



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA BIOLÓGICA

TITULACIÓN DE INGENIERO QUÍMICO

Estudio de colorantes fotosensibles obtenidos de tres plantas de la región sur del Ecuador para ser aplicadas en celdas solares mediante espectrometría UV-Visible.

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Cabrera Bejarano, Marcela Victoria

DIRECTOR: Solano Cueva, Natalí Elizabeth, Ing.

LOJA-ECUADOR

2014

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

Ingeniera.

Natalí Elizabeth Solano Cueva

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: “Estudio de colorantes fotosensibles obtenidos de tres plantas de la región sur del Ecuador para ser aplicadas en celdas solares mediante espectrometría UV-Visible”, realizado por Marcela Victoria Cabrera Bejarano, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Agosto de 2014

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Marcela Victoria Cabrera Bejarano declaro ser autora del presente trabajo de fin de titulación: Estudio de colorantes fotosensibles obtenidos de tres plantas de la región sur del Ecuador para ser aplicadas en celdas solares mediante espectrometría UV-Visible, de la Titulación de Ingeniero Químico, siendo Natalí Elizabeth Solano Cueva directora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f).....

Marcela Cabrera Bejarano

CI. 1105171639

DEDICATORIA

A Dios por ser la fuerza que me impulsa cada día a seguir adelante. A mi familia, a la que quiero muchísimo y sin la que nunca podría haber llegado hasta aquí, y muy especialmente a mis Padres que son dos seres extraordinarios que con su apoyo, dedicación y paciencia me motivaron a culminar mi carrera. A mi novio Diego por animarme en los momentos de flaqueza, por ser incondicional, por soportarme y por darme su amor.

Marcela Victoria Cabrera Bejarano

AGRADECIMIENTO

A Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por darme la sabiduría y la fortaleza para poder concluir esta etapa de mi vida.

A mis padres por haberme apoyado con amor y sacrificio para mi formación personal y profesional.

A la Ing. Natalí Solano, por haber creído en mí, por su confianza y ayuda invaluable en la dirección de este trabajo quien con paciencia compartió sus conocimientos sin excepción alguna para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Al Ph. D. Vladimir Morocho e Ing. Celso Romero, por sus acertados comentarios, correcciones y enriquecimiento de esta tesis.

A la UTPL, su Titulación de Ingeniería Química y su personal Docente, por los valiosos conocimientos impartidos.

Al Departamento de Química, Sección Química Básica y Aplicada por brindarme sus instalaciones y equipos para poder desarrollar este trabajo de investigación.

A mis amigas Roció, Janeth y Karla por su apoyo incondicional y sus ocurrencias que nos sacaron un montón de sonrisas.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron para la realización de este trabajo de investigación

Marcela Victoria Cabrera Bejarano

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
Fin del proyecto	5
Propósito del proyecto	5
Componentes del proyecto	5
1. MARCO TEORICO	
1.1 Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes (DSSCs)	7
1.1.1 Electrodo.....	8
1.1.2 Electrolito o par redox.....	9
1.1.3 Contra-electrodo.....	9
1.1.4 Sensibilizador.....	10
1.1.4.1 Antocianinas.....	10
1.1.4.2 Betalaínas.....	12
1.2 Fuentes de colorantes.....	13
1.2.1 <i>Rubus glaucus</i> B.....	14
1.2.2 <i>Solanum americanum</i> Mill.....	14
1.2.3 <i>Beta vulgaris</i> L.....	15
1.3 Espectrofotometría UV-visible	16
1.3.1 Absorción de luz.....	17
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	
2.1 Proceso de extracción del colorante.....	20
2.1.1 Obtención del colorante.....	20
2.1.2 Diseño experimental.....	22
2.2 Celdas solares sensibilizadas con colorantes naturales	23
2.2.1 Proceso de ensamble de la celda solar.....	25

2.2.2 Caracterización y medición.....	26
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	
3.1 Análisis de varianza.....	29
3.2 Espectros de absorción en la región UV-visible de los colorantes.....	32
3.3 Efecto del pH.....	33
3.4 Caracterización de las celdas solares sensibilizadas con los colorantes naturales.....	35
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	
4.1 CONCLUSIONES.....	40
4.2 RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42
ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de una DSSC.	8
Figura 2. Estructura y sustituyentes de las antocianinas.	11
Figura 3. <i>Rubus glaucus</i> B	14
Figura 4. <i>Solanum americanum</i> Mill	15
Figura 5. <i>Beta vulgaris</i> L	15
Figura 6. Diagrama esquemático de experimento espectrofotométrico de haz simple	17
Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de extracción del colorante a optimizar	20
Figura 8. Maceración dinámica	21
Figura 9. Filtración al vacío del colorante	22
Figura 10. Muestras diluidas	23
Figura 11. Dimensiones de electrodo de óxido de titanio	24
Figura 12. Dimensiones del contra-electrodo de platino	24
Figura 13. Colorante extraído	24
Figura 14. Proceso de sensibilización de la celda	25
Figura 15. Celda sensibilizada con el colorante natural	25
Figura 16. Armado de la celda solar	25
Figura 17. Medición de voltaje e intensidad de las celdas solares	26
Figura 18. Intervalos de confianza del colorante <i>Rubus glaucus</i> .	29
Figura 19. Diagrama de efectos principales del colorante de <i>Rubus glaucus</i> B	30
Figura 20. Intervalos de confianza del colorante <i>Solanum americanum</i> .	31
Figura 21. Intervalos de confianza del colorante <i>Beta vulgaris</i> .	31
Figura 22. Espectros de absorción UV-VIS de los colorantes de <i>Rubus glaucus</i> y <i>Solanum americanum</i>	32
Figura 23. Espectro de absorción UV-VIS del colorante de <i>Beta vulgaris</i>	33
Figura 24. Estructura de la antocianina	33
Figura 25. Estructura de las betalainas	35
Figura 26. Curvas características de DSSCs corriente - voltaje sensibilizadas con: a) <i>Rubus glaucus</i> , b) <i>Solanum americanum</i> y c) <i>Beta vulgaris</i> .	36
Figura 27. Curva potencia-voltaje de las DSSCs naturales	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones del diseño experimental	22
Tabla 2. Tratamientos para la optimización de la extracción de los colorantes	22
Tabla 3. Combinaciones para la extracción de colorantes de las 3 especies.	32
Tabla 4. Influencia del pH de los colorantes en la eficiencia DSSCs	35
Tabla 5. Parámetros fotovoltaicos característicos de las DSSCs naturales	37

ABREVIATURAS

V_{oc}	Tensión de circuito abierto
I_{sc}	Corriente de cortocircuito
P_{max}	Potencia máxima
V_M	Voltaje máxima
I_M	Corriente máxima
PMP	Punto de máxima potencia
FF	Factor de forma o factor de llenado.
η	Eficiencia
λ	Longitud de onda
Abs	Absorbancia
P_o	Potencia luminosa o irradiación
GL	Grados de libertad
SC	Suma de cuadrados
CM	Cuadrado medio
F	Valor de F
P	Probabilidad
V	Voltios
mA	Microamperios
TiO₂	Dióxido de titanio
HCl	Ácido clorhídrico
EtOH	Etanol

RESUMEN

En el presente estudio de colorantes obtenidos de tres especies vegetales *Rubus glaucus* B, *Solanum americanum* Mill y *Beta vulgaris* L, se determinaron las condiciones óptimas de extracción de los colorantes, empleando un diseño factorial 2^4 .

Para la extracción de los colorantes naturales se utilizó etanol (95 %) - ácido clorhídrico (0,1 N) en una relación de 85:15. Los compuestos de cada extracto se determinaron por medio de espectrofotometría UV-visible, identificando como compuestos principales a las antocianinas y betalaínas.

Se observó que los colorantes naturales han mostrado un gran potencial como sensibilizadores en DSSCs. Las celdas solares sensibilizadas por los colorantes naturales de mora (*Rubus glaucus* B), mortiño (*Solanum americanum* Mill) y de remolacha (*Beta vulgaris* L) desarrollaron una eficiencia de 0.55 %, 0.20 %, y 0.02 %, respectivamente. Se determinó un voltaje de circuito abierto (Voc) 0.65 V, 0.5 V y 0,19 V para cada especie. Por último se registró una corriente de cortocircuito (Isc) de 19.68, 10.55 y 2.05 A, así como un factor de llenado (FF) 0.61 a 0.69.

Palabras claves: *Rubus glaucus* B, *Solanum americanum* Mill, *Beta vulgaris* L, celdas solar sensibilizadas por colorantes naturales, nanopartículas de TiO₂.

ABSTRACT

The present research about dyes obtained from three vegetal species *Rubus glaucus* B, *Solanum americanum* Mill y *Beta vulgaris* L, determined the optimal conditions for dyes extraction using a factorial design 2^4 .

For the natural dyes extraction it was used ethanol (95%) – hydrochloric acid (0.1 N) in an 85:15 ratio. The compounds of each extract were determined using UV-visible Spectrophotometry. Anthocyanins and betalains were identified as the main compounds.

It was observed that natural dyes have shown great potential as sensitizers in DSSCs. DSSCs sensitized by natural dyes extracted from blackberry (*Rubus glaucus* B), mortiño (*Solanum americanum* Mill) and beet (*Beta vulgaris* L), developed an efficiency of 0.55%, 0.20% and 0.02%, respectively. Also, open-circuit voltage (Voc) 0.65 V, 0.5 V and 0.19 V, for each species was determined. Finally, for these species it was registered a circuit current (Isc) of 19.68, 10.55 and 2.05 mA/cm², and a fill factor (FF) from 0.61 to 0.69 too.

Keywords: *Rubus glaucus* B, *Solanum americanum* Mill, *Beta vulgaris* L, dye-sensitized solar cell, natural dyes, nanoparticles TiO₂

INTRODUCCIÓN

Los dos retos más grandes que encara la humanidad en el siglo XXI son el incremento global de la demanda de energía y el control del nivel de emisiones de CO₂ para regular el efecto invernadero, dada la creciente preocupación por el calentamiento global y el cambio climático. Por lo cual surge la necesidad en el desarrollo de fuentes de energías alternativas por medio del desarrollo de energías renovables, asegurando protección y armonía con el medio ambiente.¹

La energía solar se constituye como una fuente de energía limpia, abundante y renovable, convirtiéndose así en una de las alternativas con más futuro para reducir el consumo de las actuales fuentes de energía contaminantes generadas a partir de combustibles fósiles.²

Sin embargo la producción de energía eléctrica a partir de la luz solar requiere el desarrollo de celdas solares eficientes de menor costo que el alcanzado en la actualidad, puesto que las celdas solares que se encuentran entre las más difundidas son las basadas en silicio, las cuales resultan muy costosas en su proceso de fabricación y por consiguiente en el mercado, no pudiendo así competir con otras fuentes de energía, que aunque contaminan más, representan un costo mucho menor al usuario.³

Las celdas solares sensibilizadas por colorantes (Dye-sensitized solar cells, DSSCs, por sus siglas en inglés), han despertado un gran interés desde su publicación en 1991 por O'Regan y Grätzel, debido a que representan una alternativa potencial y relativamente económica en comparación con el silicio que son actualmente los más utilizados.⁴

La DSSC se compone de: un electrodo o ánodo, un contra-electrodo o cátodo, electrolito redox (de reducción y oxidación) y sensibilizador.⁵ En estas celdas, el colorante sensibilizador juega un papel clave en la absorción de la luz solar y la transformación de energía solar en energía eléctrica.

En la actualidad se utilizan numerosos complejos de metales y colorantes orgánicos que han sido sintetizados y utilizados como sensibilizadores. Por el momento, la mayor eficiencia en DSSCs se da por Ru que contienen compuestos absorbidos en TiO₂ nanocrystalino alcanzando un 11-12%.⁶

Aunque tales DSSCs han proporcionado un rendimiento relativamente alto, hay varias desventajas de la utilización de metales nobles debido a que son considerados como recursos limitados en cantidad, por lo tanto su producción es costosa. Por otro lado los colorantes orgánicos, no sólo resultan más económicos, también alcanzan una eficiencia de

9,8%.⁷ Sin embargo, los tintes orgánicos han presentado a menudo problemas debido a las rutas sintéticas complicadas.

Los colorantes naturales encontrados en flores, frutos, hojas o raíces de las plantas que pueden ser extraídos por métodos simples, además de su bajo costo, no toxicidad, y biodegradación completa, son una alternativa viable para la aplicación en DSSCs. Hasta ahora se han utilizado varios colorantes naturales como sensibilizadores de celdas solares.⁸ Pero en la actualidad, son todavía demasiado ineficientes para ser vendidas competitivamente.

Por tanto, uno de los retos que se plantea es encontrar el mejor método de extracción de tres colorantes naturales que sirvan como sensibilizadores de las celdas solares.

Las especies seleccionadas para la extracción de colorantes naturales son:

1. *Rubus glaucus* B.
2. *Solanum americanum* Mill.
3. *Beta vulgaris* L.

Las plantas fueron seleccionadas por la presencia de colorantes con compuestos que tienen la capacidad de captar energía solar, como son las antocianinas y betalaínas.

El análisis de los pigmentos extraídos se realizará empleando técnicas de Espectrofotometría UV-Visible que es la técnica que utiliza la luz para medir concentraciones químicas.⁹

El Departamento de Química, específicamente la sección de Química Básica y Aplicada busca mediante este estudio inmiscuirse en una nueva línea de investigación, ya que los colorantes naturales extraídos de estas plantas tienen como finalidad la aplicación en DSSCs y analizar la eficiencia que se obtiene en la celda al utilizar estos colorantes.

Fin del proyecto

Aprovechar la energía solar, como una fuente de energía alternativa y renovable, mediante la aplicación en celdas solares sensibilizadas por colorantes naturales.

Propósito del proyecto

Estudiar los pigmentos naturales fotosensibles obtenidos a partir de plantas de la región sur del Ecuador los cuales serán aplicados en celdas solares.

Componentes del proyecto

- Extraer tres pigmentos naturales con las condiciones más óptimas determinadas mediante un diseño factorial 2^4 , utilizando MINITAB.
- Determinar el espectro de absorción de cada pigmento natural y definir cuál es la longitud de onda máxima para su aplicación en las celdas solares.
- Sensibilizar las celdas con los pigmentos naturales durante el proceso de montaje y producir energía eléctrica mediante DSSCs.

1. MARCO TEORICO

1.1 Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes (DSSCs)

Las celdas solares sensibilizadas por colorantes son dispositivos que producen electricidad mediante la conversión de la energía luminosa de una manera similar a la fotosíntesis.¹⁰

Están formadas por: un electrodo o ánodo compuesto por un semiconductor nanocrystalino poroso con un colorante que es absorbido en su superficie, un contra-electrodo o cátodo, y un electrolito que contiene iones yodo y triyoduro. En estas celdas, el colorante sensibilizador juega un papel clave en la absorción de la luz solar y la transformación de energía solar en energía eléctrica.⁶

El electrodo y el contra-electrodo están hechos de un vidrio específico recubierto de óxido conductor transparente (TCO) en un lado. El material de TCO es una capa delgada de óxido de estaño dopado con flúor, también llamado FTO. La transparencia del sustrato permite que la luz del sol ingrese a la celda, mientras que su superficie conductora recoge cargas.⁵

El sistema de operación de una celda DSSC es el siguiente:

1. El colorante pasa al estado excitado cuando captura la luz visible en el rango coincidente con su banda de absorción, cuyo máximo se centra en 535 nm.
2. El colorante inyecta electrones en la banda de conducción del TiO_2 , quedando así positivamente cargado.
3. Los electrones inyectados en la banda de conducción del dióxido de titanio viajan por la red nanocrystalina hasta encontrar el sustrato conductor por donde acceden al circuito externo.
4. Por otro lado, el colorante vuelve a su estado original tomando electrones de los iones I^- presentes en el electrolito que pasan a formar I_3^- , estos últimos se regeneran a su vez en el contra-electrodo, reacción catalizada por la presencia de un recubrimiento de platino en el ánodo, cerrándose así el circuito.¹ Ver figura 1.

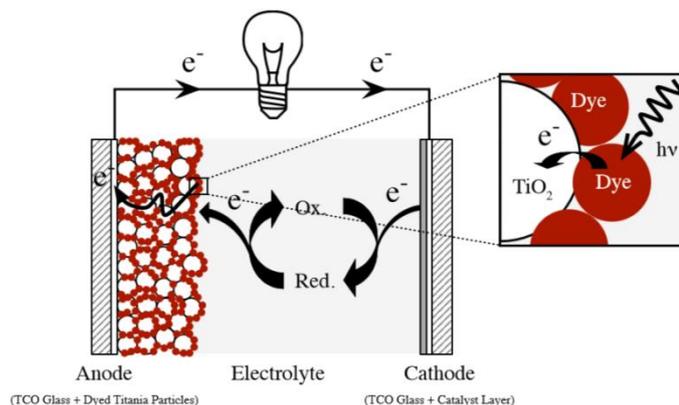


Figura 1. Estructura de una DSSC.

Fuente: Solaronix 2012.

1.1.1 Electrodo.

El electrodo también llamado ánodo, tiene una capa de banda ancha de unas pocas micras de espesor de óxido semiconductor como el TiO_2 , o pueden ser óxidos como ZnO , SnO_2 .¹¹ En esta investigación se ha utilizado TiO_2 .

El TiO_2 , es un semiconductor blanco que no es sensible a la luz visible. Por lo cual las partículas de óxido de titanio tienen que ser sensibilizadas con una capa de moléculas de colorante, capaces de absorber la luz en el espectro visible.⁵

El electrodo de TiO_2 consiste en colocar una capa de nanopartículas de TiO_2 sobre una placa de vidrio TCO y se sinteriza entre 450 y 500°C, produciendo una película de TiO_2 de alrededor de 10 μm de espesor. Esta película tendrá una estructura nanoporosa, ya que el tamaño de sus partículas será de entre 10 y 30 nm.

Normalmente, esta película de TiO_2 contiene también partículas más grandes (250-300 nm), que pueden dispersar fotones incidentes eficazmente, para mejorar la captación de luz. La porosidad de la película es también importante porque el electrolito, que contiene los iones redox, debe ser capaz de penetrar en la película.¹²

Entre los materiales semiconductores de óxidos utilizados para fabricar estos electrodos, el TiO_2 es el más ampliamente recomendado dado que posee las siguientes características:

- Excelentes propiedades físicas, químicas y ópticas.
- Buena estabilidad química bajo la irradiación de la luz, es decir, no presenta fotocorrosión.
- No es tóxico y tiene bajo costo.¹³

1.1.2 Electrolito o par redox.

El electrolito utilizado en las DSSCs contiene iones I^-/I_3^- , cuyos electrones se encuentran entre el electrodo de TiO_2 y el contra-electrodo. Se emplean mezclas de yoduros como LiI , NaI , KI , y otros complejos basados en el yodo. La viscosidad de la solución afecta directamente a la conductividad de los iones en el electrolito, y en consecuencia al rendimiento de la celda, por lo que es deseable una baja viscosidad para mejorar el rendimiento.¹⁴

La razón por la cual el par redox yoduro / triyoduro es el más utilizado, se debe al valor de su potencial redox que es óptima para la regeneración del colorante.

La pareja redox, en particular, debe responder a algunas características importantes para el funcionamiento óptimo:

- Su potencial redox debe ser colocado correctamente con respecto a la del sensibilizador.
- Debe ser soluble en el disolvente y tener un buen coeficiente de difusión.
- No debe absorber la radiación de luz en la misma región espectral que el colorante.
- Debe ser estable y químicamente inerte con respecto a los otros componentes de las DSSCs.¹⁵

1.1.3 Contra-electrodo.

El cátodo se refiere con frecuencia como el contra-electrodo. En el cual se reducen iones triyoduro (I_3^-) a iones I^- . Para reducir los iones tri-yoduro, el contra-electrodo debe tener una alta actividad electrocatalítica. Por ello como contra-electrodo se suele utilizar un sustrato de óxido conductor transparente revestido de platino ($5-10 \mu g$ por cm^2 o aproximadamente 200 nm de espesor) o bien revestido de carbono.¹⁴ Cualquiera de ellos puede ser utilizado como un cátodo para hacer una DSSC.

El platino es conocido por su fuerte actividad catalítica en la transferencia de electrones en el contra-electrodo. Un cátodo eficiente para una DSSC puede consistir en una capa de platino delgada sobre un sustrato de TCO.

El contra-electrodo de una DSSC se hace con frecuencia con platino, pero el carbono demuestra también actividad catalítica interesante. La alternativa del carbono es buena a pesar de ser menos eficiente que el platino.⁵

1.1.4 Sensibilizador.

Un colorante debe cumplir varios requisitos para que pueda dar buenos resultados como sensibilizador en DSSC:

- Debe absorber un amplio espectro de longitudes de onda.
- Poseer el nivel de energía del estado excitado a energías superiores a la banda de conducción y la energía del estado fundamental menor que el potencial de la pareja redox del mediador de electrones.
- También hay que tener grupos funcionales adecuados para unirse al titanio (por lo general-COOH), buena estabilidad química y fotoquímica y una buena solubilidad para que el proceso de sensibilización sea eficiente.¹⁵

Los colorantes sensibilizadores, se encuentran sintéticos y naturales. Algunos ejemplos de colorantes sintéticos se encuentran complejos que contienen rutenio y zirconio, pero sus síntesis son de altos costos. Los naturales son fáciles de preparar, barato, no tóxico, respetuoso del medio ambiente y totalmente biodegradable. Entre los colorantes naturales, tres principales familias de compuestos se pueden utilizar como sensibilizador en DSSCs: clorofilas, antocianina y betalaínas,¹⁶ ya que estas moléculas tienen un funcionamiento similar en las plantas al ser buenos oxidantes y atrapar la luz solar y los radicales libres para la producción de fotones.¹⁷

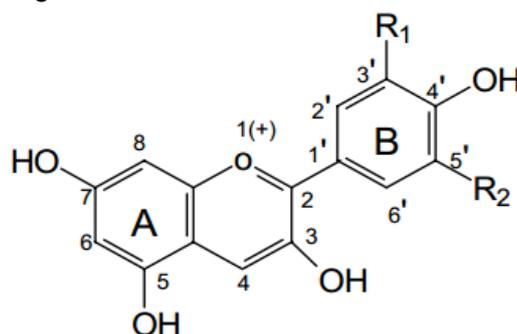
Este tipo de celdas solares serán sensibilizadas con colorantes naturales de plantas que presenten la característica de captar energía solar, enfocándonos en antocianinas y betalaínas.

1.1.4.1 Antocianinas.

Las antocianinas están consideradas dentro del grupo de los flavonoides, ya que poseen el esqueleto característico C6-C3-C6 y el mismo origen biosintético, pero difieren en que absorben fuertemente en la región visible del espectro.¹⁸

Las antocianinas son responsables de los colores de diversos frutos, flores, hojas; sus colores van desde rojos hasta azules ¹⁹ y representan los principales pigmentos solubles en agua visibles al ojo humano.

La estructura que poseen las antocianinas es muy semejante entre ellas, están compuestas por dos anillos aromáticos A y B unidos por una cadena de 3 carbonos ¹⁷ Figura 2. El nivel de hidroxilación y metilación en el anillo "B" de la molécula determina el tipo de antocianidina, que es la aglicona de la antocianina.



Aglicona	Substitución		λ_{\max} (nm)
	R1	R2	
Pelargonidina	H	H	494 (naranja)
Cianidina	OH	H	506 (naranja-rojo)
Delfinidina	OH	OH	508 (azul-rojo)
Peonidina	OCH3	H	506 (naranja-rojo)
Petunidina	OCH3	OH	508 (azul-rojo)
Malvidina	OCH3	OCH3	510 (azul-rojo)

Figura 2. Estructura y sustituyentes de las antocianinas.

Fuente: Quintero, C. 2004

Aunque se han descrito doce diferentes antocianidinas, las más comunes en plantas son: pelargonidina, cianidina, delfinidina, peonidina, petunidina y malvidina. Las tres primeras son más frecuentes en frutos, en tanto que el resto lo son en flores.²⁰

Los factores que alteran la estabilidad de las antocianinas son:

- **Efecto del pH:** las antocianinas son más estables en un medio ácido que en un medio neutro o alcalino.
- **Efecto de la temperatura:** son notoriamente destruidos por el calor durante su procesamiento y almacenamiento.
- **Dióxido de sulfuro:** enzima que destruye a las antocianinas, se utiliza para blanqueo irreversible.

- **Oxígeno y ácido ascórbico:** contribuye a la degradación de antocianinas. La pérdida de antocianinas ante la presencia de oxígeno depende del pH.²¹

1.1.4.2 Betalaínas.

Las betalaínas son pigmentos hidrosolubles, dichos compuestos son derivados del ácido betalámico. Las betalaínas están constituidas por dos grupos de estructuras: las Betacianinas y las Betaxantinas, ambos grupos de moléculas son ópticamente activas ya que poseen dos centros quirales en C-2 y C-15. La hidrólisis de la Betacianina produce Betanidina, o el epímero en C-15 Isobetanina o una mezcla de las dos agliconas. La diferencia principal entre las Betacianinas y las Betaxantinas es que las primeras poseen un grupo glicósido y las segundas poseen un grupo indol.²²

Son parecidas a las antocianinas y flavonoides en apariencia visual. Anteriormente se les llamaba antocianinas nitrogenadas. Estos pigmentos se encuentran sólo en 10 familias de vegetales, todas pertenecientes al orden Caryophyllales: Aizoaceae, Amaranthaceae, Basellaceae, Cactaceae, Chenopodiaceae, Didiereaceae, Holophytaceae, Nyctaginaceae, Phytolaccaceae y Portulacaceae.²³ También se han encontrado algunas betalaínas de origen fúngico en el hongo venenoso *Amanita muscaria*. Las betalaínas, al igual que las antocianinas, se acumulan en las vacuolas celulares de las flores, frutas y hojas que las sintetizan, principalmente en la epidermis y la subepidermis.²⁴

Estructura química de betaxantinas y betacianinas.

Las betaxantinas, de color amarillo-naranja, se forman por condensación de ácido betalámico con aminas o aminoácidos. En la betaxantina, el anillo ciclodopa de la betacianina es desplazado por un grupo amino o por un aminoácido; por lo que puede haber más de 200 betaxantinas.

Las betacianinas son pigmentos rojo-púrpura, y se forman por condensación de ácido betalámico con derivados de ciclodopa. Estos compuestos pueden estar glicosilados. Los glucósidos o glicósidos se forman por reacción del grupo alcohol de una molécula con otro grupo alcohol perteneciente a un azúcar (monosacárido u oligosacárido). En esta reacción se forma un enlace glicosídico con pérdida de una molécula de agua. A la parte no glucídica (no azúcar) del compuesto resultante se le llama aglicón. El aglicón se presenta en dos formas isoméricas, como betanina e isobetanina en la remolacha, y como amarantina e isoamarantina en el amaranto. Sin embargo, también existen otras formas, de acuerdo con el sustituyente unido al aglicón. Las betacianinas absorben luz a 537 nm y las betaxantinas a 480 nm.²⁵

La estabilidad de las betalaínas es restringida, debido a que su color se altera por varios factores:

- **Efecto del pH:** el cambio de color con el pH es menos marcado que el que presentan las antocianinas.

El color permanece inalterado en un intervalo de pH de 3 a 7; por debajo del pH 3.0 el color cambia a violeta, y su intensidad decrece. Por encima del pH 7.0, el color es más azulado debido a un efecto batocrómico o desplazamiento hacia el rojo.²⁶

- **Efecto de la temperatura:** las betalaínas son muy sensibles a la temperatura. Los enlaces glucosídicos son muy sensibles a la ruptura en altas temperaturas, así como a reacciones de oxidación, lo que iniciará una polimerización que dará productos similares a las melaninas.²⁵
- **Efecto de la actividad del agua:** Son estables en productos deshidratados. La betanina se vuelve más inestable a medida que se aumenta la actividad de agua y el contenido de humedad del alimento; por esta razón, los sólidos de remolacha deben almacenarse con la menor cantidad de agua posible y en las condiciones más secas.²⁵

2.2 Fuentes de colorantes

Las plantas que se han utilizado para la extracción de colorantes han sido seleccionadas por ser consideradas fuentes ricas, ya sea en antocianinas o en betalainas. Las mismas que pueden estar presentes en frutos, hojas, flores o raíz de las plantas, especialmente enfocados en sus pigmentos de color rojo a púrpura.

Las plantas seleccionadas como fuentes de colorantes son:

- *Rubus glaucus* B (mora)
- *Solanum americanum* Mill (mortiño)

La extracción del colorante en estas dos plantas se realizó específicamente de los frutos de las mismas, por la abundante presencia de antocianinas en ellos.

- *Beta vulgaris* L (remolacha)

En esta planta se utilizó la raíz debido a la gran presencia de betalaínas, las cuales le dan su color característico.

1.2.1 *Rubus glaucus* B.



Figura 3. *Rubus glaucus* B
Fuente: La Autora

Nombre común: Mora

Nombre científico: *Rubus glaucus* B

Reino: Plantae

División: Angiospermae

Clase: Magnoliopsida

Orden: Rosales

Familia: Rosaceae

Género: *Rubus*

Especie: *glaucus*²⁷

Es una planta perenne, de naturaleza trepadora con tallos semirrectos de longitud variable, conformada por varios tallos espinosos que pueden crecer a veces hasta 3 metros de largo, redondeados, espinosos, ramificados.²⁸

La fruta es esférica o elipsoidal de tamaño variable, 1,5 a 2.5 cm. en su diámetro más ancho, de color verde cuando se están formando, pasando por un color rojo hasta morado oscuro cuando se maduran. El fruto, es una baya formada por pequeñas drupas adheridas que le dan la forma cónica ovalada, con punta redondeada.²⁹

Las moras son frutos con bajo valor calorífico por su escaso aporte de carbohidratos. Sin embargo son muy ricas en vitamina C, aportan fibra, potasio y calcio, taninos (sustancias con acción astringente) y diversos ácidos orgánicos. Se caracterizan por su contenido de pigmentos naturales, tales como las antocianinas, que le dan el color a la mora.²⁹

1.2.2 *Solanum americanum* Mill.

Nombre común: Mortiño



Figura 4. *Solanum americanum* Mill
Fuente: La Autora

Nombre científico: *Solanum americanum* Mill

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Solanales

Familia: Solanaceae

Género: *Solanum*

Especie: *americanum*

El mortiño se encuentra distribuido en los Andes ecuatorianos, al norte desde la provincia del Carchi hasta el sur con la provincia de Loja. Los nombres vulgares con los cuales se conoce al mortiño en Ecuador son: mortiño, uva de los Andes, uva de monte.³⁰

Es un arbusto y algunas especies crecen entre 2 a 3 metros de altura, otras son diminutas y postradas. Las partes de la planta de mortiño tales como las hojas contienen flavonoides, el fruto es una baya esférica de 5 a 8 mm de diámetro, al ser de color negro evidencia la alta concentración de antocianinas,³¹ además contienen azúcar invertido, ácidos orgánicos, mirtalina, taninos, pectina, vitamina B y C.³²

1.2.3 *Beta vulgaris* L.



Figura 5. *Beta vulgaris* L
Fuente: La Autora

Nombre Común: Remolacha

Nombre Científico: *Beta vulgaris* L

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Orden: Caryophyllales

Familia: Amaranthaceae

Género: *Beta*

Especie: *vulgaris*³³

La remolacha en su primer año desarrolla una gruesa raíz napiforme y una roseta de hojas, durante el segundo, emite una inflorescencia ramificada en panícula, pudiendo alcanzar ésta hasta un metro de altura. Es una planta herbácea de vida corta, sin pelo, con un tamaño de 0.6 a 1 m de alto, posee un tallo: Ramificado en la parte superior, verdes o a veces rojizos con hojas alternas, algo carnosas, las basales dispuestas en roseta, grandes (de hasta 20 cm de largo), pecioladas, a veces con el margen, las hojas superiores más chicas.²⁵

Raíces muy engrosadas, a veces creciendo como una verdura (betabel), casi esférica de forma globosa, en algunas variedades plana o alargada. Posee un diámetro de entre 5 y 10 centímetros y puede pesar entre 80 y 200 gramos.

Su color es variable, desde rosáceo a violáceo y anaranjado rojizo hasta el marrón. La pulpa suele ser de color rojo oscuro y puede presentar en ocasiones círculos concéntricos de color blanco. El color se debe a dos pigmentos que se encuentran en ella: La Betacianina y la Betaxantina.³³

1.3 Espectrofotometría UV-visible

La identificación de la presencia de antocianinas en los colorantes obtenidos de frutos (mora y mortiño), además de la identificación de betalainas en el colorante obtenido de la remolacha se puede realizar mediante espectrofotometría UV-visible.

El color de una sustancia depende de la capacidad de la misma de absorber o reflejar las radiaciones lumínicas correspondientes al espectro visible lo cual es la zona del espectro electromagnético a la que es sensible el ojo humano.

La espectrofotometría (UV/Vis) se utiliza para identificar algunos grupos funcionales de moléculas, y además, para determinar el contenido y fuerza de una sustancia.³³

Las propiedades espectrales son a menudo usadas para la caracterización de antocianinas, especialmente para identificar el tipo de antocianina. El análisis espectrométrico UV es la técnica usada comúnmente para identificar y cuantificar antocianinas. Como se describió anteriormente, el espectro de absorción de las antocianinas depende del pH.³⁴

1.3.1 Absorción de luz.

Cuando una molécula de luz absorbe un fotón aumenta la energía de la molécula. Se dice que la molécula ha pasado a un estado excitado. Si una molécula emite un fotón, disminuye la energía de la molécula.

Requisitos mínimos de un espectrofotómetro (aparato para medir la absorbancia de la luz). La luz se hace pasar a través de un monocromador (prisma, red de difracción o incluso un filtro) para seleccionar una longitud de onda. La luz de una sola longitud de onda se llama monocromática. La luz monocromática, con una irradiación P_0 , incide en una muestra de longitud b . La irradiancia del haz que emerge por el lado opuesto de la muestra es P . Ver figura 6.

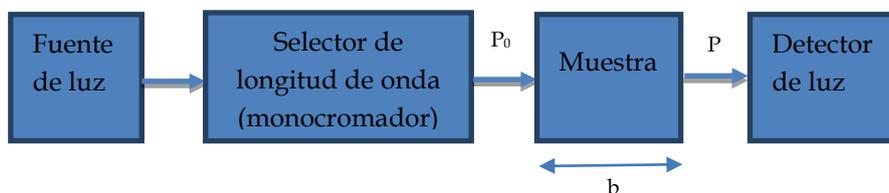


Figura 6. Diagrama esquemático de un experimento espectrofotométrico de haz simple.

Fuente: Harris, D. 2007

La transmitancia, T se define como la fracción de la luz incidente que pasa a través de la muestra.

$$T = \frac{P}{P_0}$$

La absorbancia se define como:

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) = -\log T$$

La absorbancia es directamente proporcional a la concentración, de la especie que absorbe la luz en la muestra.

Ley de Beer:

$$A = \epsilon bc$$

La absorbancia es adimensional. La concentración de la muestra, c , normalmente viene dada en unidades de mol/L (M). El camino óptico, b , normalmente se expresa en centímetros. La cantidad ϵ se llama absorptividad molar y sus unidades $M^{-1} \text{ cm}^{-1}$. La absorptividad molar es la característica de una sustancia que nos dice cuánta luz absorbe una longitud de onda determinada.

La parte de una molécula responsable de la absorción de la luz se llama cromóforo. Toda sustancia que absorbe luz visible aparece coloreada cuando transmite o refleja luz. La sustancia absorbe ciertas longitudes de onda de luz blanca, y nuestros ojos detectan las longitudes de onda que no se absorben. El color observado se llama el complementario del color absorbido.⁹

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Proceso de extracción del colorante

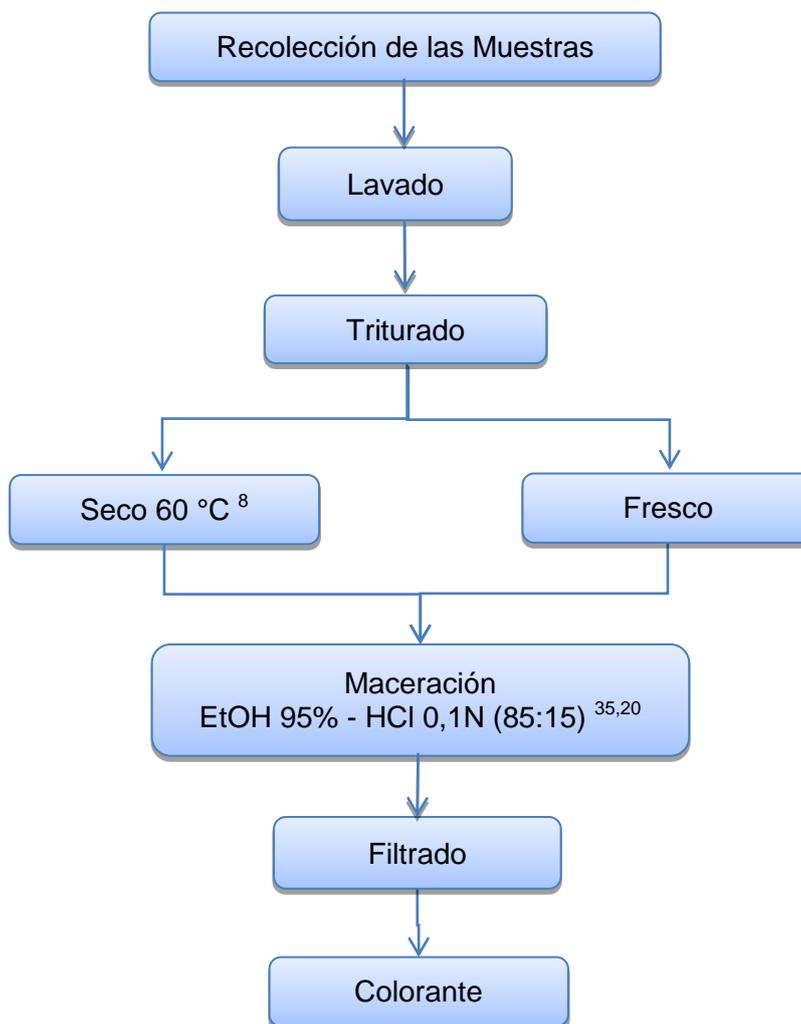


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de extracción del colorante a optimizar

Fuente: La Autora

2.1.1 Obtención del colorante.

Recolección de las muestras:

Las especies *Beta vulgaris* L y *Rubus glaucus* B se recolectaron en el mes de abril del 2013 y la especie *Solanum americanum* Mill en el mes de octubre del mismo año en el Mercado Mayorista de la ciudad de Loja.

Las especies fueron identificadas en el herbario de la Universidad Técnica Particular de Loja.

Selección:

Se realizó una inspección visual con la finalidad de ver que el material este en buenas condiciones de sanidad y de color, seleccionando las que cumplieran con estas condiciones.

Lavado:

Se hizo lavado con agua destilada con el fin de separar suelos y materiales extraños.

Trituración:

El material vegetal se trituro con la finalidad de reducir su tamaño.

Secado:

Una parte del material vegetal triturado se secó por 1 día a 60°C en la estufa para extraer la humedad y otra parte se trabajó con el material fresco.

Pesaje:

Se utilizó una balanza METTLER semianalítica con precisión de 0,5 gr. y 3.100 gr. de capacidad.

Extracción:

Se realizó mediante maceración estática y dinámica. Para la maceración dinámica se utilizó una plancha de agitación (Figura 8). Como disolvente se utilizó una mezcla de etanol al 95% y ácido clorhídrico 0.1N (85:15), el cual es el método más usado en la extracción de la este tipo de colorantes.^{35, 20}

Los colorantes de estas especies son solubles en solventes polares y comúnmente se extraen de sus fuentes naturales usando metanol o etanol con pocas cantidades de algunos ácidos como ácido clorhídrico.³⁶



Figura 8. Maceración dinámica

Fuente: La Autora

Filtrado:

Para separar la materia sólida de la solución del colorante, se procedió a filtrar a vacío con la ayuda de una bomba de succión, un embudo Büchner y papel filtro, se recogió el filtrado en un matraz volumétrico (Figura 9).



Figura 9. Filtración al vacío del colorante

Fuente: La Autora

2.1.2 Diseño experimental.

Para la optimización del proceso de extracción de los colorantes se aplicó un diseño factorial 2^k , con 4 variables (Tabla 1), el diseño resultante fue un 2^4 por lo que se requirió realizar 16 experimentos.

Tabla 1. Condiciones del diseño experimental

Factor	Variables	Niveles	
A	Tipo de material	1	Fresco
		-1	Seco
B	Cantidad de material	1	60g
		-1	20g
C	Tipo de maceración	1	Dinámica
		-1	Estática
D	Tiempo de extracción	1	3 días
		-1	1 día

Fuente: La Autora

El diseño factorial 2^4 se realizó con dos réplicas por cada tratamiento, lo que implicó hacer 32 experimentos por cada especie. En la tabla 2 se detallan los tratamientos. Se consideró como variable respuesta la absorbancia.

Tabla 2. Tratamientos para la optimización de la extracción de los colorantes

Nº	A	B	C	D
1	Seco	20g	Estático	1 día
2	Fresco	20g	Estático	1 día
3	Seco	60g	Estático	1 día
4	Fresco	60g	Estático	1 día

5	Seco	20g	Dinámico	1 día
6	Fresco	20g	Dinámico	1 día
7	Seco	60g	Dinámico	1 día
8	Fresco	60g	Dinámico	1 día
9	Seco	20g	Estático	3 días
10	Fresco	20g	Estático	3 días
11	Seco	60g	Estático	3 días
12	Fresco	60g	Estático	3 días
13	Seco	20g	Dinámico	3 días
14	Fresco	20g	Dinámico	3 días
15	Seco	60g	Dinámico	3 días
16	Fresco	60g	Dinámico	3 días

Fuente: La Autora

Se utilizó un espectrofotómetro UV-Visible marca Thermo Spectronic modelo Helios Beta, en el que se realizaron las lecturas espectrofotométricas para conocer la absorbancia de los colorantes extraídos. Aplicando un factor de dilución de 40 y la absorbancia de cada una de las muestras se leyó en un rango de longitud de onda (λ) de 350 – 700 nm.



Figura 10. Muestras diluidas

Fuente: La Autora

Realizados todos los experimentos se seleccionaron las condiciones de trabajo para la extracción del colorante, en el cual se obtuvo una mayor absorbancia.

2.2 Celdas solares sensibilizadas con colorantes naturales

Los materiales de la celda solar se los adquirió en la empresa Solaronix® con sede en Lausana (Suiza), quienes produce todos los componentes necesarios para la preparación de DSSCs. Se adquirió el electrodo, el contra electrodo de platino y el electrolito. Especificaciones se muestran en el Anexo 1.

Electrodo: este electrodo o ánodo contenía una capa de óxido de titanio transparente (Figura 11).



Figura 11. Dimensiones de electrodo de óxido de titanio

Fuente: La Autora

Contra-electrodo: el contra electrodo o cátodo de platino es transparente y provisto de dos orificios para la adición del electrolito después de haber sellada con el electrodo (Figura 12).



Figura 12. Dimensiones del contra-electrodo de platino

Fuente: La Autora

Sensibilizador: con el método de extracción optimizado, se obtuvo los 3 colorantes para sensibilizar las celdas solares (Figura 13).



Figura 13. Colorante extraído

Fuente: La Autora

2.2.1 Proceso de ensamble de la celda solar.

El electrodo de óxido de titanio se sumergió en el colorante extraído, este proceso de sensibilización duró de una hora a dos, con la finalidad que las moléculas del colorante se puedan impregnar en el electrodo (Figura 14).



Figura 14. Proceso de sensibilización de la celda

Fuente: La Autora

Pasado el tiempo de sensibilización se limpió el electrodo con etanol y se secó al ambiente. (Figura 15).



Figura 15. Celda sensibilizada con el colorante natural

Fuente: La Autora

El electrodo de óxido de titanio se unió con el contra-electrodo de platino y se sujetaron con pinzas. Finalmente el electrolito se inyectó a través de dos orificios del contra electrodo (Figura 16).



Figura 16. Armado de la celda solar

Fuente: La Autora

2.2.2 Caracterización y medición

Las pruebas de las celdas solares sensibilizadas con los colorantes naturales, se realizaron entre las 12:00 del día y las 14:00pm para tomar la mayor cantidad de energía radiante.

Al exponer las celdas a las radiaciones solares se midió el voltaje y corriente producida por la celda utilizando un multímetro digital profesional marca TRUPER MUT-39 (Figura 17) con estos datos se proyectó las curvas características de corriente-voltaje (I-V). Para las pruebas se utilizó 3 celdas con un área activa de 16 cm².

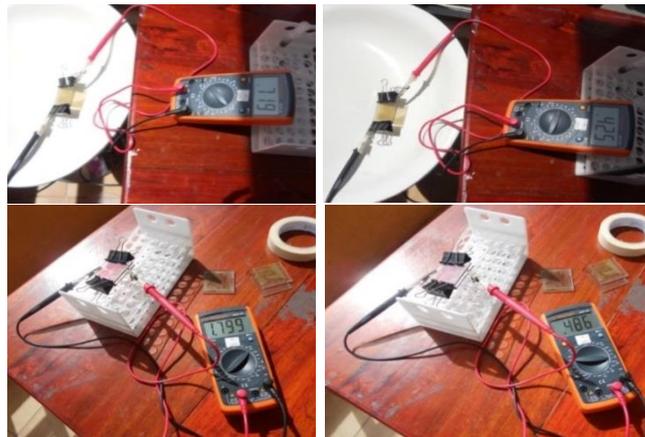


Figura 17. Medición de voltaje e intensidad de las celdas solares

Fuente: La Autora

El rendimiento de las celdas solares sensibilizadas con los colorantes naturales fue evaluado mediante los parámetros fotovoltaicos característicos. A continuación se define la nomenclatura usada para estos parámetros:

- V_{OC} (Tensión de circuito abierto): Es el máximo valor de tensión en extremos de la celda solar y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga por lo tanto la corriente que se extrae de la celda es nula.
- I_{SC} (Corriente de cortocircuito): Es la corriente que se obtiene de la célula cuando la tensión en sus terminales es de cero voltios. Constituye la máxima corriente que circula por una celda solar.
- P_{max} (Potencia máxima): Es el producto del voltaje (V_M) y corriente (I_M) en el punto de máxima potencia (PMP), en este punto de funcionamiento la potencia entregada a una carga es máxima.

$$P_{max} = V_M I_M$$

- FF (Factor de forma o factor de llenado): Este parámetro es indicativo de la calidad de la celda y se calcula como el cociente de potencia máxima que se puede entregar

a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}}$$

- η (eficiencia): Expresada en %, es la relación entre la potencia que se obtiene de la célula respecto de la irradiancia (W/m^2) incidente sobre ella:

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{AP_0} 100$$

donde P_0 es la potencia luminosa por unidad de área que se recibe del sol (en condiciones estándar, $1000 W/m^2$) y A es el área de la celda.³⁷

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Análisis de varianza

Los experimentos realizados de acuerdo a la combinación de factores fueron un total de 32 ensayos por cada especie (Anexo 2). Los datos obtenidos se evaluaron mediante el uso del software Minitab, en el cual se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

El análisis de varianza ANOVA de los factores que participan en el modelo experimental de cada especie y las interacciones derivadas de los factores se muestra en el Anexo 3. Aquí se observa que en las interacciones de las variables existen diferencias significativas, es decir que los factores del diseño experimental influyen en la absorbancia del colorante extraído.

Sin embargo en el análisis de la especie *Rubus glaucus* mostró que en la interacción doble entre (cantidad de material * tipo de maceración) no resultó significativa para la variable respuesta. En el caso de la especie *Solanum americanum* no resultaron significativas las interacciones dobles de (tipo de material * tipo de maceración), (cantidad de material * tipo de maceración) y (tipo de maceración * tiempo de maceración). Finalmente en la especie *Beta vulgaris* las interacciones de (tipo de material * tiempo de maceración) y (cantidad de material * tipo de maceración) no resultó significativa para la variable respuesta.

En el diagrama de efectos por interacciones dobles (Anexo 4), se muestra la interacción entre cada uno de los factores involucrados en el proceso.

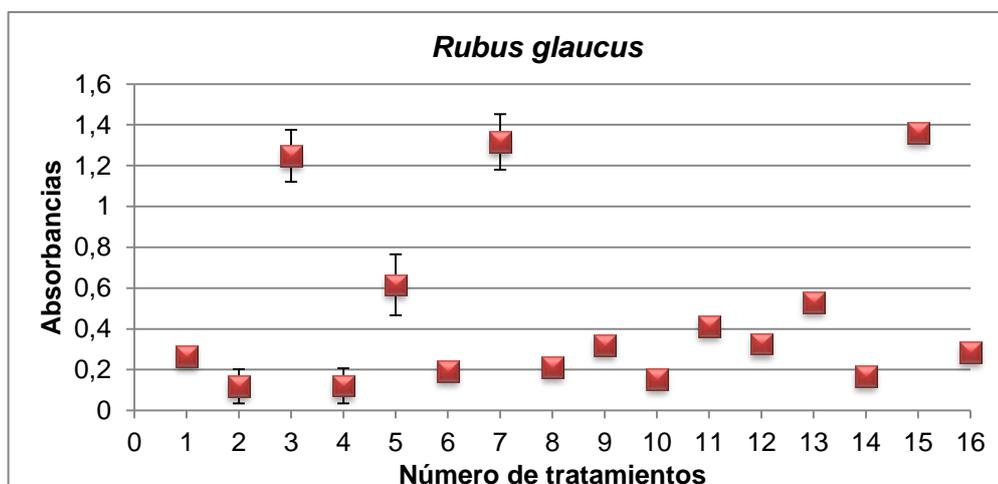


Figura 18. Intervalos de confianza del colorante *Rubus glaucus*.

Fuente: La Autora

En la figura 18 podemos observar que los tres intervalos de confianza (3, 7 y 15) con los que se obtiene una mayor absorbancia se traslapan, por lo tanto los tratamientos son estadísticamente iguales de acuerdo a sus medias. Para poder decidir de forma estadística sobre la diferencia entre estos tres métodos, se recurrió a otros criterios como el diagrama de efectos principales que presenta el nivel óptimo en el que deben ser aplicados cada una de las variables y su influencia en la variable respuesta.

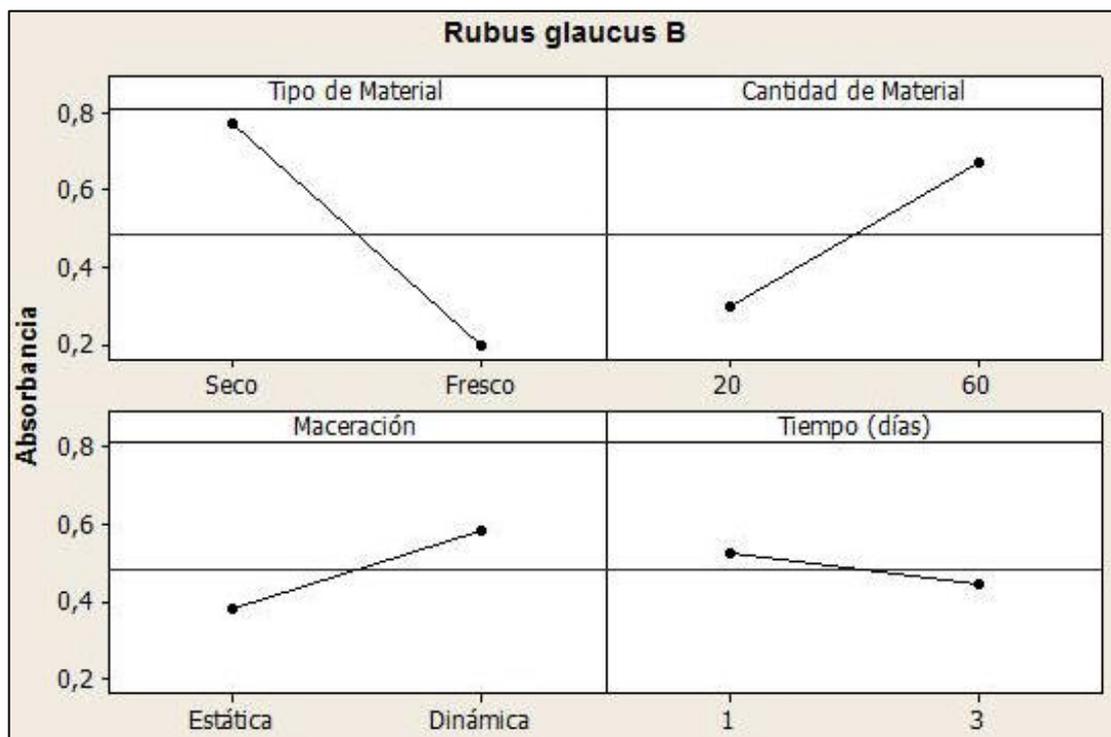


Figura 19. Diagrama de efectos principales del colorante de *Rubus glaucus B*

Fuente: La Autora

Como se observa en el diagrama de efectos principales (Figura 19), con respecto a la variable de tipo de material existe una gran diferencia entre sus dos niveles, observándose mayor absorbancia del colorante cuando se trabajó con material seco.

La cantidad del material favoreció de manera significativa en el aumento de la absorbancia del colorante, obteniendo mejores resultados al trabajar con 60 gramos de material. En el caso de las variables tipo de maceración y tiempo, resulta favorable trabajar con maceración dinámica durante 1 día.

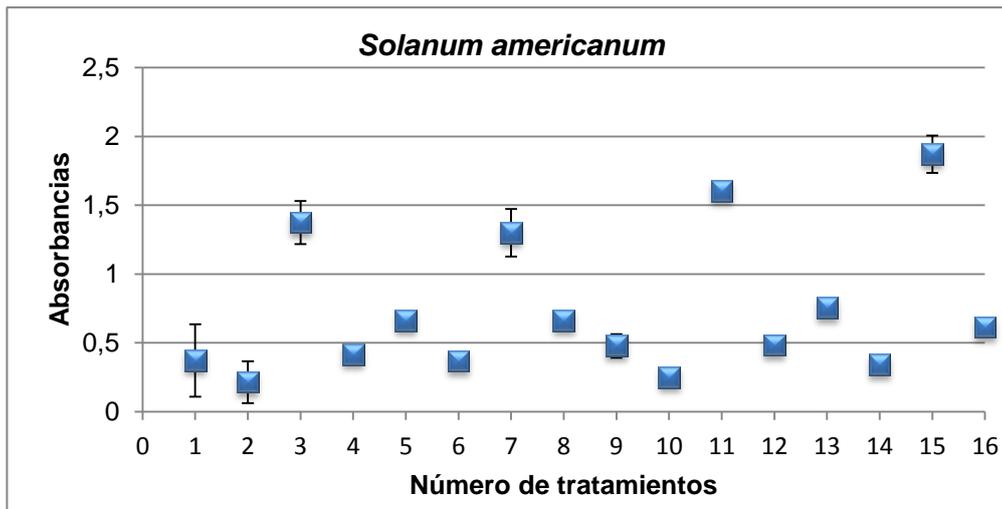


Figura 20. Intervalos de confianza del colorante *Solanum americanum*.
Fuente: La Autora

En la figura 20 podemos observar que el intervalo de confianza donde se obtiene una mayor absorbancia, no se traslapa con ningún otro, por lo tanto el método más óptimo para la extracción de colorantes de la especie *Solanum americanum* es el tratamiento 15.

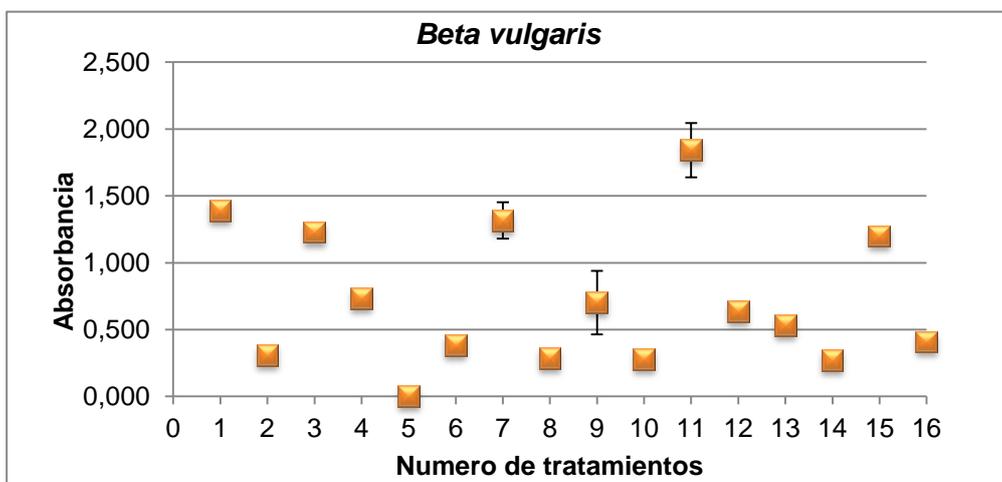


Figura 21. Intervalos de confianza del colorante *Beta vulgaris*.
Fuente: La Autora

Como podemos observar en la figura 21, el intervalo de confianza correspondiente al tratamiento 11 donde se obtiene una mayor absorbancia, no se traslapa con ningún otro, por lo tanto este método sería el más óptimo para la extracción de colorantes de la especie *Beta vulgaris*.

Estos resultados son congruentes con el análisis de mínimos cuadrados (Anexo 5), con el que se definió también la mejor combinación para la extracción del colorante de *Rubus glaucus*, *Solanum americanum* y *Beta vulgaris*. Ver tabla 3.

Tabla 3. Combinaciones para la extracción de colorantes de las 3 especies.

Variables	<i>Rubus glaucus</i>	<i>Solanum americanum</i>	<i>Beta vulgaris</i>
Tipo de material	Seco	Seco	Seco
Cantidad de material	60 gr	60 gr	60 gr
Tipo de maceración	Dinámica	Dinámica	Estática
Tiempo de maceración	1 día	3 días	3 días

Fuente: La Autora

Como se puede observar en la tabla 3 en la variable cantidad de material el nivel más óptimo para la extracción de colorantes de las 3 especies es con 60 gr de material, resultado que se corroboró con un estudio en el que se realizó la extracción de colorantes de frutas en el cual se realizaron pruebas, con diferentes cantidades de muestra, determinando una mayor absorbancia conforme aumentaba la cantidad.³⁰

En los colorantes de *Beta vulgaris* al utilizar maceración dinámica la absorbancia disminuyó y por ende la concentración de betalainas, posiblemente, debido a una degradación por efecto de los factores físicos circundantes (luz, oxígeno, tiempo).³⁸

3.2 Espectros de absorción en la región UV-visible de los colorantes

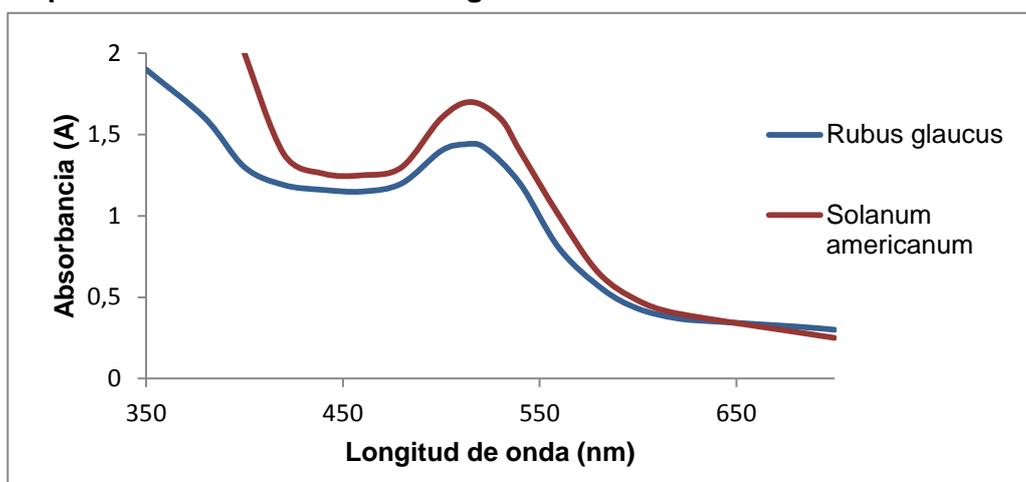


Figura 22. Espectros de absorción UV-VIS de los colorantes de *Rubus glaucus* y *Solanum americanum*

Fuente: La Autora

En los espectros de los colorantes de *Rubus glaucus* y *Solanum americanum* (Figura 22) se identificó un pico en cada espectro, con una longitud de máxima absorbancia en 512 nm y 515 nm respectivamente.

Estas longitudes de onda se encuentran dentro de la banda de absorción máxima de 500-535 nm típica de las antocianinas, la cual está lejos de la banda de absorción de otros fenoles, lo que hace posible que las antocianinas sean determinadas por mediciones de absorción de la solución a una determinada longitud de onda.³⁰

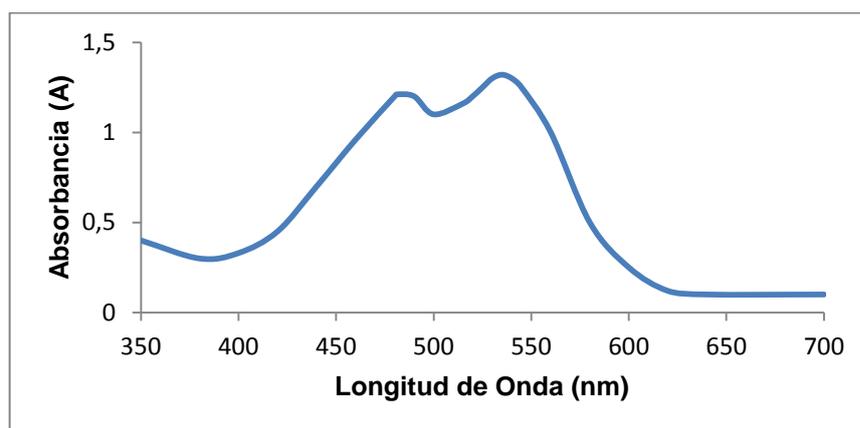


Figura 23. Espectro de absorción UV-VIS del colorante de *Beta vulgaris*

Fuente: La Autora

En el espectro del colorante de *Beta vulgaris* (Figura 23), se identificaron dos picos con longitudes de máxima absorbancia de 536 nm y 480 nm, los cuales son característicos de betacianinas (537 nm) y betaxantinas (480 nm) que constituyen el grupo de las betalainas.

16, 25

3.3 Efecto del pH

La principal antocianina de *Rubus glaucus* y *Solanum americanum* es la cianidina - 3 -O- diglucósido - 5 -O- glucósido.⁴ (Figura 24).

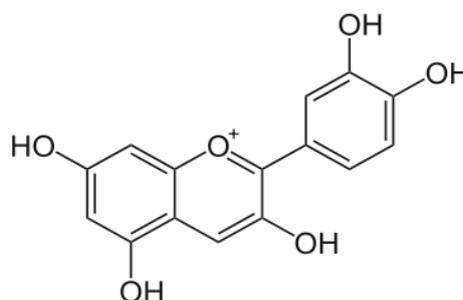


Figura 24. Estructura de la antocianina

Fuente: Quintero, C. 2004

Los colorantes extraídos de estas especies se mantuvieron a pH ácido (Tabla 4) debido a que la acidez tiene un efecto protector sobre la molécula. En solución ácida la cianidina aparece de color rojo y tiene una fuerte banda de absorción. A medida que el pH va subiendo entre 4 y 5.5 se degradan rápidamente, afectando su estabilidad.³⁹

Las antocianinas presentan una alta afinidad con las nanopartículas de TiO_2 ,^{40, 41} debido a la presencia de dos grupos hidroxilo en el anillo B de la cianidina, que permite la adsorción química de estos colorantes sobre el electrodo de TiO_2 .⁴²

Las betalinas constituyen las betacianinas y betaxatinas, dependiendo del compuesto al cual la betacianina se une a un azúcar recibiendo el nombre de betanina.³⁸ (Figura 25).

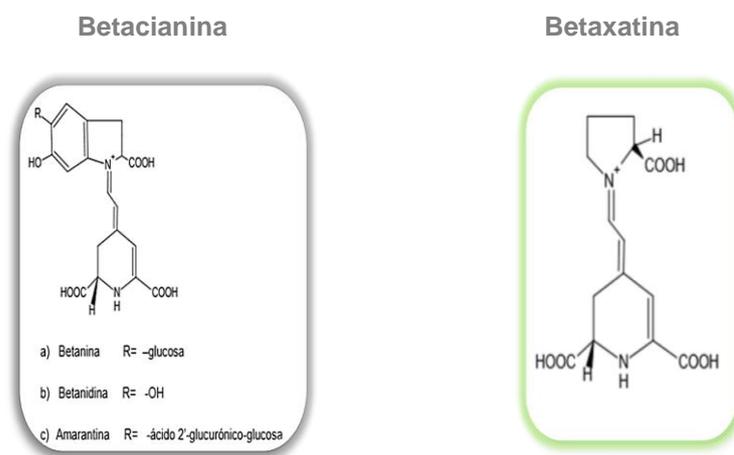


Figura 25. Estructura de las betalinas

Fuente: Calogero, G. 2010⁴³

En las betalaínas en pH más bajo las proporciones de betacianinas (pigmento rojo-purpura 536 nm) aumentan, con respecto a betaxantinas (pigmento amarillo-naranja 480 nm) en los extractos.⁴⁴ Los colorantes de betalaínas se ven afectados por el pH ya que se mantienen estables en un amplio intervalo de pH (3 a 7), pero se degradan por debajo de pH 2 y por encima de pH 9.⁴⁵

El pigmento extraído de *Beta vulgaris* a un pH de 5.26 presentó proporciones de betacianinas y betaxatinas casi similares (Figura 22), lo que pudo influir en su eficiencia. Debido a que por su color y su fuerte banda de absorción la molécula que debe predominar es la betacianina (Tabla 4).

Las betalaínas tienen una favorable absorción de luz y por sus grupos funcionales (-COOH) se unen con facilidad a la superficie de TiO_2 .⁴⁶ Además las betaxantina y betacianinas, cada

una con absorciones a diferentes longitudes de onda, ayudan a la celda a capturar los fotones de dos energías diferentes.⁴⁷

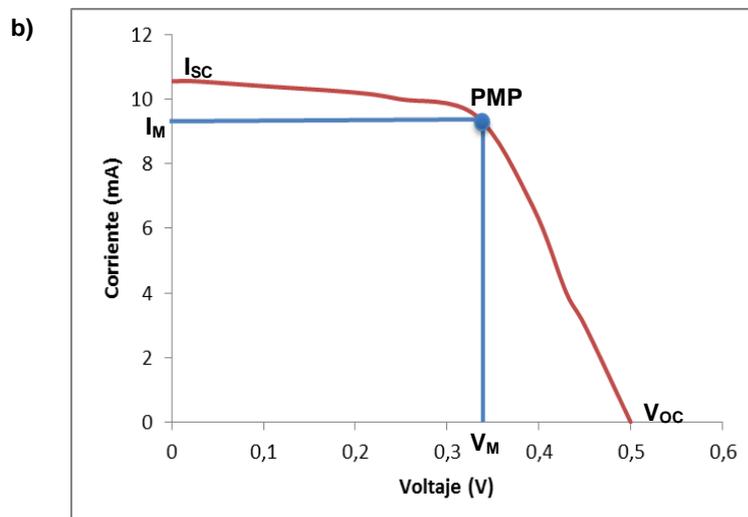
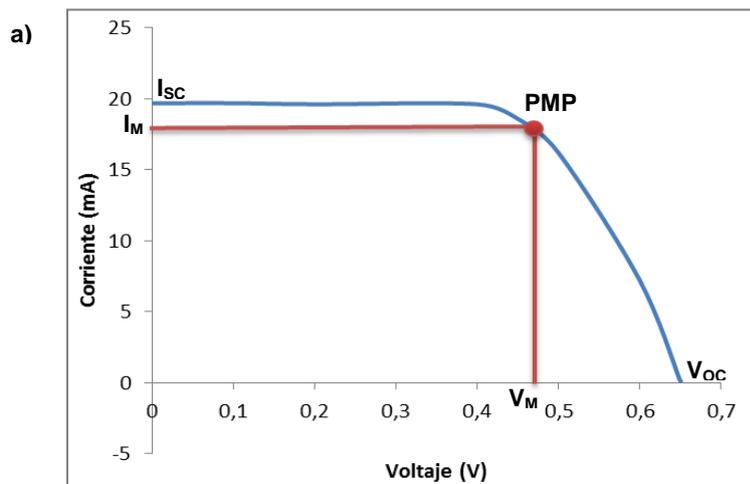
Tabla 4. Influencia del pH de los colorantes en la eficiencia DSSCs

Nº	Sensibilizador	Picos	pH	λ nm	Abs(A)	η (%)	
1	<i>Rubus glaucus</i>	Antocianinas	1	3,3	512	1,316	0,55
2	<i>Solanum americanum</i>		1	3,5	515	1,85	0,2
3	<i>Beta vulgaris</i>	Betalaínas	1	5,26	536	1,227	0,02
			2		480	1,211	

Fuente: La Autora

3.4 Caracterización de las celdas solares sensibilizadas con los colorantes naturales

El comportamiento eléctrico de las celdas está dado por las curvas de corriente frente al voltaje (curva I-V) y potencia frente a voltaje (curva P-V) que las caracteriza.



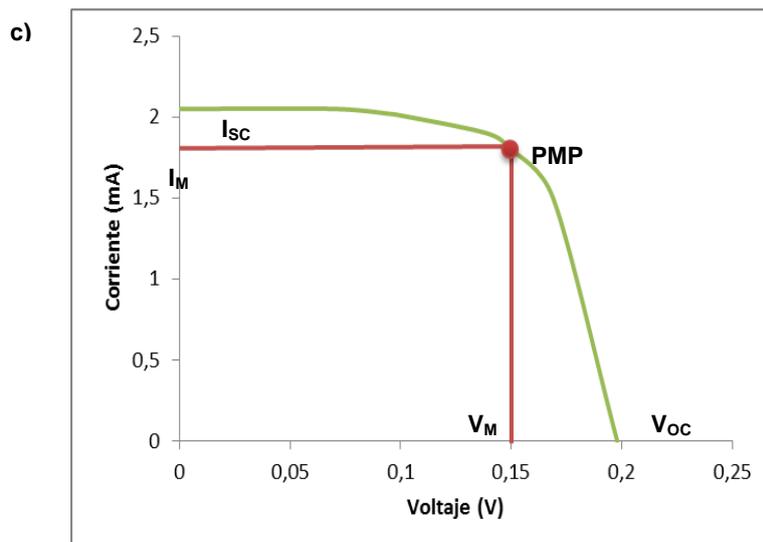


Figura 26. Curvas características de DSSCs corriente - voltaje sensibilizadas con: a) *Rubus glaucus*, b) *Solanum americanum* y c) *Beta vulgaris*.

Fuente: La Autora

Mediante la curva característica I-V de cada una de las celdas sensibilizadas con colorantes naturales (Figura 26) se identificó la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y la tensión de circuito abierto (V_{oc}) de las celdas. Como se observa cada curva tiene un punto codo en el cual está el punto de máxima potencia (PMP) de cada celda donde se alcanzó el voltaje (V_M) y corriente (I_M).

Las eficiencias que generaron los colorantes naturales en las celdas solares van desde 0,02 hasta 0,55 %. Los parámetros fotovoltaicos más altos se alcanzaron en las celdas sensibilizadas con colorantes extraídos de *Rubus glaucus* y *Solanum americanum* los cuales contienen moléculas de antocianinas específicamente de tipo cianidina (Tabla 4). En otro estudio se pudo observar que los parámetros más altos también se dieron con celdas sensibilizadas con cianidina - 3 glucósido.⁴⁸

Al aplicar en las celdas los colorantes naturales extraídos de *Rubus glaucus* y *Solanum americanum* se generaron voltajes de 0,65 y 0,5 V respectivamente. En un estudio realizado con este tipo de celdas solares, utilizando rutenio para sensibilizar el electrodo de TiO_2 y siendo evaluadas con iluminación a pleno sol se generó un voltaje de alrededor de 0,6 V.⁵

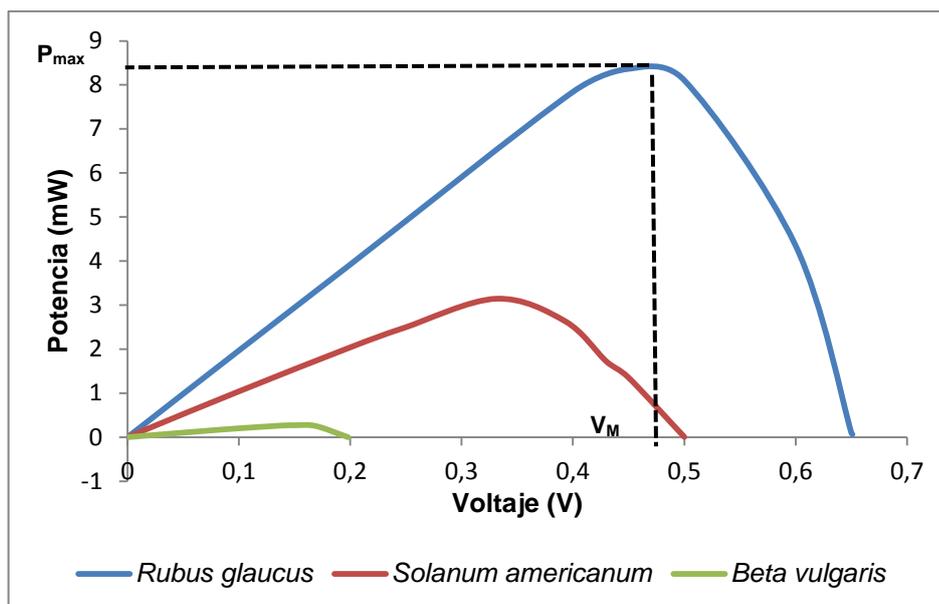


Figura 27. Curva potencia-voltaje de las DSSCs naturales

Fuente: La Autora

En la curva de potencia frente a voltaje (Figura 27) se observa que la celda no produce potencia con voltaje o corriente cero, y produce la máxima potencia cuando el voltaje se corresponde con el codo de la curva I-V.

Tabla 5. Parámetros fotovoltaicos característicos de las DSSCs naturales

Sensibilizador	Celda 1		Celda 2		Celda 3	
	<i>Rubus glaucus</i>		<i>Solanum americanum</i>		<i>Beta vulgaris</i>	
V_{OC} (V)	0,65	$\pm 0,005$	0,5	$\pm 0,005$	0,198	$\pm 0,005$
I_{SC} (mA)	19,68	$\pm 0,015$	10,55	$\pm 0,015$	2,05	$\pm 0,015$
V_M (V)	0,48	$\pm 0,005$	0,34	$\pm 0,005$	0,15	$\pm 0,005$
I_M (mA)	18	$\pm 0,015$	9,4	$\pm 0,015$	1,8	$\pm 0,015$
P_{max} (mW)	8,83	$\pm 0,09$	3,2	$\pm 0,04$	0,27	$\pm 0,01$
FF	0,69	$\pm 0,009$	0,61	$\pm 0,01$	0,67	$\pm 0,03$
η (%)	0,55	$\pm 0,008$	0,2	$\pm 0,004$	0,02	$\pm 0,001$

Fuente: La Autora

Como se muestra en la Tabla 5 los factores de forma (FF) de las celdas están entre 0,61 y 0,69 los cuales no son consideraría valores bajos, porque para una celda de buena calidad su valor es alrededor de 0,75.⁴⁹ Además la forma de las curvas (I-V) (Figura 26) son prácticamente similares a las curvas características de celdas solares, considerando de calidad media a las celdas ensambladas con los pigmentos naturales.

Los colorantes naturales estudiados muestran resultados alentadores como elementos de recolección de luz en DSSCs, además de las ventajas que tienen por la disponibilidad de estas especies, su fácil extracción y respeto al medio ambiente. Estos colorantes se consideran como una alternativa prometedora para sensibilizar celdas solares y sin duda merecen una mayor investigación.⁸

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Las condiciones más óptimas para la obtención de colorantes de las tres especies se da con 60 gr de material seco, con respecto al tipo de maceración y tiempo se presentan diferencias en cada una. En la especie *Rubus glaucus* maceración dinámica durante 1 día, en la especie *Solanum americanum* maceración dinámica durante 3 días y finalmente en la especie *Beta vulgaris* maceración estática durante 3 días.
- Mediante los espectros de absorción de los tres colorantes se identificó su longitud de onda máxima: *Rubus glaucus* 512nm, *Solanum americanum* 515nm y *Beta vulgaris* 536nm.
- Al sensibilizar las celdas solares con los colorantes de *Rubus glaucus*, *Solanum americanum* y *Beta vulgaris* generaron voltajes de 0.65 V, 0.50 V y 0,20 V respectivamente, presentando un buen comportamiento eléctrico de acuerdo a los parámetros característicos obtenidos de cada celda.
- El colorante de *Rubus glaucus* mostro mejores efectos de fotosensibilización, obteniendo la eficiencia de conversión más alta de 0.55% entre los tres extractos.

4.2 RECOMENDACIONES

- Que la presente investigación sirva como base para estudios posteriores, pues las DSSCs tienen aún mucho campo de investigación pues al estar conformadas por diversos materiales con diferentes funciones, se puede mejorar cada uno de ellos con la finalidad de incrementar su eficiencia.
- Elaborar los electrodos y contra-electrodos que forman las celdas solares. Adquirir los equipos necesarios para realizar una evaluación más a fondo y obtener mediciones mucho más precisas de las DSSCs.
- Continuar con el estudio de pigmentos naturales fotosensibles de otras especies de plantas para ser aplicadas en celdas solares sensibilizadas por colorantes y evaluar su capacidad de recolección de luz.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Carbó, P.; Rocha, E. *Redalyc* **2012**, *56*, 3–10.
- (2) Brown, T. L.; LeMay, H. E.; Bursten, B. E.; Murphy, C. J. In *Química la Ciencia Central*; Prentice Hall: México, 2009; p. 480.
- (3) Halme, J. Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests, Helsinki University of Technology, 2002.
- (4) Chien, C.-Y.; Hsu, B.-D. *Solar Energy* **2013**, *98*, 203–211.
- (5) Martineau, D. *Solaronix* **2012**, 3–38.
- (6) Chiba, Y.; Islam, A.; Watanabe, Y.; Komiya, R.; Koide, N.; Han, L. *Japanese Journal of Applied Physics* **2006**, *45*, L638–L640.
- (7) Zhang, G.; Bala, H.; Cheng, Y.; Shi, D.; Lv, X.; Yu, Q.; Wang, P. *Chemical communications (Cambridge, England)* **2009**, 2198–2200.
- (8) Zhou, H.; Wu, L.; Gao, Y.; Ma, T. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **2011**, *219*, 188–194.
- (9) Harris, D. C. *Análisis químico cuantitativo*; tercera.; Reverte, 2007; p. 744.
- (10) Vesnaver, S. Realizzazione e caratterizzazione di una cella solare a colorante organico, Università di Trieste, 2006.
- (11) Barragán, B.; Álvarez, L.; Hernández, M. L. *Sistemas Ambientales* **2011**, *4*, 10–20.
- (12) Montesinos, J. Dispositivos fotoelectrocrómicos: viabilidad de la utilización de electrodos sensibilizados con colorante, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- (13) Duval, J. Estudio teórico - práctico de fotoelectrodos base TiO₂ para uso en celdas solares, Instituto Politécnico Nacional, 2010.
- (14) Hara, K.; Arakawa, H. *Handbook of photovoltaic science and engineering*; Luque, A.; Hegedus, S., Eds.; Second edi.; John Wiley & Sons, 2003; pp. 664–700.
- (15) Frison, E. Celle solari a colorante organico (DSSC): Applicazione in flusso continuo del colorante a substrati di Titania e monitoraggio in-situ mediante spettroscopia UV-Vis., Università Degli Studi di Padova, 2011, p. 110.
- (16) Calogero, G.; Yum, J.-H.; Sinopoli, A.; Di Marco, G.; Grätzel, M.; Nazeeruddin, M. K. *Solar Energy* **2012**, *86*, 1563–1575.
- (17) Alvarado, S. Sintesis de Oxidos de Titanio (TiO₂) y Oxidos de Zinc (ZnO) Dopados para su empleo en Celdas Solares, Universidad de las Américas Puebla, 2011.
- (18) Lock, O. *Colorantes Naturales*; Fondo Editorial PUCP, 1997; p. 274.
- (19) Marcano, D.; Hasegawa, M. *Fitoquímica Organica*; Segunda ed.; CDCH UCV, 2002.

- (20) Aguilera, M.; Reza, C.; Chew, R.; Meza, J. *Biotecnia* **2011**, *8*, 16–22.
- (21) Quintero, C. Efecto de la copigmentación sobre el color y estabilidad del pigmento en un sistema modelo (bebida), usando antocianina de rabano, Universidad de las Américas Puebla, 2004.
- (22) Chiu, R. *Superficies y Vacío* **2011**, *24*, 113–120.
- (23) Franco, M. Caracterización parcial del pigmento rojo del fruto de la jiotilla (*Escontria chiotilla*); una cactácea subexplotada, Universidad Autónoma Metropolitana, 2004.
- (24) Zhang, D.; Lanier, S. M.; Downing, J. A.; Avent, J. L.; Lum, J.; McHale, J. L. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* **2008**, *195*, 72–80.
- (25) García, V. Evolución de compuestos funcionales durante la maduración de frutos de *Opuntia stricta*, Universidad Politécnica de Cartagena, 2008.
- (26) Lauro, G. J.; Francis, J. *Natural food colorants: science and technology*; CRC Press, 2000; p. 337.
- (27) Naturales Ciencias, I. *Rubus robustus* C. Presl <http://www.biovirtual.unal.edu.co/ICN/?controlador=ShowObject&accion=show&id=63093+>.
- (28) González, M. Conservación de mora, uvilla y frutilla mediante la utilización del aceite esencial de canela (*Cinnamomum zeynalicum*), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2010.
- (29) Cueva, M. Efecto de radiación UV-C sobre el tiempo de vida útil de mora (*Rubus glaucus* Benth), Tecnológica Equinoccial, 2010.
- (30) Cano, A. Extracción y uso de tres pigmentos naturales a partir de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav), mortiño (*Vaccinium myrtillus* L) y mora (*Rubus glaucus*) como alternativa colorante natural para alimentos, Escuela Politécnica del Ejército, 2011.
- (31) Coba, P.; Coronel, D.; Verdugo, K.; Fernanda, M.; Yugsi, E.; Huachi, L. *La Granja* **2012**, *16*, 5–13.
- (32) Pérez, S.; Valdivieso, C. Colección y caracterización morfológica in situ del mortiño (*Vaccinium floribundum* Kunt) en la sierra norte del Ecuador, Escuela Politécnica del Ejército, 2007.
- (33) Trujillo, S.; Lopez, W. Obtención de colorantes naturales a partir de cascara *Allium capa* (cebolla blanca y morada) y raíz de *Beta vulgaris* (remolacha) para su aplicación en la industria textil, Universidad de el Salvador, 2010, pp. 1–130.
- (34) Horbowicz, M.; Kosson, R.; Grzesiuk, A.; Dębski, H. *Vegetable Crops Research Bulletin* **2008**, *68*, 5–22.
- (35) Robayo, M. O. M. D. E. Extracción y secado por atomización del colorante de mora castilla (*Rubus glaucus*), Universidad Nacional de Colombia, 2000.

- (36) Santacruz, L. Análisis químico de antocianinas en frutos silvestres, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- (37) Enrique, J. M. Diseño, modelado y optimización de sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia de generadores fotovoltaicos mediante convertidores CC/CC, Universidad de Huelva, 2011, pp. 1–306.
- (38) Machado, C. A. E. Estudio de la Extracción y Estabilidad del Colorante del ataco (*Amaranthus hybridus*) Con Potencial de Aplicación como Aditivo Alimentario, INIAP Archivo Histórico, 2005, p. 124.
- (39) Cherepy, N. J.; Smestad, G. P.; Gra, M.; Zhang, J. Z. *Journal of Physical Chemistry* **1997**, *5647*, 9342–9351.
- (40) Meng, S.; Ren, J.; Kaxiras, E. *Nano letters* **2008**, *8*, 3266–3272.
- (41) Hemamali, G. G. G. M. N.; Kumara, G. R. A. *International Journal of Scientific* **2013**, *3*, 2–4.
- (42) Chang, H.; Lo, Y. *Solar Energy* **2010**, *84*, 1833–1837.
- (43) Calogero, G.; Di Marco, G.; Cazzanti, S.; Caramori, S.; Argazzi, R.; Di Carlo, A.; Bignozzi, C. A. *International journal of molecular sciences* **2010**, *11*, 254–267.
- (44) Dumbravă, A.; Enache, I.; Oprea, C. I.; Georgescu, A.; Gîrțu, M. A. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* **2012**, *7*, 339–351.
- (45) Aceituno, V. Propiedades de colorantes naturales secados con técnicas alternativas a nivel laboratorio como alternativa al FD&C rojo N°. 40 en alimentos, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010, pp. 1–335.
- (46) Hernández-Martínez, A. R.; Estévez, M.; Vargas, S.; Rodríguez, R. *International journal of molecular sciences* **2013**, *14*, 4081–4093.
- (47) Estevez, M.; Vargas, S.; Quintanilla, F.; Rodríguez, R. *Journal of Applied Research and Technology* **2012**, *10*, 38–47.
- (48) Santos, C. M.; Oliveira, J.; Rocha, S.; Coelho, M.; Freitas, V.; Aguilar, H. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2014**, *25*, 1029–1035.
- (49) Orion, G. Laboratorio Virtual de Placas Solares Fotovoltaicas <http://grupoorion.unex.es/orion/media/pdf/Fundamento.pdf> (accessed Feb 21, 2014).
- (50) Solaronix. *Efficiently Innovative* **2013**, 1–70.

ANEXOS

ANEXO 1

Especificaciones de los componentes de las celdas solares adquiridas en Solaronix®.

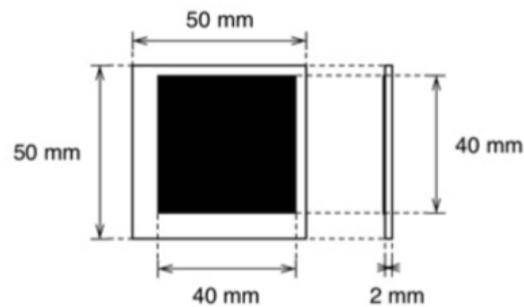


Education Cell Spare Parts

Education Cell Kit components, available for separate purchase.

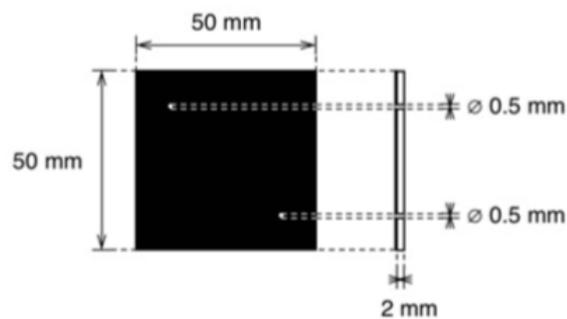
Education Cell Titania Electrodes

Ready-to-Use Titania Electrodes.



Education Cell Platinum Electrodes

Platinized Electrodes.



Education Electrolyte

Low-cost Iodide Based Redox Electrolyte

This electrolyte is specifically formulated for preparing low cost Dye Solar Cells during training courses.

Fuente: Solaronix 2013.⁵⁰

ANEXO 2

Diseño factorial 2⁴ con dos repeticiones, realizado a cada especie

Rubus glaucus

Nº	A	B	C	D	Abs 1	Abs2	Media	DesvSt
1	Seco	20g	Estático	1 día	0,27	0,259	0,265	0,008
2	Fresco	20g	Estático	1 día	*	0,119	0,119	0,084
3	Seco	60g	Estático	1 día	1,338	1,158	1,248	0,127
4	Fresco	60g	Estático	1 día	*	0,121	0,121	0,086
5	Seco	20g	Dinámico	1 día	0,722	0,51	0,616	0,15
6	Fresco	20g	Dinámico	1 día	0,213	0,172	0,193	0,029
7	Seco	60g	Dinámico	1 día	1,412	1,22	1,316	0,136
8	Fresco	60g	Dinámico	1 día	0,219	0,203	0,211	0,011
9	Seco	20g	Estático	3 días	0,301	0,341	0,321	0,028
10	Fresco	20g	Estático	3 días	0,141	0,166	0,154	0,018
11	Seco	60g	Estático	3 días	0,421	0,408	0,415	0,009
12	Fresco	60g	Estático	3 días	0,336	0,317	0,327	0,013
13	Seco	20g	Dinámico	3 días	0,544	0,519	0,532	0,018
14	Fresco	20g	Dinámico	3 días	0,174	0,159	0,167	0,011
15	Seco	60g	Dinámico	3 días	1,385	1,334	1,36	0,036
16	Fresco	60g	Dinámico	3 días	0,282	0,285	0,284	0,002

Fuente: La Autora

* Valor insignificante

Solanum americanum

Nº	A	B	C	D	Abs 1	Abs2	Media	DesvSt
1	Seco	20g	Estático	1 día	*	0,372	0,372	0,263
2	Fresco	20g	Estático	1 día	*	0,214	0,214	0,151
3	Seco	60g	Estático	1 día	1,263	1,485	1,374	0,157
4	Fresco	60g	Estático	1 día	0,429	0,403	0,416	0,018
5	Seco	20g	Dinámico	1 día	0,648	0,675	0,662	0,019
6	Fresco	20g	Dinámico	1 día	0,348	0,383	0,366	0,025
7	Seco	60g	Dinámico	1 día	1,422	1,177	1,3	0,173
8	Fresco	60g	Dinámico	1 día	0,66	0,662	0,661	0,001
9	Seco	20g	Estático	3 días	0,537	0,416	0,477	0,086
10	Fresco	20g	Estático	3 días	0,256	0,241	0,249	0,011
11	Seco	60g	Estático	3 días	1,609	1,601	1,605	0,006
12	Fresco	60g	Estático	3 días	0,506	0,457	0,482	0,035
13	Seco	20g	Dinámico	3 días	0,798	0,708	0,753	0,064
14	Fresco	20g	Dinámico	3 días	0,336	0,341	0,339	0,004
15	Seco	60g	Dinámico	3 días	1,775	1,966	1,871	0,135
16	Fresco	60g	Dinámico	3 días	0,605	0,622	0,614	0,012

Fuente: La Autora

* Valor insignificante

Beta vulgaris

Nº	A	B	C	D	Absorbancia 487				Absorbancia 535			
					Abs 1	Abs2	Media	DesvSt	Abs 1	Abs2	Media	DesvSt
1	Seco	20g	Estático	1 día	1,102	0,259	0,681	0,422	1,383	0,372	0,878	0,715
2	Fresco	20g	Estático	1 día	*	0,119	0,119	0,060	0,285	0,214	0,250	0,050
3	Seco	60g	Estático	1 día	1,158	1,158	1,158	0,000	1,204	1,485	1,345	0,199
4	Fresco	60g	Estático	1 día	0,655	0,121	0,388	0,267	0,777	0,403	0,590	0,264
5	Seco	20g	Dinámico	1 día	*	0,51	0,510	0,255	*	0,675	0,675	0,477
6	Fresco	20g	Dinámico	1 día	*	0,172	0,172	0,086	0,427	0,383	0,405	0,031
7	Seco	60g	Dinámico	1 día	*	1,22	1,220	0,610	1,22	1,177	1,199	0,030
8	Fresco	60g	Dinámico	1 día	*	0,203	0,203	0,102	0,309	0,662	0,486	0,250
9	Seco	20g	Estático	3 días	0,466	0,341	0,404	0,063	0,534	0,416	0,475	0,083
10	Fresco	20g	Estático	3 días	0,275	0,166	0,221	0,055	0,324	0,241	0,283	0,059
11	Seco	60g	Estático	3 días	1,386	0,408	0,897	0,489	1,699	1,601	1,650	0,069
12	Fresco	60g	Estático	3 días	0,317	0,317	0,317	0,000	0,584	0,457	0,521	0,090
13	Seco	20g	Dinámico	3 días	0,519	0,519	0,519	0,260	0,517	0,708	0,613	0,135
14	Fresco	20g	Dinámico	3 días	*	0,159	0,159	0,080	0,29	0,341	0,316	0,036
15	Seco	60g	Dinámico	3 días	1,334	1,334	1,334	0,000	1,201	1,966	1,584	0,541
16	Fresco	60g	Dinámico	3 días	0,285	0,285	0,285	0,000	0,357	0,622	0,490	0,187

Fuente: La Autora

* Valor insignificante

ANEXO 3

Análisis de varianza (ANOVA) de la extracción de colorantes en los factores e interacciones del modelo experimental mediante el software Minitab.

Rubus glaucus

Fuente de Variabilidad	Efect	Coef	SECoef	F	P
Tipo de Material	-0,5747	-0,2873	0,01716	-16,75	0,000
Cantidad de Material	0,3769	0,1885	0,01716	10,98	0,000
Tipo de Maceración	0,2011	0,1005	0,01716	5,86	0,000
Tiempo de Maceración	-0,0789	-0,0395	0,01716	-2,30	0,037
Tipo de Material* Cantidad de Material	-0,2993	-0,1497	0,01716	-8,72	0,000
Tipo de Material*Tipo de Maceración	-0,1677	-0,0838	0,01716	-4,89	0,000
Tipo de Material* Tiempo de Maceración	0,1506	0,0753	0,01716	4,39	0,001
Cantidad de Material* Tipo de Maceración	0,0389	0,0195	0,01716	1,13	0,276
Cantidad de Material* Tiempo de Maceración	-0,0741	-0,0370	0,01716	-2,16	0,049
Tipo de Maceración* Tiempo de Maceración	0,0803	0,0402	0,01716	2,34	0,035
Tipo de Material* Cantidad de Material* Tipo de Maceración	-0,0488	-0,0244	0,01716	-1,42	0,177
Tipo de Material* Cantidad de Material* Tiempo de Maceración	0,1414	0,0707	0,01716	4,12	0,001
Tipo de Material*Tipo de Maceración* Tiempo de Maceración	-0,1287	-0,0643	0,01716	-3,75	0,002
Tipo de Maceración* Tiempo de Maceración	0,1307	0,0653	0,01716	3,81	0,002
Cantidad de Material* Tipo de Maceración* Tiempo de Maceración	-0,1488	-0,0744	0,01716	-4,34	0,001
Tipo de Material* Cantidad de Material*					

Fuente	GL	Seq SC	Adj SC	Adj CM	F	P
Principales efectos	4	3,94496	3,67262	0,918155	109,64	0,000
2- Interacciones	6	1,17789	1,17296	0,195493	23,34	0,000
3- Interacciones	4	0,44500	0,43244	0,108110	12,91	0,000
4- Interacciones	1	0,15748	0,15748	0,157477	18,80	0,001
Residual Error	14	0,11724	0,11724	0,008374		
Pure Error	14	0,11724	0,11724	0,008374		
Total	29	5,84257				

Fuente: La Autora

Solanum americanum

Fuente de Variabilidad	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Tipo de Material	-0,6342	-0,3171	0,01479	-21,44	0,000
Cantidad de Material	0,6114	0,3057	0,01479	20,67	0,000
Tipo de Maceración	0,1719	0,0860	0,01479	5,81	0,000
Tiempo de Maceración	0,1279	0,0640	0,01479	4,33	0,001
Tipo de Material*	-0,3601	-0,1800	0,01479	-12,17	0,000
Cantidad de Material					
Tipo de Material*Tipo de Maceración	-0,0173	-0,0087	0,01479	-0,59	0,568
Tipo de Material*Tiempo de Maceración	-0,1216	-0,0608	0,01479	-4,11	0,001
Cantidad de Material*					
Tipo de Maceración	0,0771	0,0385	0,01479	2,61	0,021
Cantidad de Material*					
Tiempo de Maceración	0,0191	0,0095	0,01479	0,64	0,530
Tipo de Maceración*					
Tiempo de Maceración					
Tipo de Material*	0,0638	0,0319	0,01479	2,16	0,049
Cantidad de Material*					
Tipo de Maceración					
Tipo de Material*	-0,0744	-0,0372	0,01479	-2,52	0,025
Cantidad de Material*					
Tiempo de Maceración					
Tipo de Material*Tipo de Maceración*	-0,0627	-0,0313	0,01479	-2,12	0,052
Tiempo de Maceración	0,0377	0,0188	0,01479	1,27	0,223
Cantidad de Material*					
Tipo de Maceración*					
Tiempo de Maceración					
Tipo de Material*					
Cantidad de Material*	-0,0506	-0,0253	0,01479	-1,71	0,109
Tipo de Maceración*					
Tiempo de Maceración					

Fuente	GL	Seq SC	Adj SC	Adj CM	F	P
Principales efectos	4	6,26918	5,61434	1,40359	225,65	0,000
2- Interacciones	6	1,09549	1,03113	0,17186	27,63	0,000
3- Interacciones	4	0,12037	0,11453	0,02863	4,60	0,014
4- Interacciones	1	0,01818	0,01818	0,01818	2,92	0,109
Residual Error	14	0,08708	0,08708	0,00622		
Pure Error	14	0,08708	0,08708	0,00622		
Total	29	7,59031				

Fuente: La Autora

Beta vulgaris

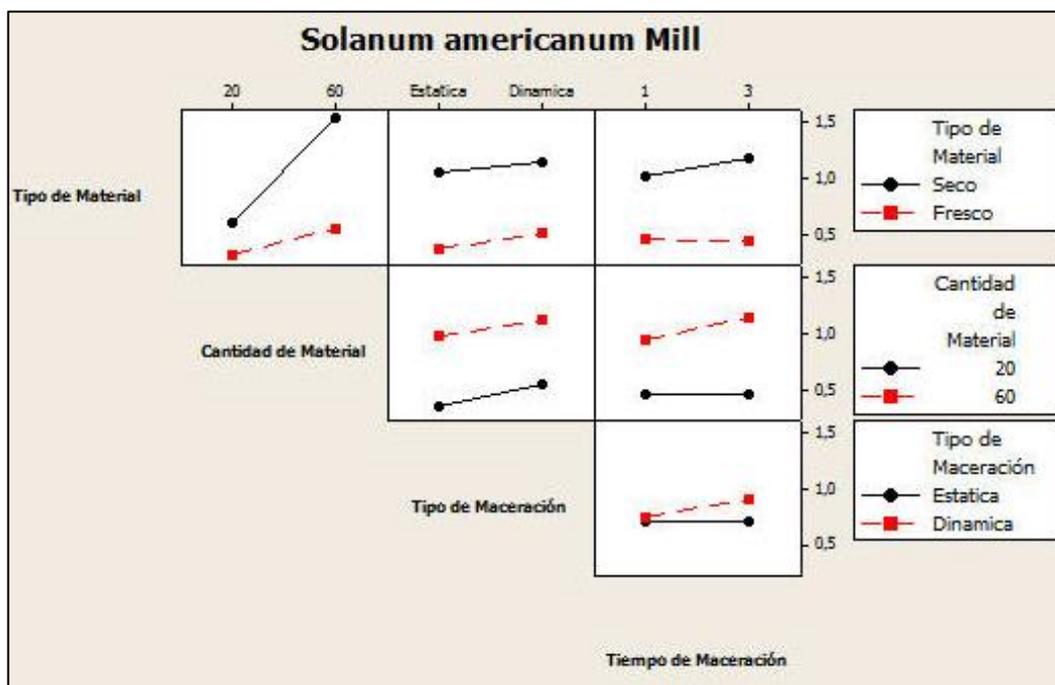
Fuente de Variabilidad	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Tipo de Material	0,4070	0,2035	0,02150	9,46	0,000
Cantidad de Material	-0,1487	-0,0744	0,02150	-3,46	0,003
Tipo de Maceración	-0,1380	-0,0690	0,02150	-3,21	0,005
Tiempo de Maceración	0,0409	0,0204	0,02150	0,95	0,356
Tipo de Material*	-0,2097	-0,1049	0,02150	-4,88	0,000
Cantidad de Material					
Tipo de Material*Tipo de Maceración	0,4065	0,2033	0,02150	9,45	0,000
Tipo de Material*	0,4626	0,2313	0,02150	10,76	0,000
Tiempo de Maceración					
Cantidad de Material*	0,0525	0,0262	0,02150	1,22	0,240
Tipo de Maceración					
Cantidad de Material*	-0,0389	-0,0194	0,02150	-0,90	0,379
Tiempo de Maceración					
Tipo de Maceración*	0,1021	0,0511	0,02150	2,37	0,030
Tiempo de Maceración					
Tipo de Material*	0,0910	0,0455	0,02150	2,12	0,050
Cantidad de Material*					
Tipo de Maceración					
Tipo de Material*	-0,2256	-0,1128	0,02150	-5,25	0,000
Cantidad de Material*					
Tiempo de Maceración					
Tipo de Material*Tipo de Maceración*	-0,3236	-0,1618	0,02150	-7,53	0,000
Tiempo de Maceración					
Cantidad de Material*	0,2971	0,1486	0,02150	6,91	0,000
Tipo de Maceración*					
Tiempo de Maceración					
Tipo de Material*	0,3664	0,1832	0,02150	8,52	0,000
Cantidad de Material*					
Tipo de Maceración*					
Tiempo de Maceración					

Fuente	GL	Seq SC	Adj SC	Adj CM	F	P
Principales efectos	4	1,6679	1,6679	0,41698	28,18	0,000
2- Interacciones	6	3,5036	3,5036	0,58394	39,47	0,000
3- Interacciones	4	2,0176	2,0176	0,50441	34,09	0,000
4- Interacciones	1	1,0738	1,0738	1,07385	72,58	0,000
Residual Error	16	0,2367	0,2367	0,01480		
Pure Error	16	0,2367	0,2367	0,01480		
Total	31	8,4998				

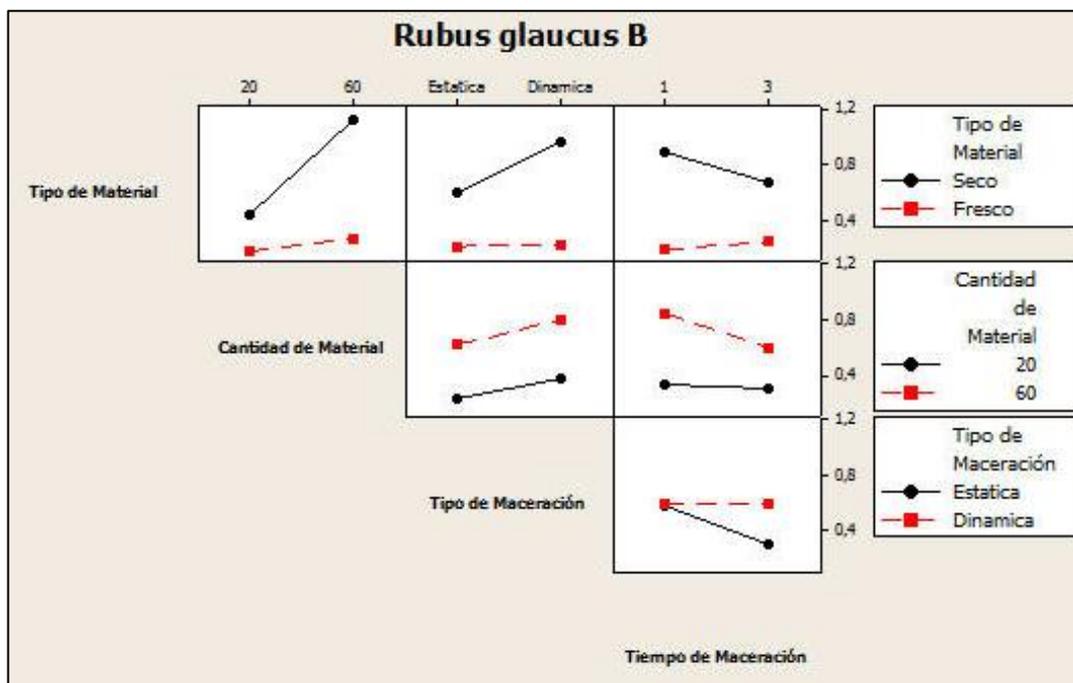
Fuente: La Autora

ANEXO 4

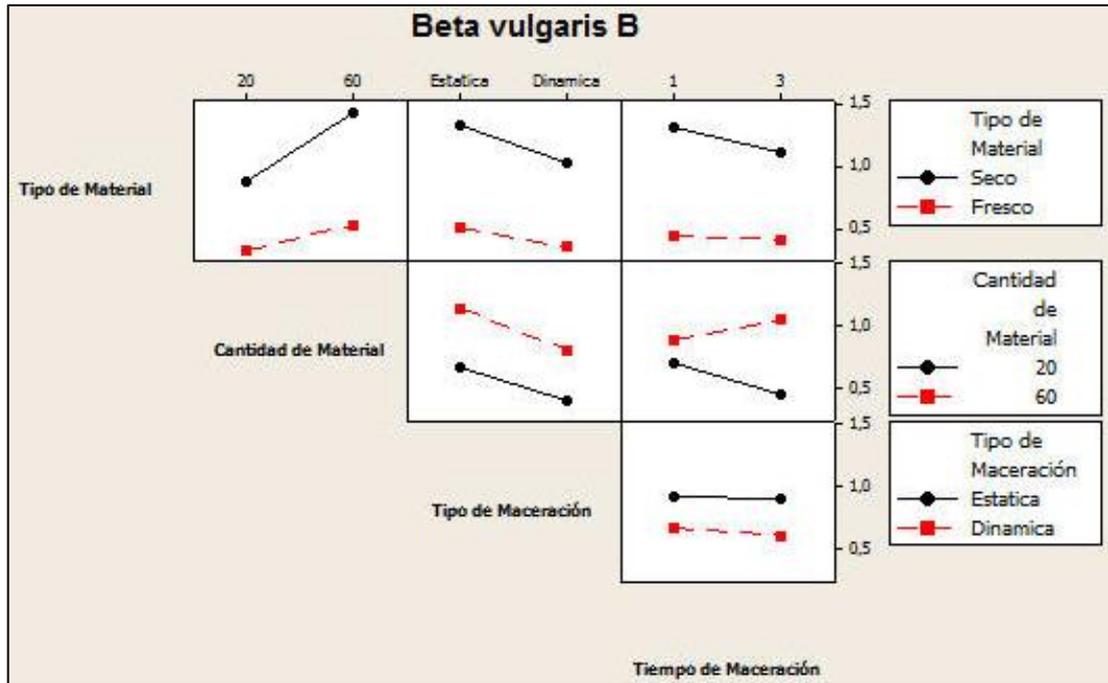
Diagramas de efectos por interacciones dobles entre cada uno de los factores involucrados en el proceso, mediante el software Minitab.



Fuente: La Autora



Fuente: La Autora



Fuente: La Autora

ANEXO 5

Análisis de mínimos cuadrados de las absorbancias mediante el software Minitab

Especie	Variable	Nivel	Media	SE Media
<i>Rubus glaucus</i> (Mora)	Tipo de Material	Seco	0,7714	0,02288
		Fresco	0,1967	0,02558
	Cantidad de Material	20	0,2956	0,02427
		60	0,6725	0,02427
	Tipo de Maceración	Estática	0,3835	0,02558
		Dinámica	0,5846	0,02288
	Tiempo de Maceración	1	0,5235	0,02558
		3	0,4446	0,02288

Fuente: La Autora

Especie	Variable	Nivel	Media	SE Media
<i>Solanum americanum</i> (Mortiño)	Tipo de Material	Seco	1,0515	0,02091
		Fresco	0,4173	0,02091
	Cantidad de Material	20	0,4287	0,02204
		60	1,0401	0,01972
	Tipo de Maceración	Estática	0,6484	0,02204
		Dinámica	0,8204	0,01972
	Tiempo de Maceración	1	0,6704	0,02204
		3	0,7984	0,01972

Fuente: La Autora

Especie	Variable	Nivel	Media	SE Media
<i>Beta vulgaris</i> (Remolacha)	Tipo de Material	Seco	1,3349	0,05440
		Fresco	0,4123	0,03141
	Cantidad de Material	20	0,7769	0,05440
		60	0,9704	0,03141
	Tipo de Maceración	Estática	0,9029	0,03141
		Dinámica	0,8444	0,05440
	Tiempo de Maceración	1	0,9997	0,05440
		3	0,7476	0,03141

Fuente: La Autora