

# Characterization and Rheological Classification of Powdered Products to Improve Productivity in the Packaging Process

Alvaro Vera Orezzaoli, Ing<sup>1</sup>, Meliza Lindsay Rojas, Dr.<sup>2\*</sup>, Leslie Lescano MSc.<sup>3</sup>, Jesús Sánchez-González, MSc.<sup>3</sup>, Guillermo Linares, Dr<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avo0802@gmail.com

<sup>2</sup>Dirección de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social, Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Peru, meliza.rojas@upn.edu.pe

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias Agroindustriales, Universidad Nacional de Trujillo, Peru, llescano@unitru.edu.pe, jsanchezg@unitru.edu.pe., glinares@unitru.edu.pe

\*Autor correspondiente

*Abstract– The objective of this work was to make an improvement proposal for the packaging process of powder products of a company that produces instant powders as supplements. by characterizing the rheological properties of 10 products, each with a different formulation depending on the target consumer. As results, it was obtained that the lowest angle of repose (AR) was obtained by the product coded as M8 ( $26.1 \pm 1.3^\circ$ ), while M4 presented the lowest flow velocity (VF) with  $22.3 \pm 0.8$  g/s. Apparent density (DA) and compacted density (CD) were also determined, finding that the densest product is M4 ( $0.69 \pm 0.00$  g/mL), while M5 showed less tendency to compaction, obtaining a Carr Index (CI) of  $6.06 \pm 1.31$  and Hausner Index (HI) of  $1.06 \pm 0.01$ , finding significant statistical differences in all tests. M6 showed the lowest flow values for all the tests ( $AR = 43.9 \pm 1.1^\circ$ ,  $VF = 0$  g/s,  $IC = 23.99 \pm 2.06$  and  $IH = 1.32 \pm 0.04$ ), so the proposal was based on the estimation of the improvement that could be caused by the use of magnesium stearate (EM) as an additive. The productivity of the current formula and the estimated productivity of M6 were then determined based on the production data provided by the company, and a productivity increase of 219% related to the estimation of the improvement of the flow through the use of the additive was obtained, bringing with it economic savings of up to 6.31 soles per hour per man.*

*Keywords– Food powders, flow properties, agglomeration, cohesion, productivity.*

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.773>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

# Caracterización y Clasificación Reológica de Productos en Polvo para la Mejora de la Productividad en el Proceso de Envasado

Alvaro Vera Orezza, Ing<sup>1</sup>, Meliza Lindsay Rojas, Dr.<sup>2\*</sup>, Leslie Lescano MSc.<sup>3</sup>, Jesús Sánchez-González, MSc.<sup>3</sup>, Guillermo Linares, Dr.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo, Perú, avo0802@gmail.com

<sup>2</sup>Dirección de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social, Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Peru, meliza.rojas@upn.edu.pe

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias Agroindustriales, Universidad Nacional de Trujillo, Peru, llescano@unitru.edu.pe, jsanchezg@unitru.edu.pe., glineares@unitru.edu.pe

\*Autor correspondiente

**Resumen** – El objetivo de este trabajo fue realizar una propuesta de mejora para el proceso de envasado de los productos en polvo de una empresa productora de polvos instantáneos como suplementos. mediante la caracterización de las propiedades reológicas de 10 productos cada uno con diferente formulación dependiendo del público objetivo. Como resultados, se obtuvo que el menor ángulo de reposo (AR) lo obtuvo el producto codificado como M8 ( $26.1 \pm 1.3^\circ$ ), mientras que M4 presentó la menor velocidad de flujo (VF) con  $22.3 \pm 0.8$  g/s. Se determinó además la densidad aparente (DA) y densidad compactada (DC), encontrándose que el producto más denso es M4 ( $0.69 \pm 0.00$  g/ml), mientras que M5 mostró menos tendencia a la compactación obteniendo un Índice de Carr (IC) de  $6.06 \pm 1.31$  e Índice de Hausner (IH) de  $1.06 \pm 0.01$ , encontrándose diferencias estadísticas significativas en todas las pruebas. M6 mostró los menores valores de flujo para todas las pruebas ( $AR = 43.9 \pm 1.1^\circ$ ,  $VF = 0$  g/s,  $IC = 23.99 \pm 2.06$  e  $IH = 1.32 \pm 0.04$ ), por lo que la propuesta se basó en la estimación de la mejora que podría provocar el uso de estearato de magnesio (EM) como aditivo. Se determinó entonces la productividad de la fórmula actual y la productividad estimada de M6 basándose en los datos de producción proporcionados por la empresa, y se obtuvo un incremento de productividad de 219% relacionada a la estimación de la mejora del flujo mediante el uso del aditivo, trayendo consigo un ahorro económico de hasta 6.31 soles por hora por hombre.

**Palabras clave** -- Polvos alimenticios, propiedades de flujo, aglomeración, cohesión, productividad.

## I. INTRODUCCIÓN

La medición de las propiedades físicas de productos en polvo permite conocer su comportamiento durante el almacenamiento, manipulación y procesamiento. Estudiar las características reológicas de las mezclas en polvo hace posible conocer con precisión el producto con el que se trabaja, facilitando la detección de posibles problemas, generalmente relacionados a sus propiedades globales [1], y que puedan aparecer durante su envasado, pues en esta etapa están en constante contacto entre partículas y estas a la vez con la maquinaria, siendo necesario conocer el comportamiento del movimiento relativo de la mezcla respecto a ellas [2]. El polvo, al ser envasado, se somete a diferentes fuerzas físicas como gravedad, fricción, atracción entre sus partículas y atracción

con las paredes del recipiente [3] y es afectado por las condiciones del ambiente de almacenamiento, esto provoca que no todos los productos reaccionen de la misma manera durante el envasado, variando su comportamiento en función del cambio de alguna de las variables mencionadas [4]. Es así como la caracterización de las mezclas en polvo adquiere gran importancia para las empresas dedicadas a la producción de fórmulas en polvo. La búsqueda de soluciones ante el problema de envasado se basará en la determinación de las propiedades reológicas de los polvos alimenticios mediante técnicas simples, de bajo costo, reproducibles, sin extensos procesos experimentales [5, 6]. Entre ellas, la propiedad más significativa, es la determinación del ángulo de reposo [3, 5, 7], ésta prueba permite obtener una idea de la relación entre la fricción y cohesión de las partículas de los polvos [8, 9] pues al momento de dejar caer la mezcla sobre la tolva de envasado, el polvo es sometido a estas fuerzas. Según Geldart, et al. [6] (2006) y Santomaso, et al. [10] el valor del ángulo de reposo, permite categorizar los polvos desde aquellos con un flujo excelente, hasta aquellos que poseen un flujo pobre, dependiendo de las necesidades de la industria, no existe un acuerdo general sobre la forma en que se deben realizar las pruebas para caracterizar polvos [11], por lo tanto, el estudio del ángulo de reposo y la interpretación de los resultados que se obtengan, pueden complementarse de manera simbiótica con el análisis de la velocidad de flujo vertical [3, 12], debido a que cuando el polvo es vertido en la tolva dosificadora, experimenta un flujo de caída hacia su centro, comportamiento que está relacionado con la fricción interna en la mezcla [13]. Para complementar la información de propiedades reológicas, se evalúan también algunas características físicas que permitan observar el comportamiento integral de las mezclas [1, 5]. El estudio de la densidad aparente permitirá relacionar la densidad de las partículas de la mezcla y su porosidad con la causa del problema, además de otorgar un nuevo nivel de clasificación a los productos, el cual se puede complementar con la determinación de la densidad compactada para demostrar cuantitativamente por qué unos productos se apelmazan con menor esfuerzo que otros al ser manipulados tanto en el

almacenamiento como durante la descarga en las tolvas [3, 14]. Adicionalmente, se pueden determinar el Índice de Compresibilidad y el índice de Hausner, que proporcionan información respecto de la fluidez de las mezclas [15, 16] y de los cambios de densidad que experimentan los productos al ser manipulados [17] desde las fases iniciales del proceso productivo, hasta el envasado, así como el efecto de estos cambios sobre su flujo [18].

Desde el punto de vista de la formulación, la presencia de componentes de la mezcla ricos en grasas, proteínas y carbohidratos requiere el uso de aditivos o agentes anti-aglomerantes o anti-apelmazantes [19] [20] y fluidizantes como el fosfato tricálcico [21], o el silicato de calcio como adyuvante [22], para la reducción del porcentaje de apelmazamiento. Así mismo [23] recomiendan el uso de sales esteáricas con efecto antiapelmazante.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar las propiedades reológicas y características físicas de los productos en polvo de una empresa dedicada a la venta de suplementos deportivos para identificar la formulación con problemas de flujo e implementar mejoras que lleven a un aumento de la productividad del proceso de envasado.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Muestras de Productos

Se analizaron 100 gramos de cada muestra, aplicando el análisis de caracterización a 10 productos: M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10. El contenido proximal de las muestras se observa en la Fig. 2.

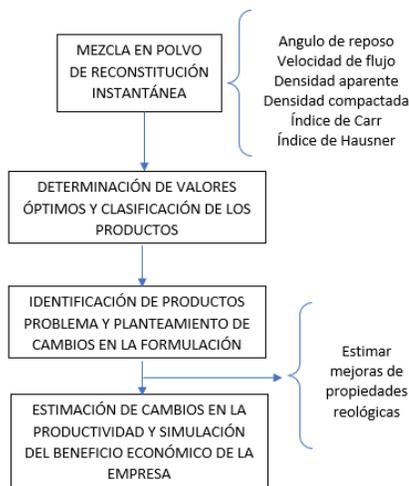


Fig. 1 Esquema experimental desarrollado.

### B. Esquema experimental

En la Fig.1 se presenta el esquema experimental desarrollado durante el estudio

### C. Métodos de Determinación de propiedades

1) *Determinación de Humedad:* Se determinó la humedad de cada muestra utilizando un determinador de humedad de la

marca OHAUS modelo MB 120, tomando las consideraciones establecidas en la Norma Mexicana NMX-F-428-1982

2) *Determinación del ángulo de reposo:* Se aplicó la metodología descrita por Chik and Vallejo [24] y Wong [5] tomando algunas consideraciones de Geldart, et al. [6] y Vendruscolo, et al. [12] y utilizando el cálculo que describe Shah, et al. [25], se realizó la prueba para determinar el ángulo de reposo y la velocidad de flujo para los productos en polvo, siguiendo el estándar ASTM [8].

3) *Determinación de la velocidad de Flujo:* Se llevó a cabo siguiendo la metodología empleada Vendruscolo, et al. [12] modificada.

4) *Determinación de densidad aparente:* En base a la metodología utilizada por Abadio, et al. [26], Li Li, et al. [17] y Wong [5] tomando algunas consideraciones de Tze, et al. [27], se realizó la prueba para determinar la densidad aparente y la densidad compactada para los productos en polvo, de acuerdo con el ISO 3923/1 y la USP30 – NF (2015).

5) *Determinación de la densidad compactada:* Se determinó mediante la metodología utilizada por Vendruscolo, et al. [12], Shah, et al. [25] y Li, et al. [17] con modificaciones, y tomando algunas consideraciones de Tze, et al. [27], Hou and Sun [28] y Mullarney, et al. [29], de acuerdo con la USP30 – NF (2015).

6) *Determinación del Índice de Carr:* Se aplicó la metodología propuesta por Quispe-Condori, et al. [18], Vendruscolo, et al. [12] y Mullarney, et al. [29]), desarrollada por Fuchs, et al. [30] y considerando los criterios de Tze, et al. [27], Shah, et al. [25] y Hou and Sun [28] se realizó la prueba para determinar el índice de Carr para los productos en polvo.

7) *Determinación del Índice de Hausner:* Se utilizó la metodología propuesta por Quispe-Condori, et al. [18], Vendruscolo, et al. [12] y Geldart, et al. [6], desarrollada por el Fuchs, et al. [30], y considerando los criterios de Tze, et al. [27], Shah, et al. [25] y Hausner [31] para determinar el índice de Hausner para los productos en polvo.

### F. Cálculo de la productividad

En la industria manufacturera, la productividad ( $Pr$ , (1)) puede definirse como la producción media por hora hombre donde producción ( $p$ ) se refiere a la cantidad de producto envasado en kilogramos y el factor recursos ( $R$ ) fue representado por el tiempo requerido de envasado por cada operador en máquinas de un caño.

$$Pr = \frac{p}{R} = \frac{\text{Cantidad envasada (kg)}}{\text{Tiempo de envasado} \times \text{hora hombre} \times \text{caño (h)}} \quad (1)$$

Por lo tanto, se calculó la productividad del producto, utilizando los datos: a) Tiempo de inicio de envasado, b) Tiempo de término de envasado y c) Cantidad envasada neta. Con estos datos, se estableció:

- Productividad Actual =  $P_1$ : Relativa al producto en polvo original y a sus características de flujo.
- Productividad Propuesta =  $P_2$ : Relativa a un producto con mejores características de flujo, con la propuesta

de adición de un aditivo que mejora las propiedades de flujo según diversas fuentes bibliográficas.

Luego se calculó el aumento de la productividad del producto (% $\Delta Pr$ ) por comparación de  $P_1$  y  $P_2$ , de acuerdo a:

$$\Delta Pr = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 = \frac{p/R_2 - p/R_1}{p/R_1} \times 100 \quad (2)$$

De donde:

$$\Delta Pr = \frac{R_1 - R_2}{R_2} \times 100 \quad (3)$$

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las evaluaciones se realizaron a 10 productos en polvo correspondientes a un mismo periodo de producción. La información sobre los compuestos más importantes (aquellos que definen las propiedades de flujo) de los productos analizados fue brindada por la empresa y se presenta en la Fig. 2.

Los resultados obtenidos de todas las pruebas reológicas se muestran en la TABLA I. A partir de la información presentada, se realizó el análisis de la data obtenida en cada prueba siguiendo la secuencia de la metodología establecida. Así

mismo, se muestra la codificación de los productos realizada con el propósito de facilitar su mención en el análisis de los resultados.

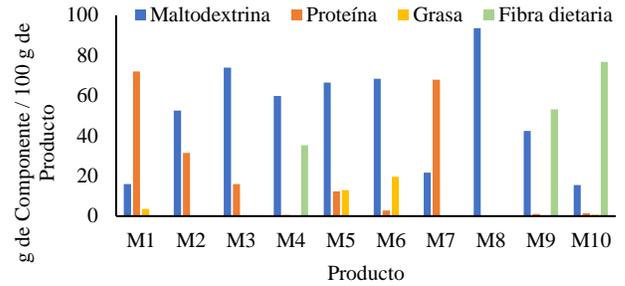


Fig. 2 Componentes principales de los productos evaluados (gramos por cada 100 gramos de producto).

#### A. Humedad

Según Kim, et al. [7], el contenido de la humedad en una mezcla de polvo tiene un impacto significativo en su fluidez debido al incremento de puentes líquidos y fuerzas capilares actuando especialmente sobre los componentes solubles en agua, siendo mayor el efecto del aumento del ángulo de reposo porque ocurre el ablandamiento o plastificación de las partículas del polvo.

TABLA I  
DATOS DE HUMEDAD, TEMPERATURA Y CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DE LOS PRODUCTOS EVALUADOS

Código	Humedad (%)			Temperatura (°C)			Ángulo de Reposo (°)			Velocidad de Flujo (g/s)			Densidad Aparente (g/ml)			Densidad Compactada (g/ml)			Índice de Carr			Índice de Hausner		
	Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var	Media ± S	Var		
M1	7.18 ± 0.00 <sup>h</sup>	0.00%		23.0 ± 0.4 <sup>ab</sup>	1.7%		31.3 ± 0.6 <sup>cd,e</sup>	1.76%		6.7 ± 0.6 <sup>b</sup>	9.0%		0.47 ± 0.08 <sup>b</sup>	16.89%		0.53 ± 0.09 <sup>a</sup>	16.83%		11.46 ± 1.96 <sup>b</sup>	17.10%		1.13 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.77%	
M2	2.84 ± 0.15 <sup>a</sup>	5.28%		24.2 ± 0.3 <sup>b</sup>	1.2%		29.3 ± 0.4 <sup>b</sup>	1.37%		14.6 ± 1.9 <sup>d</sup>	13.0%		0.65 ± 0.00 <sup>gh</sup>	0.00%		0.74 ± 0.01 <sup>d</sup>	1.36%		12.09 ± 1.02 <sup>b</sup>	8.44%		1.14 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.88%	
M3	3.21 ± 0.04 <sup>b</sup>	1.24%		24.2 ± 0.2 <sup>b</sup>	0.8%		30.9 ± 1.3 <sup>b,c,d</sup>	0.00%		19.2 ± 0.7 <sup>ef</sup>	3.6%		0.63 ± 0.00 <sup>fg</sup>	0.00%		0.72 ± 0.01 <sup>d</sup>	1.39%		12.30 ± 0.79 <sup>b,c</sup>	6.42%		1.14 ± 0.01 <sup>b,c</sup>	0.88%	
M4	2.72 ± 0.15 <sup>a</sup>	5.52%		23.4 ± 1.1 <sup>ab</sup>	4.7%		29.6 ± 0.7 <sup>b,c</sup>	2.46%		22.3 ± 0.8 <sup>ef</sup>	3.6%		0.69 ± 0.00 <sup>h</sup>	0.00%		0.75 ± 0.00 <sup>d</sup>	0.00%		8.35 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.36%		1.09 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.00%	
M5	3.87 ± 0.07 <sup>c</sup>	1.81%		22.8 ± 0.6 <sup>a</sup>	2.6%		29.9 ± 0.4 <sup>b,c</sup>	1.17%		20.9 ± 0.4 <sup>ef</sup>	1.9%		0.51 ± 0.00 <sup>b,c</sup>	0.00%		0.54 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.85%		6.06 ± 1.31 <sup>a</sup>	21.61%		1.06 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.94%	
M6	3.24 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.93%		23.9 ± 0.3 <sup>ab</sup>	1.3%		43.9 ± 1.1 <sup>f</sup>	2.50%		0.0 ± 0.0 <sup>a</sup>	0.0%		0.42 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.00%		0.55 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.82%		23.99 ± 2.06 <sup>e</sup>	8.59%		1.32 ± 0.04 <sup>a</sup>	3.04%	
M7	5.66 ± 0.08 <sup>f</sup>	1.41%		23.5 ± 1.4 <sup>ab</sup>	5.9%		32.8 ± 0.6 <sup>e</sup>	1.74%		0.0 ± 0.0 <sup>a</sup>	0.0%		0.42 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.00%		0.55 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.81%		23.81 ± 0.70 <sup>e</sup>	2.94%		1.31 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.76%	
M8	4.90 ± 0.19 <sup>e</sup>	3.88%		22.7 ± 0.9 <sup>a</sup>	4.0%		26.1 ± 1.3 <sup>a</sup>	4.86%		0.0 ± 0.0 <sup>a</sup>	0.0%		0.54 ± 0.00 <sup>cd</sup>	0.00%		0.64 ± 0.02 <sup>b</sup>	3.12%		15.42 ± 1.92 <sup>d</sup>	12.45%		1.18 ± 0.03 <sup>d</sup>	2.54%	
M9	4.50 ± 0.08 <sup>d</sup>	1.78%		22.7 ± 0.2 <sup>a</sup>	0.9%		29.4 ± 1.3 <sup>b</sup>	4.38%		12.4 ± 0.6 <sup>c</sup>	4.8%		0.60 ± 0.01 <sup>ef</sup>	1.65%		0.71 ± 0.01 <sup>c,d</sup>	1.41%		14.82 ± 1.49 <sup>c,d</sup>	10.05%		1.17 ± 0.02 <sup>c,d</sup>	1.70%	
M10	6.38 ± 0.22 <sup>e</sup>	3.45%		23.0 ± 1.0 <sup>ab</sup>	4.3%		31.5 ± 1.5 <sup>d,e</sup>	4.66%		19.0 ± 2.4 <sup>e</sup>	12.6%		0.58 ± 0.02 <sup>d,e</sup>	3.45%		0.67 ± 0.01 <sup>b,c</sup>	1.50%		12.94 ± 2.12 <sup>b,c,d</sup>	16.39%		1.15 ± 0.03 <sup>b,c</sup>	2.61%	

Los resultados muestran el promedio SD. Diferentes letras en la misma columna indican diferencias significativas entre las medias (p<0.05)

El producto M1 muestra el mayor valor de humedad (7.18%), sin embargo, presenta un flujo bueno según la calificación previamente establecida. Esta diferencia de humedad al realizar una comparación con el producto M7 (5.66%), podría deberse a que la proteína que compone este último es de origen animal, específicamente de calostro de bovino, mientras que M1 cuenta con 72% de proteína de vegetal (quinua, arroz integral, arvejas y algas). No se cuenta con información bibliográfica suficiente para relacionar la diferencia entre los valores de humedad con el tipo de proteína en cada producto, sin embargo, podría considerarse debido a que es la única diferencia sustancial entre ambas

composiciones, además puede apoyarse también sobre el hecho de que cuentan con valores de ángulo de reposo similares.

#### B. Ángulo de reposo

La determinación del ángulo se estableció como la evaluación de referencia para este estudio, tal y como lo sugieren Geldart, et al. [6] debido a su requerimiento industrial para revelar cambios en las propiedades del flujo de polvos y poder realizar una clasificación precisa. El análisis del ángulo de reposo brindó información sobre las características relativas al comportamiento reológico del polvo [7] y la fuerza de fricción entre las partículas que delimitan su capacidad de fluidez [8]. La clasificación de los productos en función de su

capacidad de flujo se realizará tomando en cuenta el criterio de clasificación unificado a partir de lo establecido por Shah, et al. [25] y Ileleji and Zhou [9](TABLA II).

TABLA II  
CRITERIO DE CLASIFICACIÓN DEL FLUJO SEGÚN EL VALOR DEL  
ÁNGULO DE REPOSO.

Flujo*	Ángulo de reposo
Excelente	26°-30°
Bueno	31°-35°
Regular	36°-39°
Poco (añadir adyudantes)	40°-42°
Pobre (someter a vibración)	Mayores a 42°

\*Criterios establecidos en base a lo reportado por Shah, et al. [25] y Ileleji and Zhou [9].

A partir del ANOVA, se encontró que dentro de la categoría que agrupa a los polvos con menor ángulo de reposo, se encuentran M2, M4, M5, M8 y M9, siendo M8 el producto que posee un ángulo notablemente menor que el resto. Estos valores sugieren propiedades de “flujo libre” o “excelente”, y esto se debe probablemente a que la base de los productos es la misma, entre un 65% y 70% p/p de maltodextrina aproximadamente, macronutriente que, según Caliskan and Dirim [32], es un vehículo adecuado de los micronutrientes dentro del producto final como vitaminas, minerales, y proteínas debido a que proporciona estabilidad a la mezcla evitando la adherencia interna y externa del polvo [23, 33], aportando al producto partículas de tamaño relativamente mayor [32, 34].

En el grupo intermedio se encuentran los productos M1, M3, M7 y M10, con valores de ángulo de reposo ligeramente por encima de 31°, de manera que se les puede atribuir un flujo categorizado como “bueno”. De estas mezclas, aquellas que contienen mayor proporción de proteína dentro de su composición, como es el caso de la muestra M7 compuesto por (67.9% p/p) de proteína, muestran propiedades de flujo inferiores en comparación con aquellas que no tienen este ingrediente. El producto M10 posee un flujo relativamente mejor debido a que contiene pequeñas concentraciones de proteína, en un medio donde predomina la maltodextrina y otros glúcidos en polvo. Por lo tanto, la presencia de tres veces más proteína que maltodextrina reduce un poco los beneficios en el flujo del polvo que aporta este último componente, resultando en una disminución de la fluidez y reflejándose en un mayor ángulo de reposo. La causa de esta reducción podría estar atribuida al hecho de que las proteínas tienen mayor capacidad de retención de agua, aumentando el contenido de humedad en los polvos a medida que aumenta su concentración en una mezcla [35].

Mientras que el comportamiento del ángulo de reposo en el producto M6 fue de 43.9° presentando poco flujo. Este comportamiento se podría atribuir a la presencia de grasa en polvo dentro de la composición de la mezcla. M6 a diferencia de los productos estudiados, es el único que contiene grasa, cuyo origen se encuentra en la leche de coco en polvo el cual es un producto seco rico en grasas [36]. Los resultados de Kim, et

al. [7] respaldan esta afirmación, al demostrar que la influencia de la grasa causa que las partículas se adhieran unas a otras o se aglomeran, deteriorando la fluidez de la mezcla. Estudiar el ángulo de reposo representa estudiar el equilibrio entre la energía cinética del polvo y las fuerzas estáticas entre las partículas del polvo que le permiten acumularse y formar apilamientos, lo que por consecuencia también permite obtener información relacionada con las características de las partículas de la mezcla [8].

Desde este enfoque, el flujo pobre del producto M6 podría explicarse tomando en cuenta que las altas fuerzas entre partículas causan que los polvos más finos dentro de la mezcla se aglomeran, reduciendo su superficie específica, esto a su vez reduce las fuerzas de arrastre que pueden llegar a actuar sobre el polvo [8] resultando en la pérdida de la capacidad de movilidad de la mezcla. Así lo demostraron Hou and Sun [28] cuando concluyeron en que las propiedades de flujo más pobres estaban relacionadas con tamaños de partícula más pequeños, aumentando el área total de superficie de contacto en la mezcla, incrementando el efecto de ciertas fuerzas interpartícula. En extensión a esto, según Tze, et al. [27], a poca fluidez puede estar relacionada con las fuerzas de Van der Waals, las fuerzas electrostáticas y de fricción, las cuales se incrementan con la formación de puentes interparticulares, pero estas fuerzas tendrán más influencia en la cohesión entre partículas, la cual se analizará más adelante. En este sentido, se puede considerar realizar una revisión de la formulación M6 para tomar en cuenta el uso de aditivos adecuados para menguar los efectos de las partículas de grasa. Es preciso saber que, dentro de toda la actividad productiva, esta mezcla ha presentado múltiples complicaciones al momento de ser manipulada por los operadores y envasada por las máquinas, por lo que un análisis de sus propiedades de flujo es importante para establecer el camino hacia una propuesta de mejora que conlleve a un incremento de la rentabilidad en la producción para la empresa.

### C. Determinación de la Velocidad de flujo

La obtención de los datos de velocidad de flujo se llevó a cabo paralelamente a la prueba de ángulo de reposo, tomando el tiempo que se requiere para que toda la muestra haya caído por el embudo, por lo que, el flujo de los productos ya está catalogado según los criterios establecidos en la TABLA II, por lo que el análisis se centrará en explicar las diferencias entre los valores obtenidos y las razones por las que algunas muestran no fluyeron durante la experimentación.

Entre los productos con valores elevados de velocidad de flujo: M3, M4, M5 y M10, siendo M4 el que descendió más rápido. Por lo que, según lo mostrado en la TABLA I, si una muestra alcanza una velocidad de 19 g/s durante la prueba, se puede afirmar que tiene valores de velocidad de flujo relativamente elevados, los cuales coinciden con los valores de ángulo de reposo y su clasificación anteriormente señalada. Las velocidades de flujo de las muestras M3, M4 y M5 podrían estar relacionadas a la presencia de maltodextrina en mayor

proporción, y a la presencia de fibra dietaria en mayor proporción en la muestra M10.

En el segundo grupo se distinguen los productos M2, M9 y M1 los cuales presentan menores valores de velocidad de flujo. Que dichas velocidades sean ligeramente menores –sin dejar de fluir- probablemente se deba a la influencia de las proporciones de proteína, maltodextrina y fibra dietaria. Pero incluso con dichos valores, de entre 10 y 18 g/s, dichas muestras consiguen estar dentro de la clasificación de polvos con un flujo libre.

Con respecto a las muestras M6, M7 y M8, se pudo observar que no cayeron al momento de realizar las pruebas. Este es un comportamiento de flujo que ocurre ocasionalmente en la medición de las propiedades de flujo para algunas mezclas, tal y como sucedió en algunas de las evaluaciones de Kim, et al. [7]. En estas situaciones, la cohesión entre partículas de la mezcla es un factor determinante, promoviendo la compactación y consecuentemente el estancamiento del polvo al momento de fluir, lo que Portillo, et al. [37] reconoció como un comportamiento no ideal del polvo. Debido a que las partículas no fluyeron libremente a través del embudo, se requirió de agitación mecánica para permitir un flujo uniforme de polvo y conseguir la misma tasa de descarga de material utilizada en todas las repeticiones realizadas, proveyendo al experimento de una buena repetitividad, todo esto realizado en base a lo recomendado por Iileji and Zhou [9]. La ausencia de flujo de la muestra M7 durante la experimentación podría deberse a elevada concentración de proteína de origen animal en relación con los demás componentes. Mientras que, es probable que la muestra M8 haya experimentado una compactación excesiva debido a que está compuesto casi completamente por maltodextrina y otros carbohidratos similares. Tal y como lo indican Shishir, et al. [34], un incremento excesivo en la concentración de maltodextrina contribuirá con el aumento de la cohesión, lo cual se cuantificó mediante la relación de Hausner y el Índice de Carr. El producto fluye libremente, pero entra y sale en un estado de compactación con relativa facilidad. A pesar de ello, este producto no es fuente de problemas como sí lo es la muestra M6. Con respecto a esta mezcla, la razón por la que no cayó durante el experimento puede estar relacionada nuevamente a su composición [8], más específicamente, a la elevada proporción de grasa que compone este producto y en consecuencia a su estancamiento en el embudo. Este comportamiento en laboratorio supone la existencia de problemas mayores que se experimentan durante el envasado de este producto, todos relacionados con su facilidad para aglomerarse.

#### D. Densidad aparente

Al realizar una comparación entre los datos de densidad aparente y ángulo de reposo presentados en la TABLA I, podemos observar que aquellos productos que presentan menor ángulo de reposo poseen valores mayores de densidad aparente, como se aprecia en las muestras M8, M2, M9 y M4. Esto concuerda con los manifestado por Hou and Sun [28] cuando

afirmaron que una mayor densidad aparente corresponde a un mejor comportamiento de flujo y así mismo refleja una organización más compacta con partículas más regulares entre sí [30].

Además, se encontró que los productos menor humedad (M2, M4 y M6) son aquellos que muestran valores más elevados de densidad aparente, esta relación de tipo inversa coincide con lo reportado por Caliskan and Dirim [32] siendo que a menor humedad de los polvos, la densidad tiende a aumentar. Aquella relación inversa también se observa en las muestras M3, M5, M7 y M9. Jinapong, et al. [38] con respecto a muestras con un valor cercano de densidad aparente, aseveran que puede deberse a que existe una resistencia similar cuando la mezcla está bajo el efecto de la gravedad. La mezcla M7 comparte el mismo valor de densidad aparente que M6, sin embargo, M7 no genera problemas al momento de ser envasado, por lo que una vez más se puede descartar que dichos problemas dependan de parámetros físicos como su densidad, y acerca la búsqueda de la solución hacia el análisis del efecto de su composición en sus propiedades de flujo.

#### E. Densidad compactada

La densidad compactada no guarda necesariamente una relación proporcional con los valores obtenidos en la prueba de ángulo de reposo. Se analizó el diferencial de volumen como la comparación de la densidad aparente con la densidad compactada de las mezclas (Fig.3), ya que estudiar estas relaciones ayuda a predecir la capacidad de flujo de los materiales granulares y polvos [10].

La densidad compactada se determina para establecer la rapidez o facilidad con la que un polvo se compacta y reduce su volumen luego de haber sido sometido a cierto estrés, además de cuantificar dicha reducción. Esta prueba es importante para este estudio porque permite comprender más a fondo el estado de cohesión y la propensión al apelmazamiento de una mezcla en polvo. Según Fig.3, se puede afirmar que los productos que experimentan menor diferencial de volumen luego del análisis son M1 y M5, productos que, de hecho, están catalogados con un buen flujo. Las diferencias de volumen menores reflejan cierta dificultad en el producto para apelmazarse y compactarse, lo cual guarda coherencia con los resultados en las pruebas anteriores que evidencian que cuenta con buenas propiedades de flujo.

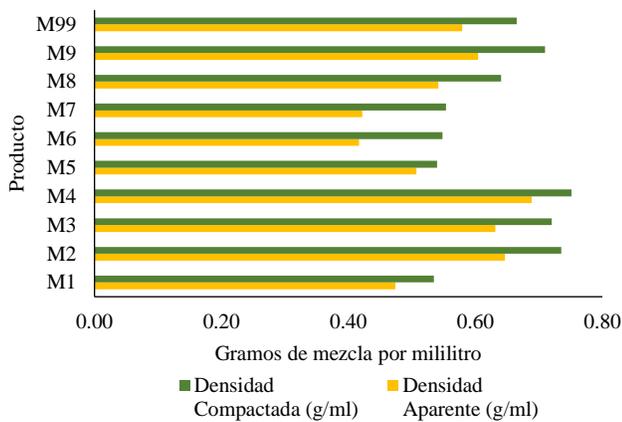


Fig. 3 Comparación entre Densidad Aparente y Densidad Compactada.

Los productos M8 y M10 muestran valores de densidad compactada entre 60 g/mL y 70 g/mL, lo cual sugiere que no se compactan con facilidad. Productos como M2, M3, M4 y M9 experimentan un aumento de densidad ligeramente mayor que el de las muestras previamente mencionadas, y nuevamente estos productos poseen valores de ángulo de reposo que representan buenas características de fluidez, por lo que los valores de densidad compactada guardan relación y aportan validez a las pruebas realizadas. Además, al poseer una densidad mayor a 70 g/mL se les relaciona con buenas propiedades de flujo.

Finalmente, se observa claramente que los productos M6 y M7 aumentaron drásticamente su densidad. Si los polvos se comprimen con relativa facilidad al golpearlos, es señal de que aumenta su requerimiento de energía de flujo [25], lo cual lo convierte en un flujo pobre, tal y como se determinó en la primera prueba.

#### F. Determinación del Índice de Carr e Índice de Hausner

Jakubczyka, et al. [33] afirman que el estudio de estos dos parámetros permite evaluar la fluidez y la cohesión de los polvos con fiabilidad. Por lo tanto, en este apartado de la investigación se analizarán los resultados desde el punto de vista de ambos índices. Al igual que con el ángulo de reposo, para estudiar la compresibilidad y la cohesión de una mezcla de polvos desde la perspectiva del Índice de Carr (IC) e Índice de Hausner (IH), es necesario establecer criterios de clasificación basados en reportes de otras investigaciones en la literatura con el objetivo de categorizar a los productos. En este sentido, se estableció el criterio de clasificación para estas pruebas en la TABLA III.

Los productos M4 y M5, de acuerdo a los valores de Índice Carr y Hausner que presentan (TABLA I) pueden ser categorizados como productos con un flujo excelente. Quispe-Condori, et al. [18] resaltó que un menor valor de IC e IH significa que el polvo es menos cohesivo, más capaz de fluir libremente y viceversa. Mientras que los productos M1, M2, M3, M8, M9 y M10 presentaron valores de IC e IH correspondientes a un flujo bueno a regular.

TABLA III  
CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DEL FLUJO SEGÚN LOS VALORES DE ÍNDICE DE CARR E ÍNDICE DE HAUSNER.

Índice de Carr	Flujo*	Índice de Hausner
5 – 9	Excelente	1.00 – 1.11
10 -14	Bueno	1.12 – 1.18
15 – 19	Regular	1.19 – 1.26
20 – 24	Poco (añadir adyudantes)	1.27 – 1.34
> 25	Pobre (someter a vibración)	1.35 – 1.46

\*Criterios establecidos en base a lo reportado por Hausner [31], Shah, et al. [25] y Bhusari, et al. [35].

Finalmente, se encuentran las muestras M6 y M7. Donde, M7 no fluye debido a su elevado contenido de proteína, propiciando la captación de humedad y reforzando las fuerzas de Van der Waals [27]. Con respecto a M6, sus elevados valores de IC e IH guardan relación con los valores obtenidos de ángulo de reposo, velocidad de flujo (sin caída), densidad aparente y compactada. Estas propiedades típicas de un flujo muy pobre podrían tener su principal causa en la presencia de grasa en su composición.

Luego de haber realizado el análisis de los resultados, es posible realizar una clasificación general de los productos evaluados, tomando como referencia los criterios de evaluación consultados y las pruebas de flujo más relevantes, se elaboró la TABLA IV.

TABLA IV  
CLASIFICACIÓN FINAL DE LOS PRODUCTOS EN FUNCIÓN DE SUS PROPIEDADES REOLÓGICAS

Ángulo de reposo	Índice de Carr	Índice de Hausner	Producto
Excelente	Excelente	Excelente	M5
			M4
			M2
			M9
Bueno	Bueno	Bueno	M1
			M3
			M10
Bueno	Regular	Bueno	M8
	Poco	Poco	M7
Pobre	Poco	Poco	M6

Mediante esta síntesis de los datos obtenidos y de los análisis realizados, se ha conseguido demostrar que el producto M6 posee propiedades reológicas características de un fluido pobre, condición que ha sido causa de numerosos problemas durante el envasado de este producto, y que además como se ha podido tratar líneas arriba, está estrechamente relacionado con la presencia de grasa dentro de su composición en forma de leche de coco en polvo. Ante esta realidad y con el objetivo de mejorar la fluidez de este producto, se utilizó dióxido de silicio como aditivo, el cual si bien es efectivo para reducir la humedad

de una mezcla (Gallo et al., 2011), al utilizarlo en el producto M6 no se observaron mejoras sustanciales (TABLA V).

El envasado de este producto continuaba generando problemas pues toda mejora en el flujo iba a estar limitada por la eliminación de la humedad del producto, y como se puede observar en la TABLA I, M6 presenta un porcentaje de humedad de apenas 3.24%, por lo tanto las mejora en el flujo no fue sostenible y no supuso una solución adecuada y rentable

para la empresa debido a que se utilizaba una cantidad elevada de este aditivo (hasta 5%) y al secar demasiado la mezcla, se incrementaba la cohesividad tal y como se observa en los valores muy elevados de Índice de Carr y Índice de Hausner en la TABLA V, lo cual aumentaba el trabajo adicional que se requería para manipular el producto y depositarlo en las máquinas envasadoras.

TABLA V  
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FLUJO ENTRE LA MEZCLA ORIGINAL DE M6 SIN Y CON DIÓXIDO DE SILICIO (5%) (M11).

Código	Ángulo de Reposo (°)			Velocidad de Flujo (g/s)			Densidad Aparente (g/ml)			Densidad Compactada (g/ml)			Índice de Carr		Índice de Hausner	
	Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var		Media ± S	Var	Media ± S	Var
M6	43.9 ± 1.1	2.5%	0 ± 0	0	0	0.42 ± 0.00	0.61%	0.55 ± 0.01	2.26%	23.99 ± 2.06	8.59%	1.32 ± 0.04	2.67%			
M11	30.9 ± 0.6	1.9%	0 ± 0	0	0	0.41 ± 0.01	1.82%	0.59 ± 0.01	2.15%	30.89 ± 0.27	0.88%	1.45 ± 0.01	0.40%			

Frente a esta realidad, y como objetivo principal de la investigación, en base a lo que se ha podido comprender sobre la composición del producto M6, se propone el uso de un aditivo que tenga efecto sobre el contenido de grasa, es decir, que en lugar de captar humedad, atrape las partículas de grasa presentes en la mezcla para así alcanzar una mejora sustancial en el flujo.

#### G. Uso de aditivos para la mejora de flujo

Con respecto al empleo de aditivos en mezclas de polvo, Faqih, et al. [39] manifestaron que el estearato de magnesio es de gran utilidad en la mejora del flujo y la reducción de la cohesividad de los materiales granulares y polvos. Morin and Briens [40] encontraron que el estearato de magnesio contribuye con una reducción en el ángulo de hasta un 15.6%, mientras que el estearato de calcio permite hasta un 21.9% de reducción en el mismo parámetro, además de ser de toxicidad baja, sin embargo, presenta poca solubilidad en agua [41] por lo que probablemente no sea la mejor opción si se busca elaborar un producto de reconstitución instantánea en agua y no se desea reducir su calidad. Faqih, et al. [39] reportaron que el estearato de magnesio es capaz de incrementar la densidad aparente hasta en un 13% cuando es utilizado como adyuvante en formulaciones de polvo, lo cual es beneficioso para reducir la cohesividad final de la mezcla. La documentación revisada respecto a este aditivo conduce hacia su selección como mejor alternativa frente a la elaboración de la propuesta de solución de los problemas de flujo del producto M6. Obteniendo que para una versión M12 (con dióxido de silicio + estearato de magnesio), se alcanzarían valores de ángulo de reposo de 26.1° y densidad aparente de 0.46 g/mL, lo cual significa una reducción de la cohesividad en la mezcla, permitiendo una mejora en la capacidad de flujo de este producto.

#### H. Determinación de la productividad

De acuerdo con el efecto en las propiedades de flujo del producto M6 al utilizar aditivos antiapelmazantes y obtener los productos M11 (caracterizado en la TABLA V) y el producto

M12 (con características teóricas de ángulo de reposo y densidad aparente similares al producto M3, mostradas en la TABLA I), se determinó la productividad obtenida en el envasado. Considerando que se envasan en máquinas de las mismas características con un operador a cargo para cada una, se midieron los datos relativos a la producción de M11 y M3 los cuales se recopilaron en la TABLA VI

TABLA VI  
DATOS DE PRODUCCIÓN DE M11 Y M12 ≅ M3

Código	Tiempo (h)	Granel entrante (kg)	Barrido/merma (kg)	Producción total (kg)
M11	6	80	0.25	79.75
M3	2	84.94	0.14	84.8

Se observan notables diferencias entre los datos de producción entre ambos productos. El tiempo que lleva envasar 80 kilogramos de M11 es el triple del tiempo que requiere el envasado de M3, debido principalmente a constantes paros de máquina para su limpieza y desatascamiento de la carga en las tolvas. La productividad de envasado de los productos M11 y M3 fue de 13.3 y 42.4 kg/h-h máquina, respectivamente. Finalmente, el incremento de la productividad estimada de la mezcla M12, tomando como referencia la productividad de M3, correspondería a un 219%.

Este incremento se puede convertir en cantidades económicas y traducirse en un ahorro para la empresa. Gracias a las mejoras estimadas en el flujo del producto, el envasado de 80 kg de producto tomaría 2.4 horas en lugar de 6, pudiéndose destinar 3.6 horas de trabajo al envasado de otro producto en la línea (lo cual representan cantidades de más de 60 kilogramos de producto). Además, el equivalente económico del ahorro de tiempo es de aproximadamente 22.72 soles por hora de trabajo por cada operario.

## IV. CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización de 10 productos de una empresa dedicada a producir productos en polvo para ser consumidos como suplemento. El menor ángulo de reposo (AR)

se reportó en el producto M8 ( $26.1 \pm 1.3^\circ$ ), mientras que M4 presentó la menor velocidad de flujo (VF) con  $22.3 \pm 0.8$  g/s, además de ser la mezcla más densa con  $0.69 \pm 0.00$  g/mL. M5 mostró menos tendencia a la compactación y un Índice de Carr (IC) de  $6.06 \pm 1.31$  e Índice de Hausner (IH) de  $1.06 \pm 0.01$ . M6 mostró los menores valores de flujo para todas las pruebas ( $AR = 43.9 \pm 1.1^\circ$ ,  $VF = 0$  g/s,  $IC = 23.99 \pm 2.06$  e  $IH = 1.32 \pm 0.04$ ). Cada producto es una mezcla con componentes muy particulares, debido a ello la interacción interpartículas y cohesividad varía entre un producto y otro, razón por la cual algunos respondieron mejor a algunas pruebas. Se clasificaron los productos una vez han sido caracterizados, lo que permitió identificar la mezcla con el mejor y peor flujo, coincidiendo este último con el producto problema, M6, que motivó a esta investigación. Se determinó que la causa del flujo pobre se encuentra en la presencia de grasa en la composición, por lo que se propuso el uso del estearato de magnesio, el cual es un aditivo con comprobadas propiedades de mejoramiento del flujo. De la mano con esta elección, se estimó el incremento en la productividad relativo al uso del aditivo mencionado, haciendo que esta propuesta conduzca a una posible mejora en el proceso y aumento de rentabilidad a la empresa. Es importante mencionar que los resultados de cualquier prueba de caracterización deben considerarse como específicos dependiendo de la aplicación del producto evaluado. En este trabajo, se establecieron valores de referencia que se relacionan con un buen flujo y que pueden contribuir con el rendimiento del proceso; sin embargo, estos límites no deben transferirse a directamente a otros procesos sin investigación adicional, pero sí pueden ser tomados como referencia, puesto que las tolerancias para un flujo pobre o aglomeración varían entre los diferentes procesos y, por lo tanto, también se deben evaluar nuevos umbrales constantemente. De manera general, las mejoras que presenta esta propuesta se resumen en que el costo de producción de del producto M6 se vería reducido, se obtendría mayor margen económico por cada lote, se perdería menos producto al reducirse las mermas, al emplear menos cantidad de un aditivo que se utiliza para la composición de otros y finalmente evitar retirar del mercado a un producto que goza de una importante demanda entre los consumidores de la empresa. La posibilidad de estimar el mejoramiento del flujo de un producto resalta la importancia que tiene la investigación en la mejora continua de la actividad productiva de toda empresa.

#### REFERENCES

[1] E. Ortega-Rivas, P. Juliano, and H. Yan, "Food powders: physical properties, processing, and functionality," 2006.

[2] M. Peleg, "Flowability of food powders and methods for its evaluation—a review," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 1, pp. 303-328, 1977.

[3] J. d. D. Alvarado and J. M. Aguilera, *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos*, 2001.

[4] G. Barbosa-Canovas, J. Malave-Lopez, and M. Peleg, "Segregation in food powders," *Biotechnology Progress*, vol. 1, pp. 140-146, 1985.

[5] A. C.-Y. Wong, "Use of angle of repose and bulk densities for powder characterization and the prediction of minimum fluidization

and minimum bubbling velocities," *Chemical engineering science*, vol. 57, pp. 2635-2640, 2002.

[6] D. Geldart, E. Abdullah, A. Hassanpour, L. Nwoke, and I. Wouters, "Characterization of powder flowability using measurement of angle of repose," *China Particuology*, vol. 4, pp. 104-107, 2006.

[7] E. H.-J. Kim, X. D. Chen, and D. Pearce, "Effect of surface composition on the flowability of industrial spray-dried dairy powders," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 46, pp. 182-187, 2005.

[8] M. Krantz, H. Zhang, and J. Zhu, "Characterization of powder flow: Static and dynamic testing," *Powder Technology*, vol. 194, pp. 239-245, 2009.

[9] K. Iileji and B. Zhou, "The angle of repose of bulk corn stover particles," *Powder Technology*, vol. 187, pp. 110-118, 2008.

[10] A. Santomaso, P. Lazzaro, and P. Canu, "Powder flowability and density ratios: the impact of granules packing," *Chemical Engineering Science*, vol. 58, pp. 2857-2874, 2003.

[11] D. Geldart, "Assessing the flowability of powders using angle of repose," *Powder Handling & Processing*, vol. 2, pp. 341-345, 1990.

[12] C. W. Vendruscolo, C. Ferrero, E. A. Pineda, J. L. Silveira, R. A. Freitas, M. R. Jiménez-Castellanos, *et al.*, "Physicochemical and mechanical characterization of galactomannan from Mimosa scabrella: Effect of drying method," *Carbohydrate Polymers*, vol. 76, pp. 86-93, 2009.

[13] J. J. Fitzpatrick, "Food powder flowability," in *Encapsulated and powdered foods*, ed: CRC Press, 2005, pp. 259-272.

[14] M. Adams, M. Mullier, and J. Seville, "Agglomerate strength measurement using a uniaxial confined compression test," *Powder Technology*, vol. 78, pp. 5-13, 1994.

[15] M. B. Nuñez, M. I. Aguado, A. Bela, H. N. Dudik, P. Sansberro, and J. Raisman, "Caracterización de polvos obtenidos a partir de extractos de Aloysia polystachya (Griseb.) destinados a compresión directa," 2003.

[16] H. Schubert, "Tensile strength of agglomerates," *Powder Technology*, vol. 11, pp. 107-119, 1975.

[17] Q. Li, V. Rudolph, B. Weigl, and A. Earl, "Interparticle van der Waals force in powder flowability and compactibility," *International journal of pharmaceuticals*, vol. 280, pp. 77-93, 2004.

[18] S. Quispe-Condori, M. D. Saldaña, and F. Temelli, "Microencapsulation of flax oil with zein using spray and freeze drying," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 44, pp. 1880-1887, 2011.

[19] A. A. Mansur and O. L. do Nascimento, "Caracterización de los copolímeros poli (etileno-co-acetato de vinilo) y evaluación de sus efectos en las propiedades modificadas de los morteros," 2008.

[20] K. D. Foster, J. E. Bronlund, and A. T. Paterson, "The contribution of milk fat towards the caking of dairy powders," *International Dairy Journal*, vol. 15, pp. 85-91, 2005.

[21] J. K. Sahu, "The effect of additives on vacuum dried honey powder properties," *International Journal of Food Engineering*, vol. 4, 2008.

[22] J. H. Moy, "Vacuum-puff freeze drying of tropical fruit juices," *Journal of Food Science*, vol. 36, pp. 906-910, 1971.

[23] S. Jaya and H. Das, "Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties," *Journal of Food Engineering*, vol. 63, pp. 125-134, 2004.

[24] Z. Chik and L. E. Vallejo, "Characterization of the angle of repose of binary granular materials," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 42, pp. 683-692, 2005.

[25] R. B. Shah, M. A. Tawakkul, and M. A. Khan, "Comparative evaluation of flow for pharmaceutical powders and granules," *Aaps Pharmscitech*, vol. 9, pp. 250-258, 2008.

[26] F. Abadio, A. Domingues, S. Borges, and V. Oliveira, "Physical properties of powdered pineapple (Ananas comosus) juice—effect of malt dextrin concentration and atomization speed," *Journal of Food Engineering*, vol. 64, pp. 285-287, 2004.

[27] N. L. Tze, C. P. Han, Y. A. Yusof, C. N. Ling, R. A. Talib, F. S. Taip, *et al.*, "Physicochemical and nutritional properties of spray-

- dried pitaya fruit powder as natural colorant," *Food Science and Biotechnology*, vol. 21, pp. 675-682, 2012.
- [28] H. Hou and C. C. Sun, "Quantifying effects of particulate properties on powder flow properties using a ring shear tester," *Journal of pharmaceutical sciences*, vol. 97, pp. 4030-4039, 2008.
- [29] M. P. Mullarney, B. C. Hancock, G. T. Carlson, D. D. Ladipo, and B. A. Langdon, "The powder flow and compact mechanical properties of sucrose and three high-intensity sweeteners used in chewable tablets," *International journal of pharmaceuticals*, vol. 257, pp. 227-236, 2003.
- [30] M. Fuchs, C. Turchiuli, M. Bohin, M.-E. Cuvelier, C. Ordonnaud, M. Peyrat-Maillard, *et al.*, "Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration," *Journal of Food Engineering*, vol. 75, pp. 27-35, 2006.
- [31] H. H. Hausner, "Friction conditions in a mass of metal powder," Polytechnic Inst. of Brooklyn. Univ. of California, Los Angeles 1967.
- [32] G. Caliskan and S. N. Dirim, "The effect of different drying processes and the amounts of maltodextrin addition on the powder properties of sumac extract powders," *Powder Technology*, vol. 287, pp. 308-314, 2016.
- [33] E. Jakubczyka, E. Gondeka, K. Tamborb, E. Jakubczyk, E. Gondek, and K. Tambor, "Characteristics of selected functional properties of apple powders obtained by the foam-mat drying method," in *ICEF 11 International Congress on Engineering and Food*, 2011.
- [34] M. Shishir, F. Taip, N. Aziz, and R. Talib, "Physical properties of spray-dried pink guava (*Psidium guajava*) powder," *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 2, pp. 74-81, 2014.
- [35] S. Bhusari, K. Muzaffar, and P. Kumar, "Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder," *Powder technology*, vol. 266, pp. 354-364, 2014.
- [36] S. Jena and H. Das, "Shelf life prediction of aluminum foil laminated polyethylene packed vacuum dried coconut milk powder," *Journal of Food Engineering*, vol. 108, pp. 135-142, 2012.
- [37] P. M. Portillo, A. U. Vanarase, A. Ingram, J. K. Seville, M. G. Ierapetritou, and F. J. Muzzio, "Investigation of the effect of impeller rotation rate, powder flow rate, and cohesion on powder flow behavior in a continuous blender using PEPT," *Chemical Engineering Science*, vol. 65, pp. 5658-5668, 2010.
- [38] N. Jinapong, M. Suphantharika, and P. Jammong, "Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration," *Journal of food engineering*, vol. 84, pp. 194-205, 2008.
- [39] A. M. N. Faqih, A. Mehrotra, S. V. Hammond, and F. J. Muzzio, "Effect of moisture and magnesium stearate concentration on flow properties of cohesive granular materials," *International journal of pharmaceuticals*, vol. 336, pp. 338-345, 2007.
- [40] G. Morin and L. Briens, "The effect of lubricants on powder flowability for pharmaceutical application," *Aaps Pharmscitech*, vol. 14, pp. 1158-1168, 2013.
- [41] A. Nora and G. Koenen, "Metallic soaps," *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 2000.
- [42] A. Mehrotra, M. Llusa, A. Faqih, M. Levin, and F. J. Muzzio, "Influence of shear intensity and total shear on properties of blends and tablets of lactose and cellulose lubricated with magnesium stearate," *International journal of pharmaceuticals*, vol. 336, pp. 284-291, 2007.