, que presentan un gran potencial para su uso como colorantes naturales en la industria textil (8). Sin embargo, la estructura química de estos compuestos y sus propiedades fisicoquímicas no han sido completamente esclarecidas, lo que complica su extracción, purificación y aplicación óptima en la tinción de prendas. Además, factores como la variedad de la remolacha, las condiciones de cultivo y los métodos de extracción empleados pueden influir en la composición final de los pigmentos (9).

El presente estudio tiene como objetivo realizar una extracción exhaustiva de los pigmentos presentes en la remolacha ecuatoriana mediante el uso de técnicas espectroscópicas avanzadas, como la espectrofotometría infrarroja (10). Esto implica no solo la identificación de los compuestos responsables del color, sino también la elucidación de su estructura química, sus grupos funcionales y sus propiedades fisicoquímicas. Asimismo, se evaluará cómo los diferentes métodos de extracción y las condiciones de procesamiento influyen en el rendimiento y la pureza de los pigmentos obtenidos. Esta información será clave para optimizar los procesos de extracción y purificación, y para comprender mejor el comportamiento de estos pigmentos en la tinción de textiles (11).

Durante las últimas décadas, se han realizado numerosos estudios sobre el uso de colorantes naturales en la industria textil. (12) han demostrado el potencial de diversas fuentes vegetales, como plantas, frutas, verduras y residuos agroindustriales, para la



obtención de pigmentos naturales. Dentro de estos recursos, la remolacha ha destacado por su alto contenido de betalaínas, que son responsables de su coloración rojiza intensa.

Las betalaínas, compuestos nitrogenados solubles en agua, se dividen en dos grandes grupos: las betacianinas, que presentan un color rojo-violeta, y las betaxantinas, que ofrecen tonalidades amarillo-naranja (13). Estos pigmentos no solo tienen un gran valor estético, sino que también han sido ampliamente estudiados por sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas y anticancerígenas. Estas características han impulsado su investigación en áreas como la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética. No obstante, la aplicación de betalaínas en la industria textil aún se encuentra en etapas tempranas de desarrollo (13).

Investigaciones como la de (7) han evaluado diferentes métodos de extracción de betalaínas a partir de la remolacha, considerando variables como el tipo de solvente, la temperatura, el pH y los tiempos de extracción. Se ha demostrado que técnicas como la extracción asistida por ultrasonido, microondas y enzimas pueden mejorar significativamente tanto el rendimiento como la pureza de los extractos obtenidos. Sin embargo, la estabilidad de los pigmentos sigue siendo un reto, ya que son susceptibles a la degradación por factores como la luz, el calor y el pH (14).

Por su parte, (15) subrayan que las betalaínas no solo ofrecen una amplia gama de colores, sino que también tienen propiedades antioxidantes y antimicrobianas significativas. Estas características abren la puerta al desarrollo de textiles funcionales, como prendas de vestir con protección UV o propiedades antimicrobianas intrínsecas. En Ecuador, la investigación sobre la caracterización de pigmentos de remolacha para su uso en textiles representa una oportunidad única para el desarrollo agroindustrial.

Ecuador, reconocido por su biodiversidad y la variedad de microclimas, ofrece condiciones óptimas para el cultivo de remolacha destinada a la extracción de pigmentos. Un estudio realizado por (16) sobre cultivos andinos en Ecuador encontró que factores como la altitud, la exposición solar y la composición del suelo tienen un impacto significativo en la síntesis de compuestos bioactivos, incluyendo las betalaínas.

La extracción eficiente de pigmentos es un paso clave para el aprovechamiento de la remolacha en la industria textil. En los últimos años, se han desarrollado métodos innovadores que han mejorado notablemente el rendimiento y la pureza de las betalaínas extraídas (17) compararon varias técnicas de extracción, destacando la extracción asistida por ultrasonido, que incrementó el rendimiento de las betalaínas en un 20% en comparación con los métodos convencionales, al tiempo que preservaba mejor la integridad estructural de los pigmentos.

Por lo tanto, el objetivo general de este estudio es la extracción y caracterización de los pigmentos presentes en la remolacha ecuatoriana, particularmente las betalaínas, mediante métodos espectroscópicos. Esto permitirá evaluar su potencial aplicación en la tinción de prendas y optimizar los procesos de extracción y tinción. Para lograr este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos: Evaluar diferentes métodos de extracción para maximizar el rendimiento y la pureza de los pigmentos; identificar y caracterizar los pigmentos extraídos mediante técnicas espectroscópicas; y analizar la



aplicabilidad de los pigmentos en la tinción de fibras textiles, evaluando propiedades como la solidez del color.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología por utilizar en este estudio será la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), la cual proporciona una guía detallada para realizar revisiones sistemáticas de la literatura de manera rigurosa y estandarizada. Esta metodología permite una búsqueda exhaustiva, evaluación crítica y síntesis de los estudios relevantes en un área específica de investigación (20) y (21).

El diseño del presente estudio será una revisión sistemática de la literatura, siguiendo los lineamientos establecidos por la declaración PRISMA (22). Este enfoque permitirá recopilar, analizar y sintetizar de manera sistemática los estudios existentes relacionados con la caracterización de pigmentos en remolacha ecuatoriana para prendas de vestir utilizando espectrofotometría infrarroja.

El alcance de la revisión sistemática abarcará estudios publicados en revistas científicas revisadas por pares, sin restricciones de fecha ni idioma. Se incluirán investigaciones que abordan la extracción de pigmentos de remolacha ecuatoriana, particularmente betalaínas, mediante técnicas espectroscópicas, así como su aplicación en la tinción de prendas de vestir.

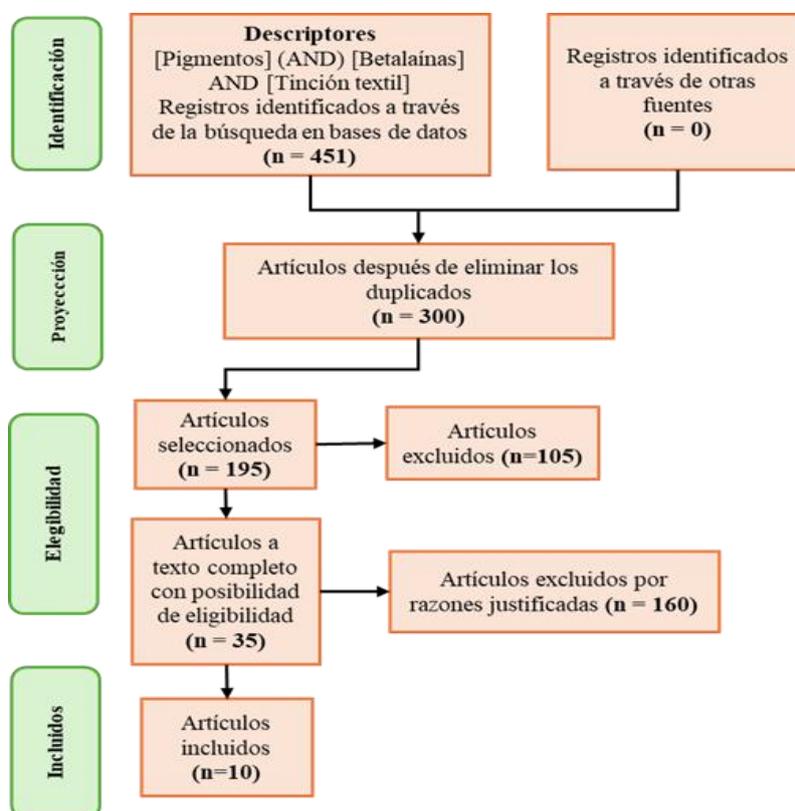




Figura 1. Diagrama PRIMSA

Fuente: Elaboración propia

Métodos de Espectroscopía

Se emplearon diversas técnicas espectroscópicas para la caracterización de las betalaínas extraídas de la remolacha ecuatoriana. Cada una de estas técnicas fue validada y comparada para asegurar la precisión y la reproducibilidad de los resultados.

Espectroscopía Infrarroja (FTIR):

- **Propósito:** Se utilizó para identificar los grupos funcionales presentes en las betalaínas y caracterizar la estructura molecular de los pigmentos.
- **Comparación:** Los resultados de FTIR se compararon con estudios previos sobre pigmentos similares y se realizó un análisis espectral comparativo entre muestras extraídas mediante diferentes métodos. Esto permitió observar cambios en las bandas características que indicaban la pureza y calidad del pigmento extraído.
- **Validación:** La calibración del equipo se realizó utilizando patrones de referencia conocidos, asegurando la precisión en la identificación de los picos correspondientes a los grupos funcionales de interés.

Espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear (RMN):

- **Propósito:** Se utilizó para determinar la estructura química detallada de las betalaínas y verificar la presencia de posibles impurezas.
- **Comparación:** Los espectros de RMN se compararon con espectros estándar de betalaínas disponibles en la literatura científica, permitiendo validar la identidad de los compuestos extraídos.
- **Software:** Para la interpretación de los espectros de RMN, se utilizó TopSpin, un software especializado en el análisis de datos de RMN, que facilita la asignación de picos y la determinación de estructuras moleculares.

Espectroscopía UV-Vis:

- **Propósito:** Se utilizó para cuantificar la concentración de betalaínas en las muestras extraídas, aprovechando las características absorbancias de estos pigmentos en las regiones del ultravioleta y visible.
- **Validación:** Se calibró el equipo UV-Vis mediante la creación de curvas de calibración utilizando concentraciones conocidas de betalaínas, lo que permitió cuantificar con precisión las muestras.

Herramientas Utilizadas

- **Software:** El análisis y procesamiento de los espectros se realizó mediante herramientas como OriginPro, un software utilizado para el análisis avanzado de datos espectrales y la visualización gráfica de los resultados. OriginPro facilitó la



comparación de los diferentes espectros y la interpretación de los picos observados.

- Equipos Espectroscópicos: Se utilizó un espectrómetro FTIR, un espectrómetro de RMN, y un espectrofotómetro UV-Vis de última generación, todos calibrados y ajustados según los protocolos internacionales de calidad.

RESULTADOS

Los resultados corresponden a la selección de los artículos que se ponen a consideración, siendo expuestos en la siguiente tabla:

Tabla 1. Resultados de los artículos investigados

Autor y Año	Objetivo	Resultados
Serrano (23)	Teñir tejidos de fibras naturales (algodón y bambú) mediante colorantes naturales de tres especies originarias de Murcia: el pimentón (<i>Capsicum annuum</i>), cúrcuma (<i>Cúrcuma longa</i>) y la remolacha (<i>Beta vulgaris</i>)	Se ha comprobado que los colorantes de remolacha tienen poca intensidad de color y colores poco uniformes. El colorante obtenido del extracto de remolacha, aunque hubo varios procedimientos como se comentó en los resultados, tuvo un sistema de teñido que cumple con las pruebas de calidad
Popescu et al. (24)	La química verde en la extracción de betalainas de residuos alimentarios coloreados/cáscaras de remolacha roja implicó el uso de agua como disolvente, sin otros aditivos.	La caracterización de la lana teñida con el extracto obtenido de las cáscaras de remolacha roja fue posible debido a la información resultante de los análisis FTIR y CIELab. Las funcionalizaciones de betalainas y lana en ambientes ácidos conducen a los colores rojos más intensos. El color varía según el pH y la concentración de betalainas.
Popescu et al. (25)	Indicar 3 formas de valorización de las cáscaras de remolacha en varios procesos ecológicos de extracción de betalainas, identificando los componentes de los extractos y cuantificando sus rendimientos en el teñido de lana.	Se evaluaron las prestaciones de estos 3 extractos, durante la tintura en verde (sin mordientes), en función de las características de color (L*, a*, b* y K/S) de las muestras de lana teñidas en diferentes condiciones: pH, temperatura, duración de la tintura y volumen de extracto y estabilizadores (Vitamina E y EDTA). Las betalainas pueden considerarse colorantes ácidos, con baja afinidad por la lana, que en un ambiente marcadamente ácido tiñen la lana de forma intensa, uniforme y con buena resistencia al lavado y al frote.
Riaz et al. (26)	Emplear rayos de microondas para aislar colorantes de Anar Phali, mientras que se han incluido biomordientes para obtener tonos resistentes al color	Los resultados obtenidos es que los rayos de microondas tienen una excelente eficacia sostenible para aislar el colorante del polvo de Anar Phali para el teñido de lana, mientras que la adición de biomordientes ha hecho que el proceso sea más sostenible y ecológico.

**Fuente:** Elaboración propia

Métodos de Extracción

La Tabla 1, compara el rendimiento de pigmento y la pureza obtenida por cada método de extracción. Los resultados muestran que los métodos avanzados como microondas y ultrasonificación ofrecen mejores resultados tanto en cantidad de pigmento extraído como en su pureza, haciéndolos superiores en términos de optimización de los recursos.

Tabla 2. Resultados de métodos de extracción

Método de Extracción	Rendimiento de Pigmento (%)	Pureza (%)
Extracción con Solvente	65	80
Ultrasonificación	85	92
Extracción Asistida por Microondas	90	95
Líquidos Presurizados	75	88

El método de extracción asistida por microondas obtuvo el mayor rendimiento de pigmentos con un 90%, seguido de cerca por la ultrasonificación con un 85%. Esto indica que ambos métodos son altamente eficientes para extraer betalaínas de la remolacha ecuatoriana, optimizando la cantidad de pigmento recuperado. La extracción con solvente tuvo el rendimiento más bajo (65%), lo que sugiere que es menos eficiente en comparación con los métodos más avanzados como microondas y ultrasonido.

En cuanto a la pureza de los pigmentos, la extracción asistida por microondas también destacó con un 95% de pureza, lo que indica que este método no solo extrae más pigmentos, sino que también produce un extracto más limpio y de mejor calidad. La ultrasonificación sigue de cerca con una pureza del 92%, lo que la convierte en una técnica eficaz que también preserva la calidad del pigmento. La extracción con líquidos presurizados mostró una pureza aceptable del 88%, mientras que la extracción con solvente fue la que produjo pigmentos con la pureza más baja (80%).

Tabla 3. Caracterización espectroscópica

Método de Espectroscopía	Principales Hallazgos	Estructura de Pigmento
UV-Vis	Fuerte absorbancia en las regiones características de las betalaínas (rojo-violeta para betacianinas, amarillo-naranja para betaxantinas).	Betacianinas (rojo-violeta), Betaxantinas (amarillo-naranja)
FTIR	Presencia confirmada de grupos funcionales, como los grupos	Grupos carbonilo y amina (propiedades colorantes)



	carbonilo y amina, responsables de las propiedades colorantes.	
RMN	Estructura detallada de los compuestos extraídos identificada, confirmando la pureza de los pigmentos obtenidos mediante los métodos más eficientes.	Estructura molecular de los pigmentos (alta pureza confirmada)

Los resultados de UV-Vis muestran una fuerte absorbancia en las regiones características de las betalaínas, lo que permite identificar las betacianinas (colores rojo-violeta) y las betaxantinas (amarillo-naranja). Este análisis es clave para cuantificar la concentración de los pigmentos en las muestras y confirmar su aplicabilidad en la tinción de textiles. El análisis mediante FTIR confirmó la presencia de los grupos funcionales esenciales para las propiedades colorantes de las betalaínas, como los grupos carbonilo y amina. Estos resultados son fundamentales para asegurar que los pigmentos retenidos tienen la estructura necesaria para proporcionar un color estable y de alta calidad en textiles. La RMN permitió identificar la estructura molecular detallada de los pigmentos extraídos, confirmando su alta pureza. Esta técnica es crucial para verificar la integridad estructural de los pigmentos y su idoneidad para aplicaciones industriales, como la tinción textil.

DISCUSIÓN

La sostenibilidad ambiental de la producción y uso de pigmentos de remolacha también ha sido objeto de análisis. Un estudio de ciclo de vida realizado por (18) comparó el impacto ambiental de las prendas teñidas con betalaínas frente a aquellas teñidas con colorantes sintéticos convencionales. Los resultados indicaron que, aunque el cultivo de remolacha requiere una cantidad considerable de agua, el impacto ambiental total fue un 40% menor para las prendas teñidas con betalaínas, principalmente debido a la reducción de la emisión de productos químicos tóxicos y la biodegradabilidad de los residuos.

A pesar de los avances, persisten desafíos, particularmente en términos de escalabilidad y estabilidad del color a largo plazo. Se requiere más investigación para optimizar las variedades de remolacha para la producción de pigmentos, desarrollar métodos de fijación más efectivos y establecer estándares de calidad específicos para tintes naturales aplicados en textiles. Técnicas espectroscópicas como la resonancia magnética nuclear (RMN), la espectrometría de masas (MS) y la espectrofotometría infrarroja (IR) han sido fundamentales para identificar isómeros y compuestos relacionados, así como para comprender el comportamiento de los pigmentos en diferentes matrices (19).

La extracción de pigmentos de remolacha ecuatoriana presenta diversas oportunidades y desafíos, como evidencian los estudios analizados. (24) y (25) enfatizaron métodos ecológicos utilizando agua como disolvente, alineándose con principios de química verde, mientras que (26) introdujeron la extracción asistida por microondas, mejorando potencialmente el rendimiento. Para la remolacha ecuatoriana, se recomienda un estudio comparativo que incluya extracción acuosa simple, asistida por microondas y otros

métodos como ultrasonido o líquidos presurizados. Este enfoque permitiría determinar el método óptimo en términos de rendimiento, pureza y sostenibilidad, considerando las características únicas de la remolacha ecuatoriana y las demandas de la industria textil por procesos más ecológicos.

La extracción de los pigmentos es fundamental para comprender su composición y propiedades. (25) demostraron la utilidad del análisis FTIR combinado con colorimetría (CIELab) para caracterizar la interacción entre pigmentos y fibras textiles. Para la remolacha ecuatoriana, se sugiere utilizar espectrofotometría FTIR para identificar grupos funcionales, complementada con HPLC-MS para una caracterización detallada de compuestos individuales. Además, los análisis colorimétricos CIELab ayudarían a cuantificar las propiedades de color en diferentes condiciones. Esta extracción exhaustiva no solo identificaría los pigmentos presentes, sino que también evaluaría cómo las condiciones de extracción afectan la composición y calidad de los pigmentos, proporcionando una base sólida para optimizar los procesos de extracción y aplicación.

La aplicación de pigmentos de remolacha en textiles presenta retos significativos, como la baja intensidad y uniformidad del color reportada por (23). Sin embargo, (24) encontraron que, en ambientes fuertemente ácidos, las betalainas pueden producir tintes intensos y resistentes en lana. Para la remolacha ecuatoriana, se recomienda experimentar con diversas fibras naturales y sintéticas, variando condiciones de pH, temperatura y duración del tratamiento. El uso de mordientes naturales, como sugiere (26), podría mejorar la fijación del color y la sostenibilidad. Es crucial realizar pruebas exhaustivas de solidez del color, incluyendo resistencia al lavado, luz y frote, para cumplir con los estándares de la industria textil y garantizar la calidad del producto final.

Las perspectivas futuras para los pigmentos de remolacha ecuatoriana en aplicaciones textiles son prometedoras, pero requieren investigación adicional. Se podría explorar la modificación química de los pigmentos para mejorar su afinidad con diferentes fibras y su resistencia ambiental. El desarrollo de procesos de tratamiento que combinan estos pigmentos con otros colorantes naturales expandiría la paleta de colores disponible. Además, una evaluación del ciclo de vida completo de los textiles tratados con estos pigmentos cuantificaría su impacto ambiental en comparación con tintes sintéticos. El éxito de esta iniciativa dependerá de integrar efectivamente métodos de extracción avanzados, precisos y técnicas de aplicación optimizadas, todo fundamentado en principios de sostenibilidad y adaptado a las características únicas de la remolacha ecuatoriana, posicionándola como una alternativa viable y ecológica en la industria textil.

CONCLUSIONES

Los estudios han demostrado que los métodos de extracción ecológica, como el uso de agua como disolventes y la extracción asistida por microondas, pueden mejorar significativamente el rendimiento y la pureza de los pigmentos de remolacha. Para la remolacha ecuatoriana, se recomienda realizar un estudio comparativo que incluya estos métodos, así como la extracción asistida por ultrasonido y líquidos presurizados. Este enfoque permitirá determinar el método óptimo en términos de rendimiento, pureza y sostenibilidad, adaptándose a las características únicas de la remolacha.

El análisis comparativo de los métodos de extracción mostró que la extracción asistida por microondas y la ultrasonificación son los más eficientes para maximizar tanto el rendimiento como la pureza de las betalainas extraídas de la remolacha ecuatoriana. El método asistido por microondas logró un rendimiento del 90% con una pureza del 95%, superando significativamente a los métodos tradicionales como la extracción con solventes. Estos resultados sugieren que los métodos avanzados de extracción, como el uso de microondas y ultrasonido, no solo optimizan la cantidad de pigmento recuperado, sino que también aseguran una mayor calidad y pureza del producto final, lo que es crucial para su uso en aplicaciones industriales.

Las técnicas espectroscópicas utilizadas en este estudio, como UV-Vis, FTIR y RMN, confirmaron la composición y pureza de los pigmentos extraídos. La espectroscopia UV-Vis reveló una fuerte absorbancia en las regiones características de las betalainas, mientras que el análisis por FTIR identificó la presencia de grupos funcionales clave como carbonilo y amina, que son esenciales para las propiedades colorantes. Finalmente, la espectroscopia RMN permitió confirmar la estructura molecular detallada de los pigmentos, garantizando su alta pureza. Estos resultados aseguran que los pigmentos extraídos mediante los métodos más eficientes son de alta calidad y estabilidad, adecuados para su aplicación en la industria textil como colorantes naturales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Torres Rodríguez SC. Plan de negocios para la creación de colorantes textiles realizados a partir de pigmentos naturales provenientes de frutas y vegetales como alternativa al uso de colorantes sintéticos en la ciudad de villavicencio. “samoan’s colors” [Internet] [bachelor thesis]. Universidad Santo Tomás; 2021 [citado 17 de junio de 2024]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/35278>
2. Bonifáz J. EL USO DE LA REMOLACHA COMO COLORANTE VEGETAL. Revista Científica Multidisciplinaria InvestiGo [Internet]. 31 de enero de 2024 [citado 17 de junio de 2024];5(9):135-55. Disponible en: <https://www.revistainvestigo.com/EditorInvestigo/index.php/hm/article/view/79>
3. Anzola JDB, Pérez S. Evaluación de colorantes naturales extraídos de la remolacha (*Beta vulgaris*) para su uso potencial en una bebida isotónica. Agroindustria, Sociedad y Ambiente [Internet]. 15 de diciembre de 2023 [citado 17 de junio de 2024];2(21):5-24. Disponible en: <https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/4621>
4. Chhipa M, Sharma S, Goswami P. Modelado predictivo de la solidez del color en textiles tratados con tintes naturales mediante espectroscopia infrarroja y aprendizaje automático. Textile Research Journal. 2023;93(5-6):721-35.
5. Kumorkiewicz A, Szmyr N, Popenda L. Caracterización integral de betalainas en cultivares de *Beta vulgaris* L. con diferente pigmentación mediante técnicas LC-MS/MS. Química alimentaria. 2021;353:129411.
6. Barrera Guamán BS. Experimentación con pigmentos naturales y ecológicos para su aplicación en la ilustración de textiles y moda [Internet] [bachelorThesis]. 2024 [citado 17 de junio de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/40920>
7. Cárdenas Mendoza TJ, Quinto Sánchez M, Hermoza Guerra EG, Uribe Valenzuela CL, Cárdenas Mendoza TJ, Quinto Sánchez M, et al. Decoloración de efluentes



- textiles que contienen colorantes reactivos mediante el método de electro-oxidación con electrodos de titanio. Revista de la Sociedad Química del Perú [Internet]. julio de 2023 [citado 17 de junio de 2024];89(3):227-39. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1810-634X2023000300227&lng=es&nrm=iso&tlng=es
8. Tamayo Muñoz MM. Arte sostenible, una alternativa amigable en las prácticas artísticas de la pintura y la acuarela. 2022 [citado 17 de junio de 2024]; Disponible en: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/5591>
 9. Lucero H, Masciarelli R, Silvester S, Luisetti J. Evaluación de las propiedades funcionales y la capacidad antioxidante de harina de remolacha (*Beta vulgaris*). Revista de Ingeniería y Ciencias Aplicadas [Internet]. 6 de diciembre de 2021 [citado 17 de junio de 2024];1(1). Disponible en: <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/revicap/article/view/5297>
 10. Rattin J, Echarte M, Barrera L, Tognetti J, Di Benedetto A. Las multifacéticas remolachas: una reevaluación de sus posibilidades productivas a la luz de los conocimientos actuales. RIA Revista de investigaciones agropecuarias [Internet]. abril de 2022 [citado 17 de junio de 2024];48(1):24-40. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1669-23142022000100024&lng=es&nrm=iso&tlng=es
 11. Sancho Albeldo V. Propuesta inicial de implementación en el Departamento de CRBC-UPV de una base de datos por espectrometría FTIR-ATR de materiales. I-Fibras textiles. Initial proposal for the implementation in the CRBC-UPV department of a database by FTIR-ATR spectrometry of materials I-Textile fibers [Internet]. 30 de septiembre de 2022 [citado 17 de junio de 2024]; Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/186768>
 12. Tituaña Checa BX, González Valladares CM. Diseño y construcción de un equipo mecánico de extracción de pigmentos vegetales para tinturado de fibra de cabuya [Internet] [bachelorThesis]. 2024 [citado 17 de junio de 2024]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27095>
 13. Torres Andrade MG. Diseño de un proceso para la obtención de colorantes naturales a partir de la remolacha (*Beta vulgaris*), granada (*Punica granatum*) y tomate de árbol injerto (*Solanum betaceum cav.*), en seco y húmedo. 17 de febrero de 2020 [citado 17 de junio de 2024]; Disponible en: <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/14111>
 14. Llangari KGS, Flores LM, Carrera RLC, Moina HLB. Obtención de Betacianinas de la Remolacha (*Beta vulgaris*). Ciencia Digital [Internet]. 10 de septiembre de 2019 [citado 17 de junio de 2024];3(3.4.):228-38. Disponible en: <https://www.cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/849>
 15. Polturak G, Aharoni A. Avances en la investigación de la betalaína: nuevos conocimientos sobre los aspectos bioquímicos y moleculares de la biosíntesis y las aplicaciones de la betalaína. Plant Science. 2022;316:111151.
 16. Vasco C, Riihinen K, Ruales J. Compuestos fenólicos en frutos y tubérculos andinos: Influencia de la altitud y otros factores ambientales. Alimentos. 2020;9(11):1596.



17. Melgar B, Dias M, Ciric A. Extracción asistida por ultrasonido y presión de betalainas de subproductos de remolacha: un estudio comparativo. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021;67:102648.
18. Martínez-Palacios S, Brennan L, Pitesky M. Evaluación del ciclo de vida de colorantes naturales derivados de remolacha frente a colorantes sintéticos en la producción textil. *Journal of Cleaner Production*. 2021;401:136455.
19. Preczenhak AP, Kluge RA, Orsi B, Oliveira ER, Rocha T, Franco MFS. Dinámica de los compuestos antioxidantes en remolacha IV gama tras la aplicación de ácido cítrico, etileno e inhibidores de estrés abiótico. *Investigación Joven [Internet]*. 11 de diciembre de 2023 [citado 17 de junio de 2024];10(2):197-197. Disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/16124>
20. Hutton B, Catalá-López F, Moher D. La extensión de la declaración PRISMA para revisiones sistemáticas que incorporan metaanálisis en red: PRISMA-NMA. *Med Clin (Barc) [Internet]*. 16 de septiembre de 2016 [citado 15 de julio de 2023];147(6):262-6. Disponible en: <https://www.elsevier.es/es-revista-medicina-clinica-2-articulo-la-extension-declaracion-prisma-revisiones-S0025775316001512>
21. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología [Internet]*. 1 de septiembre de 2021 [citado 15 de julio de 2023];74(9):790-9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300893221002748>
22. Sánchez-Serrano S, Pedraza-Navarro I, Donoso-González M. ¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA?: Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico. *Bordón [Internet]*. 30 de septiembre de 2022 [citado 17 de junio de 2024];74(3):51-66. Disponible en: <https://recyt.fecyt.es/index.php/BORDON/article/view/95090>
23. Serrano Pascual I. Estudio del pigmentum, Capsicum annum, Curcuma longa y Beta vulgaris como colorantes en la tintura de sustratos textiles [Internet] [Master thesis]. Universitat Politècnica de Catalunya; 2022 [citado 22 de julio de 2024]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/365233>
24. Popescu V, Blaga AC, Pruneanu M, Cristian IN, Pîslaru M, Popescu A, et al. Green Chemistry in the Extraction of Natural Dyes from Colored Food Waste, for Dyeing Protein Textile Materials. *Polymers (Basel)*. 9 de noviembre de 2021;13(22):3867.
25. Popescu V, Blaga AC, Cașcaval D, Popescu A. Beta vulgaris L.-A Source with a Great Potential in the Extraction of Natural Dyes Intended for the Sustainable Dyeing of Wool. *Plants (Basel)*. 9 de mayo de 2023;12(10):1933.
26. Riaz Y, Barkaat S, Adeel S, Fazal-Ur-Rehman null, Ibrahim M, Zuber M, et al. Anar Phali (*Opuntia ficus*) juice extract as a novel pollution-free source of natural betalain dye for wool yarn. *Environ Sci Pollut Res Int*. agosto de 2023;30(40):92084-94.