

EFECTO DE TEMPERATURA DE SECADO Y CONCENTRACIÓN DE ALMIDÓN DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd) EN LA MICROENCAPSULACIÓN DE ANTOCIANINAS DE MASHUA NEGRA (*Tropaeolum tuberosum*)

Data de submissão: 26/10/2023

Data de aceite: 01/12/2023

Ángel Servando Aiquipa Pillaca

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0003-4803-3613>

Betsy S. Ramos-Pacheco

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0002-0286-0632>

Carlos A. Ligarda-Samanez

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0001-7519-8355>

David Choque-Quispe

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0003-4002-7526>

Henry Palomino-Rincón

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0002-4174-9961>

Diego E. Peralta Guevara

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0003-2988-0809>

Frida Esmeralda Fuentes-Bernedo

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0002-8731-4621>

Ronald Perez-Salcedo

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0001-9251-1788>

Dianeth Buleje-Campos

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0002-3060-6076>

Celia Rocio Yauris-Silvera

Universidad Nacional José María
Arguedas
Andahuaylas-Perú
<https://orcid.org/0000-0003-2681-7724>

RESUMEN: La mashua negra es una fuente de antocianinas con alto potencial de aprovechamiento. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la temperatura de secado (120°C y 160°C) y concentración de almidón de quinua (5% y 10%) como agente encapsulante en la microencapsulación de antocianinas de mashua negra mediante secado por aspersión. Se analizaron el color, actividad de agua, contenido de antocianinas monoméricas, fenoles totales, capacidad antioxidante y morfología de los microencapsulados. Los resultados mostraron la formación de microcápsulas de color púrpura con valores de luminosidad entre 39.08 a 57.11, croma a* entre 11.10 a 9.87, y croma b* entre -13.43 a -10.81. La actividad de agua varió entre 0.23 a 0.29. El contenido de antocianinas monoméricas osciló entre 3.90 a 7.80 mg cianidina-3-glucósido/g, los fenoles totales fluctuaron entre 1.57 a 2.02 mg de AGE/g, mientras que la capacidad antioxidante estuvo entre 111.99 a 134.67 $\mu\text{mol TE/g}$. La morfología reveló una estructura esférica, heterogénea y amorfa. Tanto la temperatura como la concentración de almidón mostraron un efecto significativo sobre las propiedades de las microcápsulas, lo que podría aprovecharse para desarrollar colorantes naturales funcionales a partir de mashua negra.

PALABRAS CLAVE: Mashua negra, antocianinas, fenoles totales, capacidad antioxidante, microencapsulación

ABSTRACT: The Mashua Negra is a source of anthocyanins with high potential for use. The objective of the study was to evaluate the effect of drying temperature (120°C and 160°C) and concentration of quinoa starch (5% and 10%) as an encapsulating agent on the microencapsulation of black mashua anthocyanins by spray drying. The color, water activity, monomeric anthocyanin content, total phenolics, antioxidant capacity, and morphology of the microencapsulates were analyzed. The results showed the formation of purple microcapsules with luminosity values between 39.08 to 57.11, chroma a* between 11.10 to 9.87, and chroma b* between -13.43 to -10.81. The water activity varied between 0.23 to 0.29. The content of monomeric anthocyanins ranged between 3.90 to 7.80 mg cyanidin-3-glucoside/g, total phenols ranged between 1.57 to 2.02 mg of AGE/g, while the antioxidant capacity was between 111.99 to 134.67 $\mu\text{mol TE/g}$. The morphology revealed a spherical, heterogeneous, and amorphous structure. Both temperature and starch concentration showed a significant effect on the properties of the microcapsules, which could be exploited to develop functional natural colorants from mashua negra.

KEYWORDS: Mashua negra, anthocyanins, total phenols, antioxidant capacity, microencapsulation

1 | INTRODUCCIÓN

La mashua, es uno de los tubérculos cultivado desde hace siglos en regiones andinas del Perú, Bolivia, Ecuador, Venezuela y Colombia. Es el cuarto tubérculo más importante después de la papa, olluco y oca (Yapias et al., 2022).

En Perú existe diversidad de productos nativos con altos valores nutricionales, funcionales y terapéuticos en diferentes pisos ecológicos. La mashua negra presenta altas concentraciones de antocianinas y antioxidantes (Davalos, 2019), además de propiedades diuréticas y anticancerígenas (Muñoz et al., 2021). Sin embargo, su transformación y

aprovechamiento es escaso, consumiéndose mayormente como tubérculo.

Las antocianinas confieren coloración roja, azul o morada a flores, frutas y tubérculos. Además de pigmentos naturales, poseen capacidad antioxidante, antiinflamatoria y antibacteriana (Núñez, 2022), demandándose en la industria alimentaria para reemplazar colorantes sintéticos en diversos productos (Ramos, 2021). No obstante, presentan poca estabilidad frente a factores como temperatura, pH, luz y oxígeno (Aguirre et al., 2021), requiriéndose extender su vida útil.

La microencapsulación por atomización permite obtener un polvo antociánico soluble y estable usando un agente encapsulante (Orellano y Valverde, 2017). El almidón de quinua, con alta estabilidad ante retrogradación y buena solubilidad (Zárate, 2019), podría emplearse por el pequeño tamaño de sus gránulos que controlan la liberación del ingrediente activo (Li y Zhu, 2018). Además de estabilizar las antocianinas, la microencapsulación facilita su uso comercial en diversas aplicaciones alimentarias, farmacéuticas y cosméticas. Los microencapsulados en polvo tienen ventajas de manejo, almacenamiento y dosificación.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la temperatura de secado y concentración de almidón de quinua como encapsulante, en la microencapsulación de antocianinas de mashua negra.

2 | MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materia prima

La mashua negra utilizada provino de cultivos nativos del distrito de Tumay Huaraca, ubicado al sur de la provincia de Andahuaylas, región Apurímac con coordenadas geográficas 13°58'9.10"S y 73°27'29.50"O, a una altitud de 3,380 m. Se seleccionaron tubérculos en buen estado, sin presencia de podredumbre.

El almidón de quinua empleado como material encapsulante fue extraído de la variedad Blanca Junín, adquirida del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) de Andahuaylas

2.2 Obtención del almidón

El proceso incluyó la eliminación de impurezas y saponinas, el ablandamiento de los granos con un remojo en agua destilada, la trituración y filtrado, seguido de un lavado por centrifugación. Finalmente, el almidón se secó a 40 °C durante 48 horas en una estufa, se trituró y tamizó para obtener un almidón homogéneo y limpio (Jan et al., 2017).

2.3 Obtención del extracto antociánico

La mashua negra, previamente lavada y desinfectada, se cortó en trozos pequeños.

Luego, se tomó 100 g de pulpa, que se mezcló con 150 ml de agua ultrapura (mashua: agua, 1:1.5). La extracción se llevó a cabo mediante lixiviación acuosa en refrigeración durante 24 horas a 4°C y en oscuridad. Posteriormente, el extracto líquido se filtró al vacío para separar el bagazo sólido. El filtrado se mantuvo a 4 °C en condiciones oscuras para prevenir la descomposición de las antocianinas (Velásquez y Vélezmore (2022)).

2.4 Microencapsulación del extracto antocianínico

Se prepararon suspensiones de almidón de quinua al 5% y 10% en extracto antocianínico, y se homogenizaron a 5000 rpm (Figura 1). Finalmente, los extractos se atomizaron utilizando un secador mini spray Dryer Buchi-290 a temperaturas de 120 y 160 °C. Los polvos resultantes se almacenaron en condiciones de oscuridad hasta su utilización.

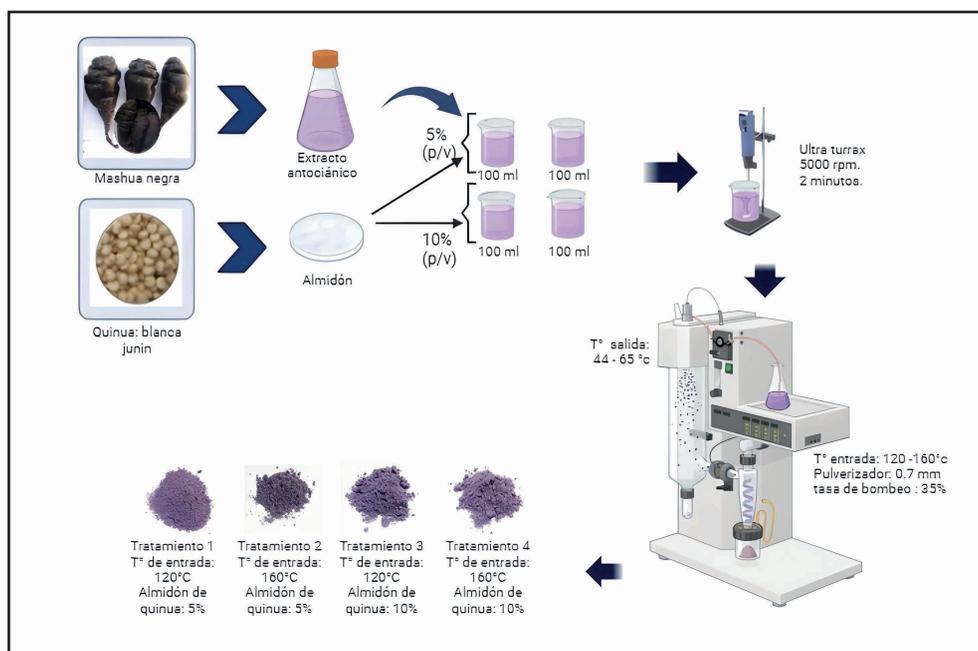


Figura 1. Diagrama del proceso de microencapsulación de antocianinas de mashua negra

2.5 Color

Se analizó el color de los microencapsulados siguiendo la metodología de Mendoza et al. (2016) con algunas modificaciones. Se empleó 1 gramo de encapsulados, las lecturas se realizaron por triplicado en un colorímetro Konica Minolta CR-5 previamente calibrado, y se registraron los valores de luminosidad (L), croma a* y croma b*.

2.6 Actividad de agua (a_w)

Los microencapsulados se analizaron en un determinador de actividad de agua portátil HygroPalm23-AW previamente calibrado

2.7 Morfología de los microencapsulados

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido Prisma E de Thermo Scientific en Massachusetts, EE. UU., con un voltaje de 30 kV y magnificación de 3000x, para analizar la morfología de los encapsulados. Las muestras se prepararon en cinta de carbono microscópica para garantizar una adecuada conductividad eléctrica.

2.8 Cuantificación de antocianinas monoméricas

Se realizó siguiendo la metodología de pH diferencial descrito por Giusti y Wrolstad et al. (2001). Se pesó 0.2 g de los microencapsulados y se diluyó en 25 ml de la solución constituida por etanol (99.9%) y HCL (1%) en proporción 85:15 (v/v), se almaceno por 24 horas en oscuridad, posteriormente se centrifugo a 5000 rpm por 10 minutos.

Se prepararon diluciones del extracto metanólico con solución buffer pH 1.0 de cloruro de potasio y con solución buffer pH 4.5 de acetato de sodio. Se midió la absorbancia de cada muestra a la longitud de onda de máxima absorbancia ($\lambda_{max}=520$ nm) y a 700 nm

La absorbancia final (A_{final}) se calculó utilizando la siguiente ecuación 1.

$$A_{final} = (A_{\lambda_{max}} - A_{700})_{pH\ 1.0} - (A_{\lambda_{max}} - A_{700})_{pH\ 4.5} \quad \text{Ec. 1}$$

El valor A_{final} se sustituyó en la ecuación 2 para obtener la concentración de antocianinas en la muestra:

$$\text{Antocianinas monoméricas (mg/g)} = \frac{(A_{final} * PM * FD * V)}{\epsilon * l * W} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde: PM es el peso molecular (cianidina-3-glucósido, 449.2 g/mol), FD es el factor de dilución, V es el volumen del solvente de extracción (mL), ϵ es el coeficiente de extinción molar a 510 nm (20941 L/mol.cm), l es el espesor de la cubeta (1cm), W es el peso de la muestra (g).

2.9 Preparación del extracto metanólico para fenoles totales y capacidad antioxidante

Se pesó 0.3 g de microencapsulados y se diluyó en 20 ml de metanol al 80 %, se almacenó por 24 horas en oscuridad, se centrifugó a 5000 rpm por 5 minutos, el sobrenadante fue almacenado a 4°C hasta su posterior análisis.

2.10 Cuantificación de fenoles totales

Se determinó mediante el método espectrofotométrico con el reactivo Folin-Ciocalteu señalada por Singleton et al. (1999), se tomó una alícuota de 900 μL del extracto metanólico, se adicionó 2400 μL de agua ultrapura, 150 de carbonato de sodio y 300 μL del reactivo Folin-Ciocalteu y la solución resultante se dejó en reposo por 15 min a temperatura ambiente y en oscuridad. Finalmente, las absorbancias de las muestras fueron leídas a 755 nm.

2.11 Determinación de la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se determinó por el método espectrofotométrico UV-vis con el reactivo DPPH, de acuerdo a la metodología descrita por Brand-Williams et al. (1995) para extractos hidrofílicos. Se preparó una curva de calibración con reactivo Trolox. Se tomó 150 μL de extracto de microencapsulados, se adicionó 2850 μL de la solución DPPH diluida, las muestras se dejaron reaccionar por 15 minutos y se midieron las absorbancias a una longitud de onda de 515 nm.

2.12 Análisis estadístico

El diseño de experimental fue un factorial 2^2 , se evaluó el efecto principal de temperatura de secado y concentración de almidón de quinua como agente encapsulante e interacción sobre las propiedades físicas, compuestos bioactivos y capacidad antioxidante de los microencapsulados, con un nivel del 5%. El análisis estadístico se realizó utilizando los programas estadísticos de Statgraphics Centurión XVI.I, Minitab 17.1 y Microsoft Excel.

3 | RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Color de los microencapsulados

Los resultados presentados en la Tabla 1 muestran los valores de luminosidad, croma a y croma b. Los resultados revelaron que los tratamientos T3 y T4, que contenían un 10% de almidón de quinua, exhibieron valores más altos de luminosidad y croma b en comparación con los tratamientos T1 y T2 que presentaron los valores más altos para el croma a. Este fenómeno se atribuye a la influencia de los gránulos de almidón, compuestos por amilosa y amilopectina, cuya relación puede variar según su origen botánico. Esta variación incide en el color y tiende a conferir una tonalidad más pálida a los productos, lo que fue corroborado por Laqui et al. (2013).

Por su parte, Ersus y Yurdagel (2007) también han señalado la influencia significativa de la temperatura de secado en el color de los microencapsulados. Los cambios en la temperatura de secado pueden resultar en la pérdida de color de los productos. Además,

la variabilidad en el color de las antocianinas microencapsuladas puede estar relacionada con diferencias en la estructura química de las antocianidinas predominantes en diversos frutos y tubérculos, como se destacó en el estudio de Brown et al. (2005).

Tratamientos	Luminosidad			Croma a			Croma b		
	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s	\bar{x}	\pm	s
T1	39.08	\pm	0.13	11.10	\pm	0.06	-13.43	\pm	0.03
T2	45.61	\pm	0.11	11.47	\pm	0.17	-11.17	\pm	0.14
T3	56.87	\pm	0.47	9.24	\pm	0.07	-10.34	\pm	0.21
T4	57.11	\pm	0.15	9.87	\pm	0.06	-10.81	\pm	0.04

Donde \bar{x} : promedio, s: desviación estándar

Tabla 1. Color de microencapsulados

La Figura 2.a representa la superficie de respuesta correspondiente a la luminosidad (L), revelando que el uso de un 5% de almidón condujo a valores más bajos de luminosidad en el rango de 39 a 46, especialmente a temperaturas de entrada de 120 y 160 °C. Al analizar la interacción de los factores en la Figura 2.b, se observa que la combinación de temperaturas y concentraciones de almidón en su nivel alto resultó en microencapsulados con una mayor luminosidad. Este fenómeno puede explicarse, en parte, por la característica inherente de la quinua, cuyo almidón es naturalmente claro, con una luminosidad cercana a 100 (Maza, 2020). La claridad de este almidón de quinua contribuye a reducir la intensidad del color de las antocianinas microencapsuladas.

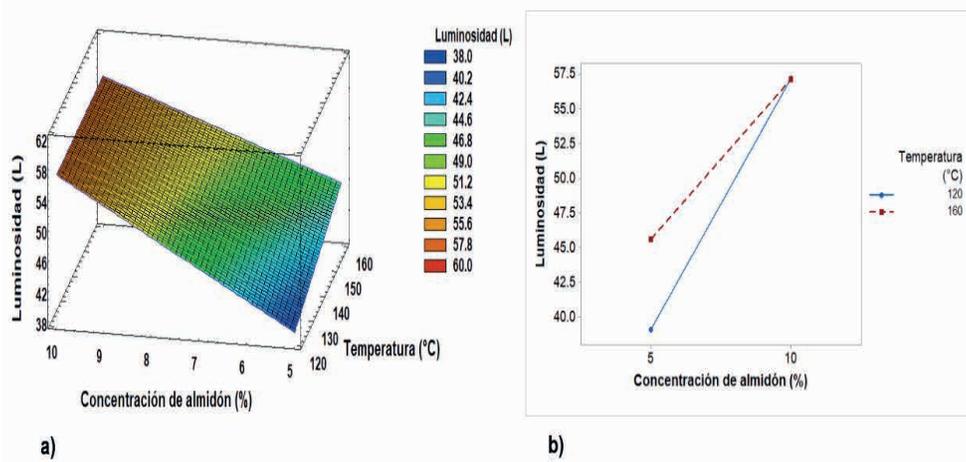


Figura 2. Superficie de respuesta e interacción para luminosidad

La Figura 3.a, muestra la superficie de respuesta para el croma a*, que osciló entre 9.2 a 11.7. La Figura 3.b ilustra los efectos principales para el croma a*, donde se observa que el empleo de una temperatura en su nivel alto (160°C) resulta en un mayor valor de

croma a*. En relación a la concentración de almidón de quinua, se observan valores más altos para el croma a* cuando se utiliza un 5% de almidón, en comparación con un 10%. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que indican que el color es influenciado tanto por el material encapsulante como por la estructura química de las antocianinas. Las antocianinas con mayores metoxilaciones tienden a producir tonalidades rojas. Además, es importante señalar que valores más altos en croma a* en el producto encapsulado están relacionados con una apariencia más agradable para el consumidor.

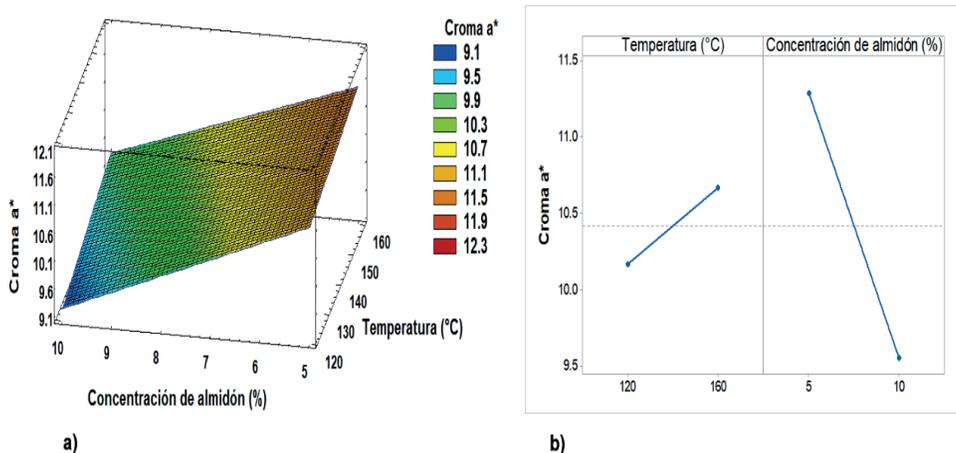


Figura 3. Superficie de respuesta y efectos principales para croma a*

La Figura 4.a, presenta la superficie de respuesta para el croma b*, que varía en un rango de 10.5 a 13.5. Estos resultados indican que se obtienen mejores resultados en el croma b* de los microencapsulados cuando se emplea un 5% de almidón. La Figura 4.b muestra la interacción de los factores en relación al croma b*. En ella, se observa que al usar una temperatura baja (120°C) y una concentración de almidón de quinua en su nivel bajo (5%), se obtienen valores más bajos para el croma b*. Los resultados del croma b* están relacionados con la reacción de los grupos hidroxilos del almidón con las antocianinas, actuando como sitios activos. Esto provoca que las antocianinas se retengan tanto en la superficie como en el interior de los gránulos, como se ha señalado en investigaciones anteriores (Villacrez, 2013).

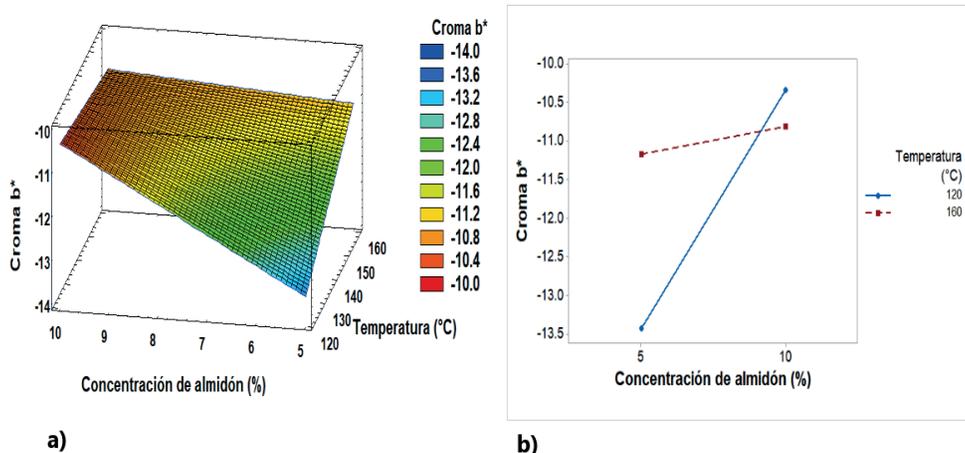


Figura 4. Superficie de respuesta e interacción para cromado b*

3.2 Actividad de agua

Los resultados de actividad de agua se presentan en la Tabla 2, los valores oscilaron entre 0.23 a 0.29. El tratamiento T4 mostró menos actividad de agua. Las diferencias observadas en los valores de actividad de agua están vinculadas al efecto de la temperatura de secado. En general, un aumento en la temperatura de secado y en la concentración de encapsulante tiende a resultar en valores más bajos de actividad de agua. Este fenómeno se debe a su influencia directa en la humedad del atomizado, como se ha señalado en investigaciones anteriores (Santos y Santos, 2021), lo cual, a su vez, incide en la estabilidad de los microencapsulados (Masaquiza, 2018).

Por otro lado, Belitz y Grosch (1998) destacan que valores de actividad de agua inferiores a 0.60 contribuyen a la estabilidad del producto, ya que implican una menor concentración de agua libre en su composición, lo que parcialmente inhibe la actividad microbiana. En este contexto, los valores obtenidos, siendo menores a 0.3, sugieren que estos microencapsulados son productos que pueden conservarse durante un período de almacenamiento

Tratamientos	Actividad de agua		
	\bar{x}	\pm	s
T1	0.29	\pm	0.002
T2	0.26	\pm	0.002
T3	0.25	\pm	0.000
T4	0.23	\pm	0.001

Donde: \bar{x} : promedio, s: desviación estándar

Tabla 2. Resultados de actividad de agua de microencapsulados

La Figura 5.a ilustra la superficie de respuesta para la actividad de agua, que varía en el rango de 0.22 a 0.29. Se observa que el aumento de la temperatura (160 °C) y la concentración de almidón (10%) resultan en valores más bajos de actividad de agua. En la Figura 5.b, se presenta la interacción correspondiente a la actividad de agua, resulta evidente que, a temperaturas más elevadas, la actividad de agua disminuye, lo cual guarda una relación proporcional con la temperatura de secado, como se ha señalado previamente (Aguilar, 2017). Además, de acuerdo con las observaciones de Righi Da Rosa et al. (2010), el uso de diferentes encapsulantes o combinaciones de diferentes proporciones influye en las propiedades físicas de los microencapsulados, incluido el valor de actividad de agua.

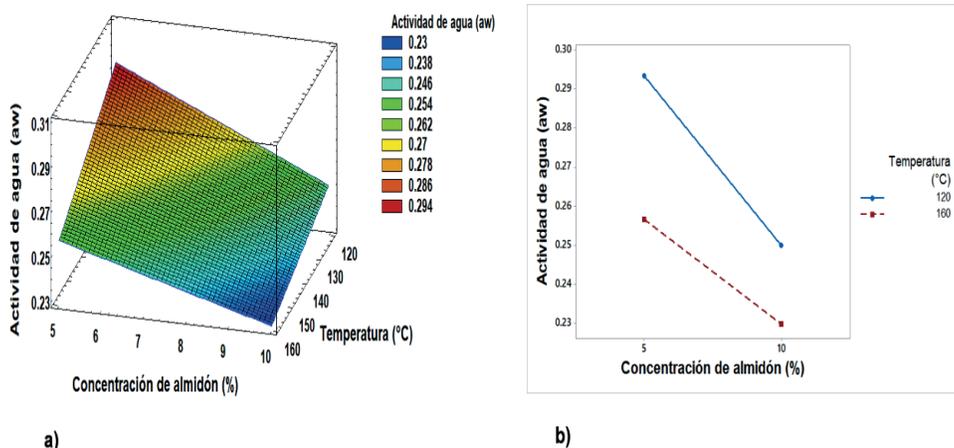


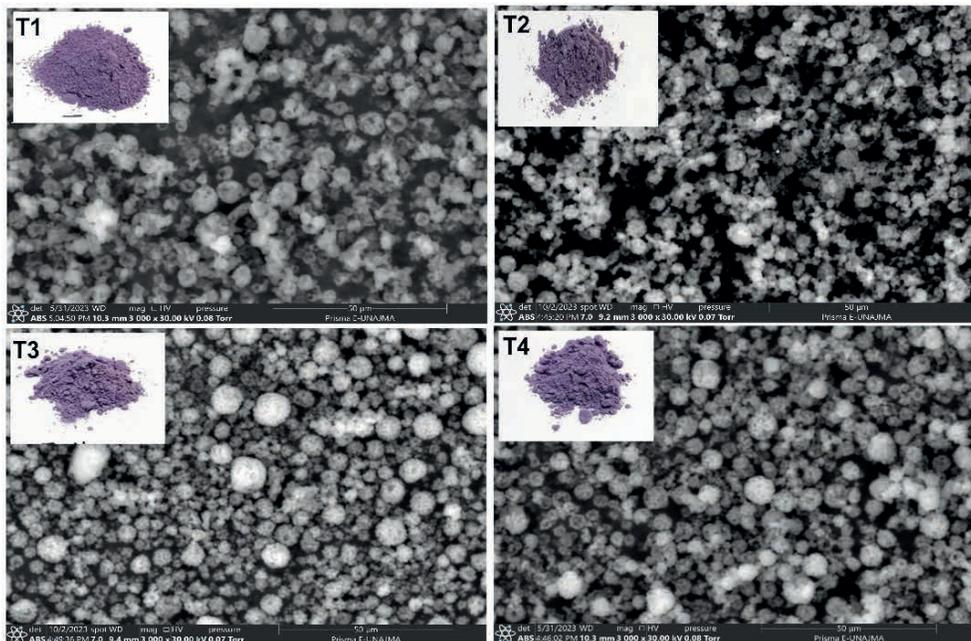
Figura 5. Superficie de respuesta e interacción para actividad de agua (a_w)

3.3 Morfología de los microencapsulados

La morfología de los microencapsulados observadas a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) se muestra en la Figura 6. Estas imágenes muestran claramente la formación de microesferas, pero también revelan la presencia de hendiduras en la superficie de los microencapsulados, lo que les confiere una estructura amorfa con grietas de diferentes tamaños. Es interesante notar que en los tratamientos que emplearon un 5% de almidón (T1 y T2), se observa la formación de aglomeraciones debido a la mayor concentración de antocianinas y a la formación más lenta de las microcápsulas a 120 °C. Por otro lado, en los tratamientos T3 y T4, con un 10% de almidón de quinua, se aprecia que los microencapsulados exhiben microesferas más definidas y separadas.

Estos resultados son consistentes con hallazgos previos, como los informados por Villacrez (2013) en microencapsulados con almidón de maíz y yuca, donde se observó una aglomeración de partículas pequeñas de almidón. Según Villacrez, estos cambios en la morfología se deben al efecto de los procesos hidrotérmicos en las características

fisicoquímicas de los almidones. Además, Halahlah et al. (2022) mencionan que la estructura amorfa de los microencapsulados se debe al uso de almidones nativos, que tienen esta particularidad cuando se emplean como matriz.



Donde: T1 (120 °C) y T2 (160 °C) encapsulados con 5% de almidón de quinua, T3 (120 °C) y T4 (160 °C) encapsulados con 10% de almidón de quinua

Figura 6. Morfología de los microencapsulados

3.4 Antocianinas monoméricas

Los resultados se detallan en la Tabla 3, donde los valores de cianidina-3-glucósido variaron en el rango de 3.90 a 7.80 mg/g de muestra en base seca. Se destacó que los tratamientos T1 y T2 exhibieron los valores más elevados.

Estos hallazgos se asemejan a los reportados por Ersus y Yurdagel (2007), quienes informaron valores similares que oscilaron entre 4.829 a 6.309 mg/g en microencapsulados de zanahoria negra. Además, Orellano y Valverde (2017) señalaron valores que variaron entre 1.347 a 2.077 mg/g en antocianinas de mashua morada microencapsuladas con maltodextrina.

Por otro lado, Vergara et al. (2020) presentaron un valor promedio de 1.340 mg/g para antocianinas de papa morada microencapsuladas con maltodextrina a una temperatura de secado de 130°C. Además, mencionaron que la variación en el contenido de antocianinas en los microencapsulados está relacionada con el efecto de la temperatura de secado y la relación del extracto con el encapsulante. Kar et al. (2019) y Ersus y Yurdagel (2007)

afirman que, a temperaturas de secado más elevadas, se produce una mayor pérdida de antocianinas durante el proceso de secado por aspersión.

Tratamientos	Antocianinas (mg de cianidina-3-glucósido/g)		
	\bar{x}	\pm	s
T1	7.80	\pm	0.02
T2	7.32	\pm	0.01
T3	4.35	\pm	0.04
T4	3.90	\pm	0.04

Donde: \bar{x} : promedio, s: desviación estándar

Tabla 3. Antocianinas monoméricas en los microencapsulados

La Figura 7.a ilustra la superficie de respuesta para el contenido de antocianinas monoméricas, que varió entre 4 a 7.9 mg de cianidina-3-glucósido/g. Se observó que los valores más elevados se obtuvieron al emplear un 5% de almidón, posiblemente debido a una mayor nucleación resultante de la aglomeración de las partículas del almidón. En la Figura 7.b, se presentan los efectos principales, donde se evidencia que al utilizar temperatura más baja (120°C), se obtuvo un mayor contenido de antocianinas monoméricas, en vista que temperaturas más elevadas, provocan la degradación e hidrólisis de las antocianinas (García et al., 2022).

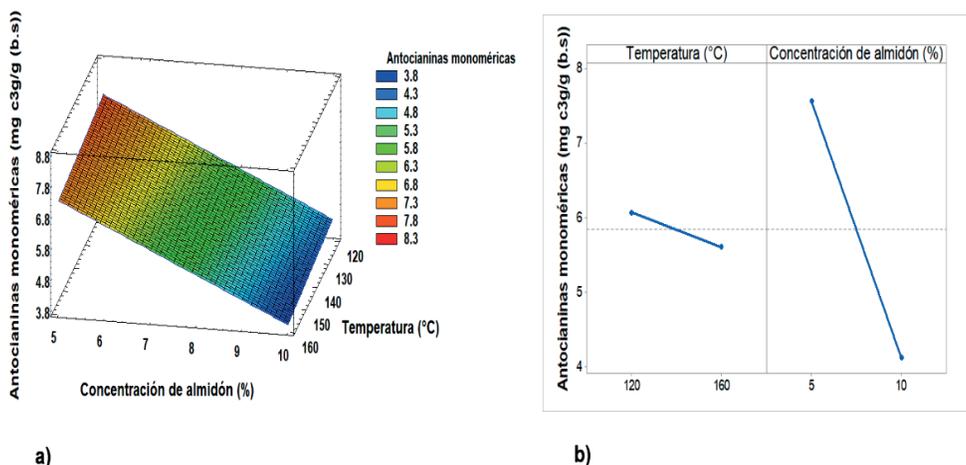


Figura 7. Superficie de respuesta y efectos principales para contenido de antocianinas monoméricas

3.5 Fenoles totales

Los resultados, presentados en la Tabla 4, muestra que los tratamientos T1 y T2 exhibieron la concentración más alta de fenoles totales, seguidos por los tratamientos T3

y T4. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Velásquez y Vélezmore (2022) en microencapsulados de mashua morada, los cuales se secaron a temperaturas comparables, entre 120°C y 160°C, utilizando concentraciones de almidón de oca rosa que variaron entre 3.5% y 12%. En ese estudio, los valores de fenoles totales oscilaron entre 1.96 a 4.17 mg AGE/g. Las diferencias en los resultados pueden atribuirse a las propiedades fisicoquímicas y funcionales específicas del almidón, las cuales varían según la fuente de extracción. Es importante señalar que muchos almidones nativos se emplean comúnmente en la encapsulación de compuestos bioactivos hidrofílicos (Velásquez y Vélezmore, 2022). Además, investigadores como Lindeboom et al. (2005) y Li y Zhu (2018) han destacado la idoneidad de los almidones naturales de quinua para retener compuestos bioactivos, lo que respalda los resultados favorables obtenidos en nuestros tratamientos en términos de contenido de fenoles totales.

Tratamientos	Fenoles totales (mg AGE/g)		
	\bar{x}	\pm	s
T1	1.94	\pm	0.00
T2	2.02	\pm	0.01
T3	1.56	\pm	0.00
T4	1.63	\pm	0.00

Donde: \bar{x} : promedio, s: desviación estándar

Tabla 4. Contenido de fenoles totales en los microencapsulados

En la Figura 8.a, observamos la superficie de respuesta para el contenido de fenoles totales, que oscila entre 1.6 a 1.9 mg AGE/g. Estos resultados sugieren que un aumento en la temperatura mejora la retención de fenoles totales. En la Figura 8.b, se presentan los efectos principales, donde es evidente que al emplear una temperatura de secado elevada (160°C) y una concentración de almidón de quinua baja (5%), se logra una mayor concentración de fenoles totales. Este incremento en el contenido de fenoles totales podría estar relacionado con las altas temperaturas de secado. Esto se debe a que se forma rápidamente una costra en la superficie de las microcápsulas, como resultado de la aceleración en la velocidad de secado de las gotas. Esta costra actúa como aislante térmico, evitando la pérdida de calor y contribuyendo a la preservación del contenido de fenoles totales (Rosales et al., 2023).

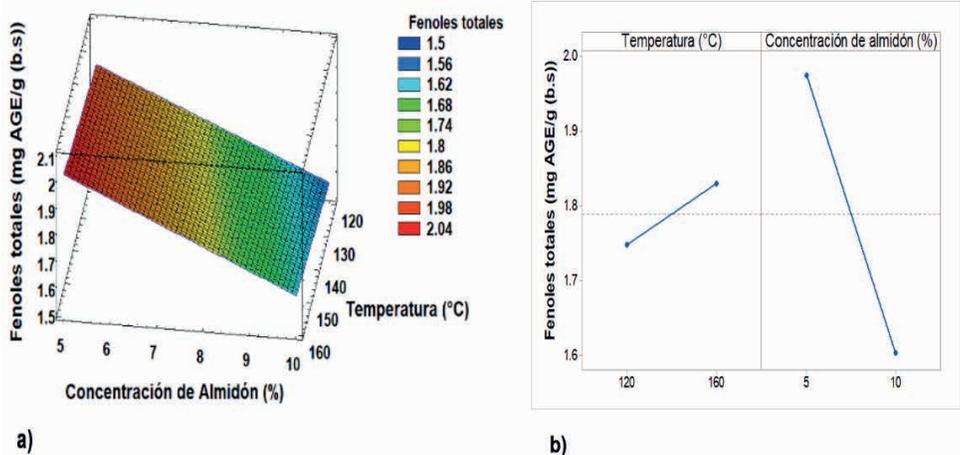


Figura 8. Superficie de respuesta y efectos principales para fenoles totales

3.6 Capacidad antioxidante

Los valores de capacidad antioxidante de los microencapsulados oscilaron entre 131.64 a 134.39 μmol de equivalentes de Trolox (TE)/g en base seca (Tabla 5). El tratamiento T2 mostró el mayor nivel de capacidad antioxidante, seguido por T1, T3 y T4. Estos resultados difieren de los reportados por Orellano y Valverde (2017), quienes obtuvieron valores mayores entre 352.89 y 543.96 μmol TE/g (b.s.) en microencapsulados de mashua morada con maltodextrina (5, 7.5 y 10%) y temperaturas de 120, 130 y 140°C. Asimismo, Velásquez y Vélezmorro (2022) mostraron valores menores de 30.56 a 47.83 μmol TE/g (b.s.) en su estudio. Las variaciones podrían deberse a diferencias en el contenido de antocianinas y otros compuestos antioxidantes entre variedades de mashua y matrices encapsulantes utilizadas. De acuerdo con Quispe et al. (2019) y Figueroa (2021), la capacidad antioxidante presenta una relación directa con el contenido de polifenoles totales, ya que estos contribuyen predominantemente a la actividad de eliminación de radicales libres en los extractos vegetales.

Tratamiento	Capacidad antioxidante (μmol de TE/g)		
	\bar{x}	\pm	s
T1	132.25	\pm	0.42
T2	134.39	\pm	0.24
T3	131.64	\pm	0.33
T4	131.78	\pm	0.28

Donde: \bar{x} : promedio, s: desviación estándar

Tabla 5. Capacidad antioxidante en los microencapsulados

La Figura 9.a ilustra la superficie de respuesta relacionada con la capacidad antioxidante de los microencapsulados, con valores que oscilan entre 131.5 a 134 $\mu\text{mol TE/g}$ (b.s.). En esta representación, se destaca un incremento notable a medida que aumenta la temperatura de entrada, especialmente a 160 °C. Por otro lado, la Figura 9.b muestra las interacciones entre los factores y su influencia en la capacidad antioxidante. Es evidente que al utilizar la temperatura de entrada más alta (160°C) en combinación con una concentración baja de almidón de quinua (5%), se obtiene un nivel superior de capacidad antioxidante. En línea con la investigación de Rosales et al. (2022), se ha observado que la protección y biodisponibilidad del material activo en productos encapsulados depende en gran medida de la temperatura de entrada, la cantidad de núcleo y la proporción de materiales de pared utilizados. Además, los estudios de Vargas y Suquillo (2022) señalan que los microencapsulados de extractos antocianínicos representan una fuente valiosa de nutrientes y antioxidantes. En este contexto, nuestros resultados indican que los microencapsulados obtenidos presentan resultados prometedores para posibles aplicaciones futuras.

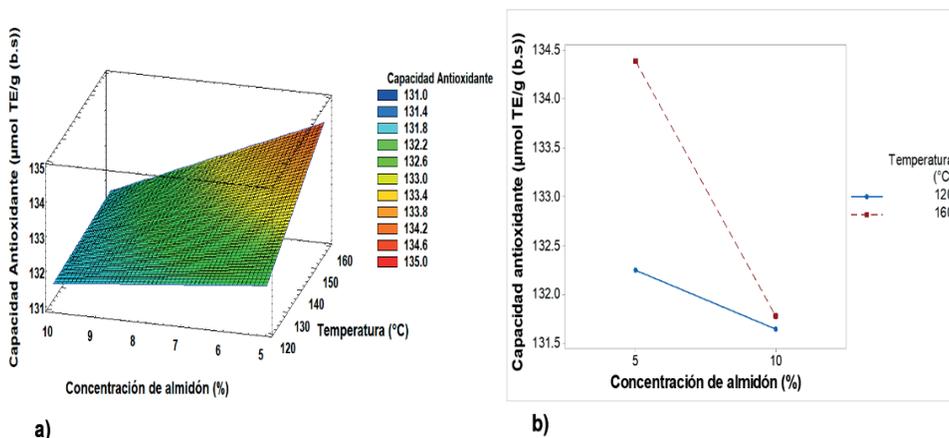


Figura 8. Superficie de respuesta e interacción para capacidad antioxidante

4 | CONCLUSIONES

La temperatura de secado y concentración de almidón de quinua mostraron un efecto significativo en las características de los microencapsulados de antocianinas de mashua negra. La temperatura de 160°C y 5% de almidón de quinua resultaron en microcápsulas con mejor perfil de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante. La microencapsulación por aspersión empleando almidón de quinua como agente encapsulante es una alternativa viable para estabilizar antocianinas de mashua negra. Los microencapsulados en polvo facilitarían la incorporación de estos pigmentos naturales en diversos alimentos, con un efecto antioxidante adicional. Los resultados de este estudio evidencian el potencial de

aprovechamiento de antocianinas de mashua mediante microencapsulación.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional José María Arguedas, al Vicerrectorado de Investigación, en especial al Laboratorio de Investigación en Nanotecnología de Alimentos (LINA) y el Laboratorio de Investigación en Materiales para el Tratamiento de Aguas (LIMTA) y a todos los que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- Arrazola, G., Herazo, I., & Alvis, A. (2014). Microencapsulación de antocianinas de berenjena (*Solanum melongena* L.) mediante Secado por aspersion y evaluación de la estabilidad de su color y capacidad antioxidante. *Información Tecnológica*, 25(3), 43-51. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300006>
- Belitz H. y Grosch W. (1998). Book Reviews : Química de los alimentos. *Food Science and Technology International*, Editorial Acribia 4(3). <https://doi.org/10.1177/108201329800400310>
- Brown, C. R., Culley, D., Yang, C. P., Durst, R., & Wrolstad, R. (2005). Variation of anthocyanin and carotenoid contents and associated antioxidant values in potato breeding lines. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 130(2), 174-180. <https://doi.org/10.21273/jashs.130.2.174>
- Ersus, S., & Yurdagel, U. (2007). Microencapsulation of anthocyanin pigments of black carrot (*Daucus carota* L.) by spray dryer. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 805-812. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.009>
- García, T. S. M., Chire, F. G. C., Repo, C. R., & Ureña, P. M. O. (2022). Efecto de la fritura sobre los componentes bioactivos de la papa nativa (*Solanum tuberosum* sp.) Puka Ambrosio. *Revista Chilena de Nutrición*, 49(1), 7-16. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182022000100007>
- Giusti, M.M., Wrolstad, R.E. (2001). Unit F1.2: Anthocyanins. Characterization and measurement with uv-visible spectroscopy. In: Wrolstad RE editors. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. New York: John Wiley and Sons, 1-13.
- Halahlah, A., Piironen, V., Mikkonen, K. S., & Ho, T. M. (2022). Polysaccharides as wall materials in spray-dried microencapsulation of bioactive compounds: Physicochemical properties and characterization. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2038080>
- Jan, K. N., Panesar, P. S., Rana, J. C., & Singh, S. (2017). Structural, thermal and rheological properties of starches isolated from Indian quinoa varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 102, 315–322. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.04.027>
- Kar, A., Kumar Mahato, D., Singh Patel, A., & M. Bal, L. (2019). The Encapsulation Efficiency and Physicochemical Characteristics of Anthocyanin from Black Carrot (*Daucus Carota* Ssp. *Sativus*) as Affected by Encapsulating Materials. *Current Agriculture Research Journal*, 7(1). <https://doi.org/10.12944/carj.7.1.04>

- Laqui, V. C., Guerrero, K. M. L., & Laqui, W. (2013). Agroindustria, sociedad y ambiente. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 2(19), 37–58. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7365257>
- Li, G., & Zhu, F. (2018). Quinoa starch: Structure, properties, and applications. *Carbohydrate Polymers*, 181, 851–861. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.067>
- Lindeboom, N., Chang, P. R., Falk, K. C., & Tyler, R. T. (2005). Characteristics of starch from eight quinoa lines. *Cereal Chemistry*, 82(2), 215–222. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0216>
- Masaquiza, J. I. M. (2018). *Evaluación de la actividad antimicrobiana y antioxidante de antocianinas microencapsuladas de maíz morado (Zea mays L.), papa morada (Solanum Tuberosum L.) y mortiño (Vaccinium floribundum Kunth)* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato], Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/27559>
- Maza, I. N. N. (2020). *Extracción y caracterización fisicoquímica y tecnofuncional de carbohidratos tipo almidón de cinco variedades de Quinoa (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina)*, Lima, Perú. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4465>
- Mendoza, S. 1, 2, E. v., Curi Borda, C. K., Rojas Mercado, V. J., Alvarado Kirigin, J. A., & Bello, A. (2016). Encapsulation, characterization and thermal stability of anthocyanins from zea mays l. (purple corn). *Revista Boliviana de Química*, 33(5), 183–189. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602016000500005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Muñoz, O. F., Robles, C. R., Chirre, F. J. H., Santisteban Rojas, O., Feliciano, N. J. C., & León, W. D. F.-P. de. (2021). Identificación de los principios activos de la mashua negra (*Tropaeolum tuberosum*) y el efecto del proceso de elaboración de una bebida mix de mashua con piña. *Ingeniería Industrial*, 40, 171–190. <https://doi.org/10.26439/ING.IND2021.N40.5150>
- Núñez, C. B. I. (2022). *Extracción, microencapsulación y evaluación de la capacidad antioxidante de las antocianinas presentes en las flores de jamaica (Hibiscus sabdariffa) cultivadas en el cantón Milagro, provincia del Guayas* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato], Ambato Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/36009>
- Navarro Valdez, K., Capillo Herrera, N., Calixto Cotos, M. R., & Santisteban Rojas, O. P. (2020). Extracción y Microencapsulación de compuestos antioxidantes de la semilla de Oenocarpus bataua mart. *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 547–554. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.04.10>
- Orellano, G. E. V., & Valverde, T. J. M. (2017). Propiedades físicas, antocianinas y capacidad antioxidante del atomizado de Mashua (*Tropaeolum Tuberosum*) encapsulado con maltodextrina. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4776>
- Ramos, C. E. (2021). *Antocianinas: revisión bibliográfica de su procesamiento y potencial uso como colorante natural en alimentos* [Tesis de maestría, Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas], Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185067>
- Rosales, C. S., Navarro, C. R. O., Bello, P. L. A., Vargas, T. A., & Palma, R. H. M. (2023). Optimal conditions for anthocyanin extract microencapsulation in taro starch: Physicochemical characterization and bioaccessibility in gastrointestinal conditions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 227, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.136>

Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)

Velásquez, B. F. F., & Vélezmore, S. C. E. (2022). Microencapsulation of Purple Mashua Extracts Using Andean Tuber Starches Modified by Octenyl Succinic Anhydride. *International Journal of Food Science*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8133970>

Vergara, C., Pino, M. T., Zamora, O., Parada, J., Pérez, R., Uribe, M., & Kalazich, J. (2020). Microencapsulation of Anthocyanin Extracted from Purple Flesh Cultivated Potatoes by Spray Drying and Its Effects on In Vitro Gastrointestinal Digestion. *Molecules* 2020, 25(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25030722>

Yapias, R. J. M., Astete, J. M. A., Uscuchagua, Y. Y. C., & Sánchez, M. C. R. (2022). Características fisicoquímicas, composición nutricional y compuestos bioactivos en tres variedades de Mashua (*Tropaeolum tuberosum* Ruiz y Pavón): Una revisión. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 34(2), 41–51. <https://doi.org/10.37815/RTE.V34N2.891>