

OPTIMIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA FORMULACIÓN DE PULPA DE UCHUVA (*Physalis peruviana*) PARA MEJORAR SU PROCESAMIENTO EN EL SECADO POR ATOMIZACIÓN

EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF CAPE GOOSEBERRY PULP (*Physalis peruviana*) FORMULATION TO IMPROVE ITS PROCESSING BY SPRAY DRYING

Misael CORTÉS R. Ph.D.^{1*}; Gustavo HERNÁNDEZ S., MSc.²; Héctor J. CIRO V., Ph.D.¹

Recibido: Junio 22 de 2014 Aceptado: Abril 26 de 2015

RESUMEN

Antecedentes: En Colombia, el fruto de la uchuva (*Physalis peruviana*) está identificado como un fruto promisorio de exportación, por lo que la mejora de su procesamiento representa contribuir a una mayor competitividad de la cadena. **Objetivos:** el objetivo de este trabajo fue optimizar en función de parámetros fisicoquímicos y reológicos la formulación de una suspensión a base de pulpa de uchuva mezclada con los aditivos maltodextrina (MD) y goma arábiga (GA) con fines de ser utilizada en secado por atomización. **Métodos:** La optimización se realizó aplicando un diseño experimental central compuesto mediante superficie de respuesta con dos factores (MD y GA) y variables de respuesta (densidad, °Brix, a_w , pH, y parámetros reológicos). **Resultados:** La caracterización reológica de las suspensiones mostró un comportamiento tipo adelgazante con esfuerzo de cedencia (Modelo de Hershel-Bulkley). La suspensión que mejor se ajustó a los criterios de optimización para fines de secado por atomización fue para la formulación basada en MD (24%) y GA (0%) con caracterización reológica de Herschel-Bulkley tipo adelgazante con índice de consistencia ($K = 0,119 \pm 0,017 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$), índice de potencia ($n = 0,75 \pm 0,03$) y esfuerzo de cedencia ($\tau_0 = 0,092 \pm 0,069 \text{ Pa}$). Los resultados para las propiedades fisicoquímicas en el punto optimizado fueron densidad = $1,167 \pm 0,005 \text{ g/mL}$, °Brix = $35,5 \pm 0,5$, $a_w = 0,974 \pm 0,002$. El pH y τ_0 no fueron estadísticamente significativos ($p > 0,05$) en la formulación de las suspensiones. **Conclusiones:** La optimización experimental representa una herramienta importante que permitió obtener una formulación de uchuva con MD y GA apta para secado por aspersión, representando un ahorro en tiempo y dinero para el investigador y la industria.

Palabras clave: *Physalis peruviana* L., goma arábiga, maltodextrina, reología, optimización experimental.

ABSTRACT

Background: In Colombia, the Cape gooseberry fruit (*Physalis peruviana*) is identified as a promising export fruit, so improving its processing is contributing to greater competitiveness of the chain. **Objectives:** The aim of this study was to optimize suspension of cape gooseberry pulp mixed with gum arabic (GA) and maltodextrin (MD) with the purpose of being used in spray drying. **Methods:** The optimization was performed using a central composite design with response surface of two factors (MD and

¹ Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Córdoba. Montería, Córdoba.

* Autor de correspondencia: mcortesro@unal.edu.co

GA) and response variables (density, °Brix, water activity (a_w), pH, and rheological parameters). **Results:** The rheological characterization of the suspensions showed a shear thinning behavior with yield stress (Herschel-Bulkley Model). The results indicated that best suspension to be used in spray drying would be formulated with MD (24%) and GA (0%) showing a rheological response of Herschel-Bulkley fluid with consistency index ($K=0.119\pm 0.017 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$), power index ($n=0.75\pm 0.03$) and yield stress ($\tau_0=0,092\pm 0,069 \text{ Pa}$). To the optimized condition, the results for the physicochemical properties were density ($1.167 \pm 0.005 \text{ g/mL}$), °Brix (35.5 ± 0.5), a_w (0.974 ± 0.002). Additionally, the pH and τ_0 of Herschel Bulkley model was not statistically significant ($p>0.05$) in the suspension formulation. **Conclusions:** The experimental optimization is an important tool that allowed us to obtain a formulation of gooseberry with MD and GA suitable for spray drying, representing a saving in time and money for research and industry.

Keywords: *Physalis peruviana* L., gum arabic, maltodextrin, rheology, experimental optimization.

INTRODUCCIÓN

Physalis es un importante género de la familia *Solanaceae* contando con cerca de 120 especies que se distribuyen a través de las regiones tropicales y subtropicales del mundo, encontrándose principalmente en América, con un pequeño número de especies en Europa y en los países del suroriente y centro de Asia. *Physalis peruviana* L., denominada comúnmente en Colombia como uchuva (Cape gooseberry) es una de las especies más conocidas de este género y es ampliamente utilizada en la medicina tradicional como anticancerígeno, es cultivada en zonas alpinas y subparamos, entre 2300 y 3000 m.s.n.m y temperaturas entre 6 y 17°C, con características fisicoquímicas como pH DE 3,5 A 3,7; °Brix entre 13 y 15 y acidez alrededor de 1,6 a 2,0% (1-7). La uchuva es uno de los frutos de mayor tasa de exportación desde Colombia con niveles de exportación alrededor de 28 millones de dólares y 5.200 toneladas (8), siendo Europa el destino principal, destacándose Alemania y Holanda con más del 60% de la demanda (9).

La técnica de secado por atomización es la más utilizada para obtener productos en polvo y micropartículas (10). Consiste en agregar el compuesto que se requiere recuperar en una solución de un polímero que lo vehiculice y forme una cavidad protectora. Para el secado de pulpas de frutas, el polímero se mezcla con la pulpa, formando una suspensión, que luego es bombeada a una cámara de atomización. El fluido es atomizado por un disco rotatorio o boquilla de presión y mediante la circulación del aire a temperaturas de entrada superiores a 100 °C e inferiores a 250 °C, se produce la eliminación del agua y la formación de las micropartículas (10-11). Entre los materiales auxiliares de secado más frecuentemente usados para el secado

por atomización se encuentran las gomas (arábiga, carragenina); proteínas (gelatina, caseinato); almidones modificados y maltodextrinas (12-16). La goma arábica (GA) es un biopolímero obtenido del exudado del árbol acacia, de la familia *Leguminosae*, originaria de Egipto de las especies *senegal* y *seyal*, es uno de los materiales formadores de película más efectivo para microencapsular; sin embargo, el costo y su limitada disponibilidad comercial, han restringido su uso a nivel industrial (13-16). Por su parte, la maltodextrina (MD) es un polisacárido no edulcorante, con un aporte nutricional de 4 calorías por gramo, obtenido de la hidrólisis parcial, ácida y/o enzimática del almidón de papa, arroz o maíz obteniendo entre 2 y 20 equivalentes de dextrosa (DE). La aplicación de la MD en el proceso de encapsulación está asociada a la baja viscosidad, a altos contenidos de sólidos, a la buena solubilidad, a la capacidad de formar películas y a su bajo costo (17-19).

La reología representa una ciencia de mucho interés en el campo de los alimentos, ya que estudia la deformación y flujo de las materias primas sin procesar, de los productos intermedios o semielaborados y los productos finales de la industria alimentaria (20-21). Se ha encontrado que el aumento de las concentraciones de MD conduce a la producción de tamaños de partículas mayores, si se mantiene constante la presión de atomización o la velocidad de rotación del disco; esto puede estar relacionado con la viscosidad de la alimentación, la cual aumenta de manera exponencial con la concentración de MD. Algunos autores también encontraron que a mayor viscosidad disminuye el rendimiento de sólidos cuando la presión de atomización o las RPM del disco atomizador son constantes (22-24). Los modelos reológicos representan una relación matemática que permite caracterizar la naturaleza física

de un fluido, estudiando la viscosidad en función de la deformación y/o el tiempo. Para ello, se utilizan normalmente los modelos constitutivos donde se relacionan el esfuerzo cortante con la razón de deformación y/o tiempo (25-27).

Actualmente el nivel de industrialización de la uchuva está en ascenso concentrándose particularmente en el uso del producto fresco (fruta), mermeladas, gelatinas, bocadillos, aromáticas, producto liofilizados, pulpas concentradas o productos mínimamente procesados. Sin embargo, procesos industriales de aprovechamiento de la pulpa usando tecnología de secado por aspersión con el objetivo de desarrollar productos en polvo diferenciados no se han reportado en Colombia, productos que podrían generar expectativas a nivel industrial con características de comercialización nacional o internacional.

Así, el objetivo de este trabajo fue optimizar la formulación de una suspensión a base de pulpa de uchuva mezclada con GA (1,14 - 13,86%) y MD (9,51 - 26,49%), en función de parámetros reológicos y fisicoquímicos, y con fines de ser utilizada en secado por atomización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron uchuvas frescas (UF) ecotipo Colombia provenientes de fincas productoras del municipio de la Unión, Departamento de Antioquia (2.500 m.sn.m y temperatura promedio de 13°C). Las uchuvas se seleccionaron libres de daños externos y con una madurez comercial en la escala de color 3 a 4, según la norma técnica colombiana, NTC 4580 (28). Frutos de uchuva fueron desintegrados inicialmente en una licuadora industrial a 3.500 rpm, luego esta pulpa desintegrada se despulpó mecánicamente a 3.500 rpm con un cedazo de 1000 μ (despulpadora, Comek S.A.); y finalmente, este producto se refinó manualmente en una malla de 500 μ para obtener la pulpa final, que se almacenó a 4°C. Se utilizó como aditivo MD (Shandong Boalingbao Biotechnology Co Ltd[®]) con DE entre 19 a 20, solubilidad 98%, pureza 96,4%. Adicionalmente, la GA (Caragun International – Additifs Alimentaires[®]) de solubilidad 98% y pureza 96%. La suspensión de alimentación al secador por aspersión (pulpa más aditivo) se homogenizó utilizando un Ultraturrax T25, Janke & Kunkel IKA – Labortechnik a 8000 rpm durante 2 minutos.

Análisis fisicoquímicos y reológicos.

Se determinó la actividad de agua (a_w) con un higrómetro de punto de rocío a 25 °C AquaLAB Decagon serie 3TE (AOAC 978.19B(c) 1998) (29), sólidos solubles o °Brix con un refractómetro Leica auto ABBE (AOAC 932.12, 1998) (29), pH con un potenciómetro Schott CG840B (AOAC 981.12, 1998) (29) y la densidad del líquido por el método del picnómetro a 20 °C (AOAC 945.06, 1998) (29). Se utilizó un reómetro Brookfield modelo DV-III Ultra y geometría cilindros concéntricos, con una separación de 0,9 mm, temperatura controlada de 20 °C, velocidad de deformación de 10^{-2} a 10^2 s⁻¹ y un tiempo total de ensayo de 1000 s. Las pruebas reológicas rotacionales de las cuales se obtuvieron las respectivas curvas de flujo y reogramas, se realizaron aplicando una rampa de descenso y ascenso, tomando está última curva para determinar el ajuste de los modelos reológicos independientes del tiempo. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Bingham (ecuación 1), Casson (ecuación 2), Herschel-Bulkley (ecuación 3) y Ley de potencia (ecuación 4):

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{(\tau_0)} + \sqrt{K} \sqrt{(\dot{\gamma})} \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$\tau = \tau_0 + K (\dot{\gamma}^n) \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad \text{Ecuación 4.}$$

La viscosidad aparente (μ_a) en Pa.s., está dada por (20):

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ecuación 5.}$$

En las expresiones anteriores τ es el esfuerzo cortante aplicado en Pa, $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación por cortante en s⁻¹, K, τ_0 y n son constantes provenientes de la regresión para cada modelo respectivo.

Optimización de la suspensión

Para el proceso de optimización de la suspensión se aplicó un diseño experimental de superficie de respuesta central compuesto con dos factores (%MD y %GA) y variables de respuesta (densidad, °Brix, a_w , pH y parámetros reológicos), utilizando

el software Design Expert 6.0. Los parámetros reológicos para la optimización fueron seleccionados de acuerdo al mejor modelo según la bondad de ajuste en la regresión. La región de análisis se fijó para límites inferior y superior como sigue: MD (9,51 – 26,49%) y GA (1,14 -13,86%).

La tabla 1 muestra los 11 experimentos (3 puntos centrales y 8 no centrales) definidos por el diseño experimental, generando el siguiente modelo:

$$Y = \mu + \alpha * MD + \beta * GA + \gamma * MD * GA + \delta * MD^2 + \varepsilon * GA^2. \text{ Ecuación 6}$$

Tabla 1. Diseño experimental para las suspensiones de Uchuva.

Factores		
Nº	MD (%)	GA (%)
1	26,49	7,50
2	12,00	3,00
3	24,00	3,00
4	12,00	12,00
5	18,00	7,50
6	18,00	1,14
7	9,51	7,50
8	18,00	7,50
9	24,00	12,00
10	18,00	13,86
11	18,00	7,50

Las restricciones para el proceso de optimización fueron establecidas maximizando los sólidos solubles medidos en °Brix y la actividad de agua (a_w) y minimizando el pH, índice de consistencia (K) e índice de flujo (n) (22-23).

RESULTADOS

Caracterización reológica

La figura 1 presenta las curvas de fluidez de las 11 formulaciones del diseño experimental para las suspensiones de uchuva.

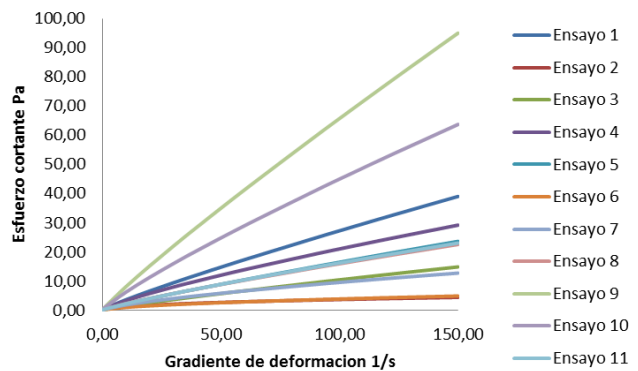


Figura 1. Curva de fluidez, esfuerzo cortante vs gradiente de deformación.

La tabla 2, presenta los resultados para los modelos reológicos que presentaron la mejor bondad de ajuste (Casson y Herschel-Bulkley) determinada por un alto coeficiente de determinación (R^2). De los modelos ajustados, fue el modelo de Bingham el que presentó la menor bondad de ajuste ($R^2 < 0,7$), seguido por la ley de potencial ($R^2 \approx 0,91$). En general, se puede observar un mejor ajuste con el modelo de Herschel-Bulkley con relación al modelo de Casson, lo cual se puede explicar al hecho de que el modelo de Casson no presenta la habilidad de expresar la disminución de la viscosidad con el incremento tasa de corte (la viscosidad es constante para este tipo de modelo), comportamiento típico presentado en las suspensiones preparadas a partir de MD y GA

Tabla 2. Parámetros reológicos para los Modelos de Casson y Herschel-Bulkley.

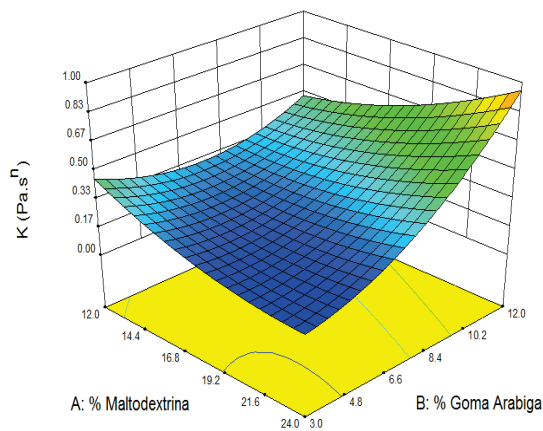
Ensayo	Casson				Herschel Bulkley			
	$K \times 10^{-1}$	n	$\tau_0 \times 10^{-1}$	R^2	$K \times 10^{-1}$	n	$\tau_0 \times 10^{-1}$	R^2
1	2,69±0,67	0,50	1,98±0,79	0,98	4,50±0,85	0,89±0,04	1,72±0,65	0,999
2	0,47±0,12	0,50	6,80±1,17	0,93	4,69±0,95	0,45±0,15	0,02±0,05	0,919
3	0,95±0,14	0,50	1,04±0,55	0,95	1,80±0,45	0,88±0,07	1,22±0,72	0,983
4	1,67±0,26	0,50	4,07±1,47	0,96	5,03±0,76	0,81±0,03	0,98±0,18	0,999
5	1,73±0,81	0,50	1,30±0,26	0,93	2,58±0,88	0,90±0,08	2,28±1,91	0,956
6	0,40±0,04	0,50	2,90±0,83	0,95	2,83±0,98	0,57±0,09	0,04±0,02	0,906
7	0,71±0,07	0,50	4,20±0,99	0,95	3,64±0,43	0,71±0,02	0,20±0,16	0,959
8	1,37±0,83	0,50	1,94±0,59	0,96	3,02±0,34	0,86±0,04	1,46±0,77	0,998
9	5,87±1,16	0,50	2,67±0,49	0,97	9,94±0,94	0,91±0,02	0,63±0,24	0,998
10	3,76±1,00	0,50	4,48±0,51	0,97	8,56±0,32	0,86±0,01	0,75±0,14	0,999
11	1,44±1,01	0,50	1,56±0,79	0,94	2,94±0,15	0,87±0,02	0,88±0,25	0,951

La tabla 3, presenta los efectos asociados a los factores de estudio con sus interacciones, para las variables respuesta índice de consistencia (K) e índice de flujo (n). El ANOVA usando un modelo de regresión de segundo orden fue significativo ($p < 0,05$) mostrando que los factores %MD y %GA con sus interacciones son influyentes en el rango de formulación, mientras la variable respuesta esfuerzo de cedencia (τ_c) no fue significativa ($p > 0,05$) en el rango de estudio.

Tabla 3. Coeficientes del modelo estadístico para los parámetros reológicos de Hershel-Bulkley.

Efecto	Índice de consistencia (Pa.s ⁿ)	Índice de flujo (n)
μ	0,28	0,88
α	0,040	0,098
β	0,21	0,10
γ	0,20	-0,083
Δ	0,073	-0,037
ϵ	0,15	-0,080
Modelo ($p < 0,05$)	0,0001	0,0022
Falta de ajuste ($p < 0,05$)	0,2343	0,1218
R ²	98,97	95,49

La figura 2, muestra la superficie de respuesta para los parámetros reológicos K y n del modelo de Herschel-Bulkley, en función del % MD y %GA utilizados en la suspensión.



Caracterización fisicoquímica.

Las tablas 4 y 5, indican los parámetros fisicoquímicos de densidad de suspensión, °Brix, a_w y pH, y los efectos asociados a los factores de estudio con sus interacciones, respectivamente. El ANOVA, mostró efectos significativos ($p > 0,05$) con los factores de %MD y %GA excepto para el pH ($p < 0,05$), siendo su valor promedio $3,36 \pm 0,03$. Estos resultados son similares a los reportados por Dak *et al.* (34-35).

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de las suspensiones de uchuva.

Nº	Factores		Parámetros fisicoquímicos			
	MD (%)	GA (%)	Densidad (g/mL)	°Brix	a_w	pH
1	26,49	7,50	1,195±0,002	42,20±0,02	0,969±0,002	3,37±0, 01
2	12,00	3,00	1,125±0,002	27,40±0,04	0,978±0,003	3,35±0, 01
3	24,00	3,00	1,170±0,001	37,00±0,02	0,973±0,002	3,38±0, 02
4	12,00	12,00	1,152±0,002	34,00±0,09	0,974±0,004	3,36±0, 01
5	18,00	7,50	1,160±0,002	35,00±0,07	0,973±0,001	3,38±0, 02
6	18,00	1,14	1,134±0,001	30,00±0,02	0,977±0,002	3,32±0, 01
7	9,51	7,50	1,123±0,001	29,00±0,01	0,978±0,003	3,33±0, 03
8	18,00	7,50	1,155±0,001	34,40±0,02	0,974±0,002	3,34±0, 01
9	24,00	12,00	1,187±0,003	42,00±0,05	0,970±0,004	3,41±0, 02
10	18,00	13,86	1,171±0,005	39,60±0,03	0,973±0,002	3,41±0, 01
11	18,00	7,50	1,156±0,002	35,00±0,02	0,975±0,001	3,33±0, 04

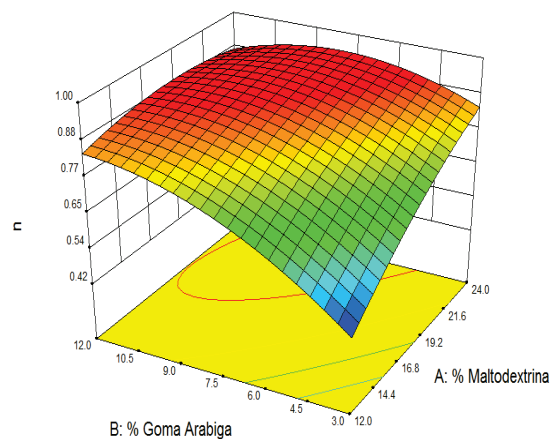


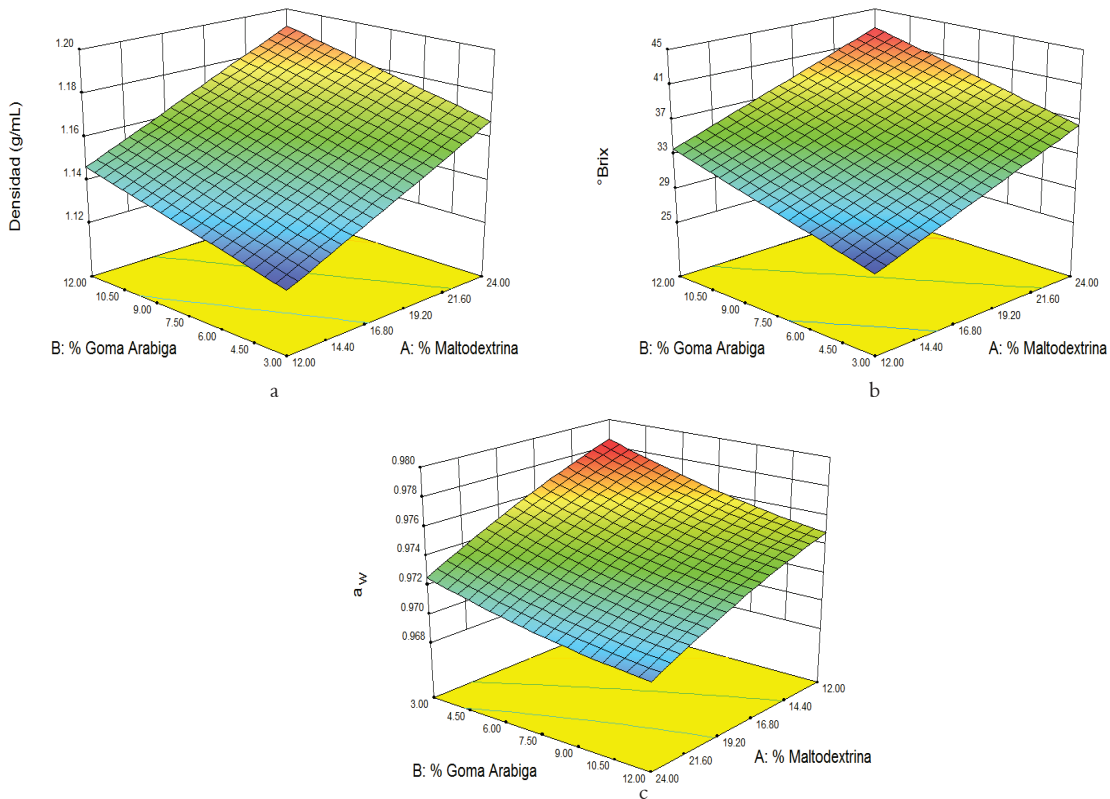
Figura 2. Superficie de respuesta de los parámetros reológicos de Herschel-Bulkley: índice de consistencia (2a); índice de flujo (2b).

Tabla 5. Análisis de varianza para las variables fisicoquímicas de las suspensiones de uchuva.

Efecto	Densidad (g/mL)	°Brix	a_w
μ	1,16	34,80	0,970
α	0,023	4,53	-0,0027
β	0,012	3,15	-0,0016
γ	-0,0025 ^{NS}	-0,40 ^{NS}	0,00025 ^{NS}
Δ	0,0016 ^{NS}	0,38 ^{NS}	-0,00037 ^{NS}
ε	-0,0015 ^{NS}	-0,025 ^{NS}	0,00037 ^{NS}
Modelo (p<0,05)	0,0002	<0,0001	0,0031
Falta de ajuste (p<0,05)	0,2078	0,3756	0,5901
R ²	98,22	99,64	94,81

NS: no significativo

La figura 3, presenta las superficies de respuesta de los parámetros fisicoquímicos (densidad, °Brix y a_w) en función de los factores de estudio (%MD y %GA).

**Figura 3.** Superficie de respuesta de los parámetros fisicoquímicos para suspensiones de uchuva: a) densidad; b) °Brix y c) a_w .

Optimización de la suspensión

Para la optimización del proceso, las variables ($\text{pH}=3,36\pm 0,03$) y esfuerzo de cedencia ($\tau_0=0,092\pm 0,069$ Pa) al no presentar efecto estadístico ($p>0,05$), no se tuvieron en cuenta en las restricciones del proceso de optimización. Adicionalmente, el modelo seleccionado para la optimización fue el Herschel-Bulkley, ya que los parámetros reológicos presentaron la mejor bondad de ajuste.

Los resultados de la optimización se indican en la tabla 6, en la cual la optimización I es dada teniendo presente la formulación basada con MD y GA. Debido a que el % GA es en proporción mucho menor al % MD en la formulación y que esta supera en costos a la MD en un relación de 5 a 6 veces su precio, se decidió generar una segunda optimización de la suspensión considerando la ausencia de la GA (Optimización II).

Tabla 6. Resultados del proceso de optimización para suspensiones de uchuva.

Optimización	MD (%)	GA (%)	Variables de respuesta optimizadas				
			Densidad (g/mL)	oBrix	aw	K (Pa.s ⁿ)	n
I	22,17	3,0	1,160±0,007	35,2±0,7	0,974±0,003	0,143±0,012	0,83±0,08
II	24,00	0	1,167±0,005	35,5±0,5	0,974±0,002	0,119±0,017	0,75±0,03

DISCUSIÓN

Caracterización reológica

Los gráficos de la figura 1 presentan una tendencia no lineal a medida que crece el gradiente de deformación, lo cual identifica un comportamiento no newtoniano, el cual se define como aquellas sustancias cuyo índice de flujo (n) es menor o mayor a 1 (21).

La tabla 2, muestra que los modelos de Casson y Herschel-Bulkley, describen adecuadamente el comportamiento de un fluido no newtoniano, tipo adelgazante con esfuerzo de cedencia ($n < 1$ y $\tau_0 > 0$). Comportamiento reológico para concentraciones acuosas entre 10-30 %GA han sido similares a los encontrados en este trabajo (30) con lo que se refuerza el efecto del nivel de concentración de los sistemas de alto peso molecular en la respuesta reológica para las suspensiones acuosas. Para la mayoría de las matrices alimentarias y productos de naturaleza biológica, los modelos de Casson y Herschel-Bulkley generalmente presentan un mejor ajuste a los datos experimentales con respecto a los modelos de ley de potencia y Bingham (31). Estos modelos han sido utilizado para describir el comportamiento reológico de diversos productos como pulpa de mango (32-35), guayaba (36), cereza de las indias (37) jugo de zanahoria pasteurizado (38) y miel de abeja (39).

Para el modelo de Herschel-Bulkley, el índice de consistencia (K) presentó valores en el intervalo de 0,180 a 0,994 Pa.sⁿ, los cuales son menores con respecto a otras pulpas como la de mango a 16,6°Brix de 3,41 a 4,57 Pa.sⁿ, en el intervalo de 10 a 60 °C (32) y en la pulpa de papaya de 12 a 51°Brix de 0,7 a 15,3 Pa.sⁿ, en el intervalo de 25 a 55 °C (40). Adicionalmente, los valores del índice de comportamiento de flujo (n) para las pulpas de mago y papaya (0,154 y 0,240 respectivamente), fueron menores a los obtenidos para la pulpa de uchuva con MD y GA, donde los aditivos no generaron efectos significativos en la matriz alimenticias evaluada (32-35). Estas diferencias son debidas a la diferente naturaleza del

producto y características fisicoquímicas y estructurales de la pulpa y los aditivos estudiados (37-41). Desde el punto de vista industrial, la disminución en los índices de consistencia, índice de flujo y la baja magnitud del esfuerzo de cedencia facilitarían el transporte por bombeo, el intercambio de calor y de masa durante el procesamiento por secado por aspersión disminuyendo también las pérdidas de cabeza de presión durante el transporte de flujo, resultando en poca demanda de energía para el proceso (27).

Los modelos descritos en la tabla 3, pueden ser usados de forma predictiva (falta de ajuste no significativa) para estimar los parámetros reológicos del modelo Herschel-Bulkley en función del %MD y %GA. Para la variable respuesta índice de consistencia (K), los efectos asociados a los factores de estudio con sus interacciones son positivos, lo que muestra que un incremento en los valores de formulación dará como resultado un mayor valor de K . En la variable índice de flujo (n), el efecto individual de cada factor es positivo, pero la combinación de los factores tiene un efecto negativo en el valor esperado de la variable respuesta.

La figura 2a, muestra que altos %MD con bajos %GA generan bajos valores de K , mientras que altos %MD con altos %GA generan los mayores valores para el índice de consistencia (K). Además, se observa un efecto positivo de cómo incrementa el valor de K cuando el %MD es mayor y se aumenta progresivamente con el %GA, lo que refuerza el efecto que la adición de sistemas de alto peso molecular contribuyen a los efectos espesantes. Se observa el efecto espesante con el incremento de la concentración de goma arábiga, situación similar ha sido encontrada en otros productos tales como suspensiones de mango y piña (25). Adicionalmente, la figura 2b, muestra la relación entre los aditivos usados y el índice de flujo (n) obtenido, indicando que altos %MD y %GA incrementan su valor. Por otro lado, menores valores de n se obtienen para bajos %MD y %GA y con ello menor efecto viscoso.

En las superficies de repuestas de la figura 2, se nota la alta correlación entre los aditivos, principalmente en los parámetros reológicos mostrando puntos máximos y mínimos, indicando que en estos puntos se obtiene la máxima interacción de la pulpa de uchuva con la MD y GA (33-42). Esta interacción pulpa-aditivo sobre los parámetros reológicos es explicada por sus estructuras, donde los aditivos empleados presentan amplia cantidad de puentes de hidrógenos, y diferencias conformacionales, donde la MD posee una conformación de cadena lineal a diferencia de la GA, que es ramificada (32-42).

Caracterización fisicoquímica.

Los resultados de las tablas 4 y 5, indicaron una relación lineal entre las variables de respuesta con respecto a los %MD y %GA. Adicionalmente, los altos coeficientes de regresión obtenidos ($R^2 > 0,94$) y falta de ajuste no significativa ($p > 0,05$), indican que los modelos obtenidos son de naturaleza predictiva en el rango de los % de aditivos estudiados.

Los valores de densidad y °Brix aumentaron con los %MD y %GA y como consecuencia también aumentaron el índice de consistencia, aunque la a_w mostró tendencia a disminuir con el porcentaje de los aditivos. Este comportamiento ha sido reportado en diversos productos como pulpa de mango (32-35), guayaba (36), cereza de las indias (37) jugo de zanahoria pasteurizado (38) y miel de abeja (39). La pulpa uchuva mezclada con MD y GA obtenida presentó mayor contenido de sólidos solubles a las obtenidas en mango por Vidal *et al.* (32) (°Brix = 16,6, densidad = 1,112 g/mL y $a_w = 0,981$); y que las obtenidas en la pulpa de papaya por Telis *et al.* (40) (°Brix = 12, densidad = 1,232 g/mL en el intervalo de 25°C a 55°C y $a_w = 0,973$).

En la figura 3, se observan que los cambios son más apreciables en los °Brix, debido al aporte de sólidos solubles de la MD como un polisacárido moderadamente dulce; mientras que la densidad incrementa desde 1,123 a 1,195 g/mL debido al peso molecular de ambos aditivos (19). Pedroza *et al.* (16), evidenciaron el efecto significativo de la MD y la GA sobre la densidad, aunque sus interacciones no fueron significativas, situación evidenciada en esta investigación. Los °Brix para las suspensiones estudiadas incrementaron de 27,4% a 42,2%, donde el %MD tiene un efecto mayor que el %GA. Sin embargo, la interacción de estos componentes no fue significativa, lo que es atribuible a que los °Brix

son el mismo % de sólidos solubles, por lo que no hay más componentes sólidos en la mezcla que refracten la luz en ángulo diferente a un azúcar. Este aumento de los °Brix se considera benéfico, ya que incrementa el tamaño de partícula (37-41). La a_w presenta una tendencia a disminuir con respecto a los %MD y %GA, siendo estos cambios observados mínimos (0,969 a 0,978), aunque el modelo consideró la incidencia del %MD y %GA como un efecto significativo. Las interacciones para los aditivos no presentaron efectos significativos; aun así, ambos hidrocoloides confirieron un ligero efecto depresor de la a_w en la suspensión con respecto a pulpa de uchuva ($0,969 \pm 0,005$ a $0,985 \pm 0,004$, respectivamente).

El pH no presentó diferencias significativas con respecto a los aditivos empleados, siendo su variación en el rango de 3,32 a 3,41. No obstante, se observa una mayor influencia por efecto del incremento del %GA, ya que en solución su pH varía entre 4 y 6 (42), y que se hace sinérgico con el incremento del %MD.

Optimización de la suspensión.

Un análisis entre las dos optimizaciones de la tabla 6, no muestra diferencias apreciables entre las variables evaluadas. En la optimización II los valores de K y n son menores con relación a la Optimización I, lo que favorece un menor consumo de energía de bombeo y atomización, un incremento del rendimiento en la recuperación de sólidos de la pulpa mediante un procedimiento de secado por atomización, y una disminución de los costos, lo cual es respaldado por Lopera *et al.* (42), Tonon *et al.* (22) y Jinapong *et al.* (23).

Las restricciones consideradas se consideran importantes, debido a que a mayor densidad y °Brix, se obtiene un mayor tamaño de partícula en el polvo y el proceso de secado se realiza a menores costos; a menor a_w se da mayor interacción entre el aditivo y el agua por lo que se requiere mayor energía para evaporar el agua, en el secado por aspersión. Por otro lado, si la suspensión tienen un menor índice de flujo ($n < 1$), requerirá menor potencia de bombeo y de atomización, y al ser relacionado con un índice de consistencia menor, se facilita una mejor transmisión de calor desde el aire hasta la gota atomizada, generando un secado rápido, obteniéndose un producto en polvo homogéneo y estable (22-24) (44).

CONCLUSIONES

Las suspensiones evaluadas presentaron un comportamiento reológico de fluidos no newtoniano y adelgazante con el esfuerzo, siendo los modelos reológicos de Hersey Bukley y Casson los que presentaron el mejor ajuste de regresión. El conocimiento de los factores reológicos y fisicoquímicos permitió obtener la combinación óptima de las materias primas que admitan aumentar al máximo los sólidos, con una viscosidad apta para alimentar al secador por aspersión. Este diseño logra, con pocas réplicas, optimizar las variables del proceso, lo que significa ahorro en tiempo y dinero para el investigador y la industria. La combinación de MD y la pulpa de uchuva ($^{\circ}\text{Brix} = 35,5\% \pm 0,5$), sin GA y con parámetros reológicos de acuerdo al modelo de Herschel-Bulkley ($K = 0,119 \pm 0,017$ y $n = 0,75 \pm 0,03$), permitieron obtener una mínima viscosidad aparente logrando el equilibrio entre las variables básicas que permiten el bombeo de la suspensión y favoreciendo el rendimiento del producto en un proceso posterior de secado por aspersión.

Conflicto de intereses.

Los autores manifiestan que no se tiene ningún interés comercial o asociativo que represente un conflicto de intereses en relación con el trabajo presentado.

Limitaciones del presente estudio.

A pesar de que el esfuerzo de cedencia se obtuvo por ajuste matemático (modelo de regresión), debió de realizarse una validación del valor encontrado usando el método de aspas y/o dinámica oscilatoria, técnicas instrumentales que no se tenían disponibles. Por lo tanto, se sugiere en futuros estudios que impliquen un análisis reológico con esfuerzos de cedencia su validación experimental. Adicionalmente, en este estudio se evaluó la caracterización reológica y fisicoquímica a temperatura constante. Sin embargo, sería importante evaluar el efecto de la temperatura para las variables fisicoquímicas y reológicas, ya que a nivel industrial para algunas aplicaciones se debe de calentar la suspensión para ser alimentada al secador por atomización.

REFERENCIAS

1. Wu SJ, Tsai JY, Chang SP, Lin DL, Wang SS, Huang SN, Ng LT. Supercritical carbon dioxide extract exhibits enhance antioxidant and anti-inflammatory activities of *Physalis peruviana*. *J. Ethnopharmacol.* 2006; 108(3): 407-413.
2. Bastos GN, Santos AR, Ferrerira VM, Costa AM, Bispo CI, Silveira AJ, et al. Antinociceptive effect of the aqueous extract obtained from roots of *Physalis angulata* L. on mice. *J. Ethnopharmacol.* 2006; 103(2): 241-245.
3. Wu SJ, Ng LT, Huang YM, Lin DL, Wang SS, Huang SN, et al. Antioxidant activities of *Physalis peruviana*. *J. Biol Pharm Bull.* 2005; 28(6):963-936.
4. Pérez-Castorena AL, García M, Martínez M, Maldonado E. Physalins from *Physalis solanaceus*. *J. Biochem Syst Ecol.* 2004; 32(12):1231-1234.
5. Wu SJ, Ng LT, Lin DL, Huang SN, Wang SS, Lin CC. *Physalis peruviana* extract induces in human Hep G2 cells through CD95/CD95L system and the mitochondrial signaling transduction pathway. *J. Cancer Lett.* 2004; 215(2):199-208.
6. Mayorga H, Duque C, Knapp H, Winterhalter P. Hydroxyester disaccharides from fruits of cape gooseberry (*Physalis peruviana*). *J. Phytochemistry.* 2002; 59(4): 439-445.
7. Ahmad S, Malik A, Yasmin R, Ullah N, Gul W, Khan PM, et al. Whitanolides from *Physalis Peruvian*, *J. Phytochemistry.* 1999; 50(4):647-651.
8. Ministerio de agricultura y desarrollo rural de Colombia y CCI. Sistema de inteligencia de mercados: información de monitoreo internacional [Internet]. 2006. [consulta: febrero de 2008.]. No. 13. Bogotá. 12. Disponible en: http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2006427154348_uchuvamarzo.pdf;
9. CCI - Corporación Colombia Internacional. Perfil del producto (uchuva). Boletín 10, 2002.
10. Barbosa M, Borsarelli C, Mercadante A. Light stability of spray-dried bixin encapsulated with different edible polysaccharide preparations. *J. Food Res Int.* 2005; 38(8-9): 989-994.
11. Vila, Jato JL. Tecnología Farmacéutica. Madrid, 1997.
12. Kanakdande D, Bhosale R, Singhal RS. Stability of cummin oleoresin microencapsulated in different combination of gum arabic, maltodextrina and modified starch. *J. Carbohydr Polym.*, 2007; 67(4): 536-541.
13. Yadav MP, Igartuburu JM, Yan Y, Nothnagel NA. Chemical investigation of the structural basis of the emulsifying activity of gum arabic. *J. Food Hydrocolloid.* 2007; 21(2):297-298.
14. Ramakrishnan A, Pandit N., Badgujar M., Bhaskar C., Rao M., Encapsulation of endoglucanase using a biopolymer gum Arabic for its controlled release. *J. Bioresource Technol.* 2007; 98(2): 368-372.
15. Phillips G, Williams P. Studies on acacia exudates gums. *J. Food Hydrocolloid.* 2005; 19(4):661-667.
16. Pedroza-Islas R, Vernon-Carter EJ, Durán C, Trejo-Martínez S. Using biopolymer blends for shrimp feedstuff microencapsulation I. Microcapsule particle size, morphology and microstructure. *J. Food Res Int.* 1999; 32(5): 367-374.
17. Madene A, Jacquot M, Scher J, Desobry S. Flavour encapsulation and controlled release a review. *J. Int Food Sci Tech.* 2006; 41(1); 1-21.
18. Avaltroni F, Bouquerand PE., Normand V. Maltodextrin molecular weight distribution influence on the glass transition temperature and viscosity in aqueous solutions, *J. Carbohydr Polym.* 2004; 58(3):323-324.
19. Pedroza-Islas R, Alvarez- Ramirez J, Vernon-Carter EJ. Using biopolymer blends for shrimp feedstuff microencapsulation. II: dissolution and floatability kinetics as selection criteria. *J. Food Res Int.* 2000; 33(2):119-124.
20. Briggs J y Steffe J. Using Brookfield data and the Mitschka method to evaluate power law foods. *J. Texture Studies.* 1997; 28(5): 517-522.
21. Barbosa-Cánovas GV, Kokini JL, Mal Ibarz A. The rheology of semiliquid foods. *J. Food Nutr Res.* 1996; 39:1-69.
22. Tonon R, Brabet C, Hubinger M. Influence of process conditions on the physicochemical properties of acai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *J. of Food Engineering.* 2008 Oct; 88(3):411-418.

23. Jinapong N, Supphantharika M., Jammong P. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *J. of Food Engineering*, 2008; 84(2): 194–205.
24. Keogh MK, Murray CA., O'kennedy BT. Effects of ultrafiltration of whole milk on some properties of spray-dried milk powders. *J. International Dairy Journal*. 2003; 13(12):995–1002.
25. Pelegrine D, Vidal J, Gasparetto C. Study of aparent viscosity of mango (Keitt) and pineapple (Pérola) pulps. *J. Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 2000; 20(1):128-131.
26. Sánchez C, Oria R, Sánchez G. Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés de guayaba (*Psidium guajava* L). [PhD Thesis]. España: Universidad de Zaragoza, 2006.
27. Haminiuk C, Sierakowski M, Izidoro D y Masson M. Rheological Characterization of Blackberry Pulp. *Braz. J. Food Technol*. 2006; 9(4): 291-296.
28. ICONTEC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Frutas frescas: Uchuva. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana NTC 4580. 15, 1999.
29. AOAC. Official methods of analysis. Washington D.C: Association of Analytical Chemists; 1998.
30. Tanaka S, Fang Y, Nishinari K. Anomalous Rheological Behaviour of Gum Arabic Solutions. *J. Foods and Food Ingredients*. 2006; 211 (3):216-221.
31. Holdsworth SD. Rheological models used for the prediction of the flow properties of foods products: a literatura review. *J. Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*. 1993; 71: 139-179.
32. Vidal J, Pelegrine D, Gasparetto C. Effect of the rheological behavior of mango pulp (*Magfífera indica* L-Keitt). *J. Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 2004; 24(1):39-42.
33. Branco IG, Gasparetto CA. Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices. *Ciênc. Tecnol. Aliment*. 2003; supl: 166–171.
34. Dak M., Verma RC., Sharma GP. Flow characteristics of juice of “Totapuri” mangoes. *J. Food Eng*. 2006; 76(4): 557-561.
35. Dak M, Verma RC, Jaaffrey SNA. Effect of temperature and concentration on rheological properties of “Kesar” mango juice. *J. Food Eng*. 2007; 80(4): 1011-1015.
36. Sánchez C, Oria R, Sánchez-Gimeno AC. Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés de guayaba (*Psidium Guajaba* L.). Simposio Poscosecha. Orihueña, Valencia, España. 2006.
37. Da Silva F, Guimaraes D, Gasparetto. C. Rheology of acerola juice: effects of concentration and temperature. *Ciênc. Tecnol. Aliment*. 2005; 25(1): 121- 126.
38. Vandresen S, Quadri M, De Souza J, Hotza D. Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices. *J. Food Eng*. 2009 Jun; 92 (3): 269-274.
39. Pereira E, Queiroz A, Feitosa R. Comportamento reológico de mel da abelha urucu (*Melípona scutellaris*, L.). *Rev. ciênc. exatas nat*. 2003; 5(2): 179-186.
40. Telis J, Guizzo L, Telis V. Rheological Properties of Rehydrated Papaya. *Braz. J. Food Technol*. 2003; 6 (2): 221-227.
41. Ferreira G., Melo A., Silvestre R., Gasparetto C., Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. *J. Ciencias Exatas e Naturais*. 2002; 4 (2): 175-184.
42. Lopera S, Guzmán C, Cataño C, Gallardo C. Desarrollo y caracterización de micropartículas de ácido fólico formadas por secado por atomización, utilizando goma arábica y maltodextrina como materiales de pared. *J. Vitae*. 2009; 16(1): 55-65.
43. Luh BS, Tropical fruit beverage. *Fruit & vegetable juices processing technology*. 3ª ed. (Eds. p.e. nelson and d.k. tressler). Connecticut: AVI, 344 – 435, 1980.
44. Toneli J, Park KJ, Murr F, Negreiros A. Spray drying optimization to obtain inulin powder. In: *Proceedings of the 15th International Drying Symposium (IDS 2006)*. Budapest, Hungary.