



**Universidad Austral de Chile**

Facultad de Ciencias Agrarias  
Escuela de Ingeniería en Alimentos

**Estudio del rendimiento y calidad de un producto  
de sémola de trigo (*Triticum durum*) en función  
del procedimiento de aglomeración y su  
estructura.**

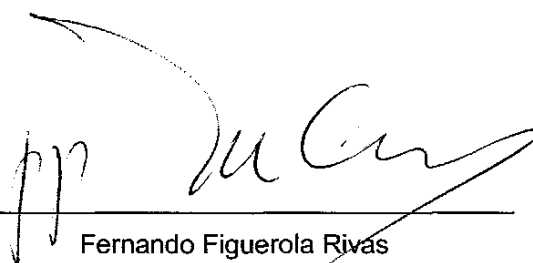
Memoria presentada como parte de los  
requisitos para optar al título de  
Ingeniero en Alimentos

**Macarena Soledad Silva Castro**

Valdivia – Chile

2014

PROFESOR PATROCINANTE:



---

Fernando Figuerola Rivas  
Ingeniero Agrónomo, M.Sc  
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos  
Universidad Austral de Chile

PROFESOR COPATROCINANTE:



---

Bernard Guq  
Catedrático de Universidad (Profesor)  
Institute National de Recherche Agronomique  
Université Montpellier Supagro

PROFESOR INFORMANTE:



---

Marcia Costa Lobo  
Ingeniero Civil Bioquímico  
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos  
Universidad Austral de Chile

**INDICE DE MATERIAS**

<b>Capítulo</b>		<b>Página</b>
	RESUMEN	1
	SUMMARY	2
1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Aglomeración	3
1.1.1	Aglomeración húmeda	3
1.1.1.1	Descripción de las fases de aglomeración	4
1.1.1.2	Optimización de la aglomeración	5
1.1.2	Procesos de aglomeración por vía húmeda	6
1.1.2.1	Aglomeración en lecho fluidizado	6
1.1.2.2	Aglomeración en mezclador	7
1.2	Sémola	7
1.2.1	Propiedades físico-químicas	8
1.2.2	Tecnologías de aglomeración en sémola: Cuscús	8
1.2.3	Aglomeración de sémola en mezclador de bajo cizallamiento	9
1.2.4	Caracterización reológica de los aglomerados	10
1.2.5	Consumo energético de la aglomeración de sémola en mezclador de bajo cizallamiento	10
1.3	Hipótesis y objetivos de investigación	11
2	MATERIAL Y MÉTODO	13
2.1	Materiales	13
2.1.1	Materia prima	13
2.1.2	Instrumentos y utensilios	13

2.2	Metodología	13
2.2.1	Aglomeración	14
2.2.1.1	Hidratación de bajo flujo de agua	14
2.2.1.2	Adición de sólidos con alto flujo de agua	15
2.2.2	Distribución granulométrica	17
2.2.3	Contenido de agua	17
2.2.4	Densidad aparente	17
2.2.5	Test de cizallamiento	17
2.2.6	Observaciones en SEM	19
2.2.7	Análisis Estadístico	19
3	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	20
3.1	Distribuciones granulométricas	20
3.2	Contenido de agua	24
3.3	Densidad aparente	26
3.4	Volumen de la fracción sólida	28
3.5	Test de cizallamiento	30
3.6	Requerimientos energéticos	32
3.7	Observaciones en SEM y aglomerados secos	33
3.8	Análisis estadístico	37
4	CONCLUSIONES	38
5	BIBLIOGRAFÍA	39

**INDICE DE CUADROS**

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
1	Diseño experimental de trabajo	19
2	Distribución proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación	20
3	Distribución proceso de aglomeración por adición de sólidos	21
4	Distribución acumulada proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación	22
5	Distribución acumulada proceso de aglomeración por adición de sólidos	23
6	Contenido de agua proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación	24
7	Contenido de agua proceso de aglomeración por GDS	25
8	Densidad proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación	26
9	Densidad proceso de aglomeración por adición de sólidos	27
10	Volumen de la fracción sólida para aglomerados de hidratación de bajo flujo	28
11	Volumen de la fracción sólida para aglomerados por adición de sólidos	29
12	Valores de coeficientes de fricción y cohesión para PDH y GDS	31
13	Requerimientos energéticos para procedimiento y tratamiento	33

**INDICE DE FIGURAS**

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Procesos de aglomeración:(a) Descripción tradicional, (b) Enfoque moderno	5
2	Diagrama de régimen de nucleación	6
3	Tipos de lechos fluidizados granulares	6
4	Tipos de mezcladores: (a) Alto cizallamiento, (b) Bajo cizallamiento	7
5	Línea de flujo para la elaboración de cuscús	9
6	Evolución de las frecuencias másicas de asociaciones de partículas en función del contenido de ligante mediano del lecho.	10
7	Curva típica para el consumo energético de un mezclador	11
8	Esquema de procedimientos de aglomeración	14
9	Esquema de aglomeración, procedimiento de hidratación.	15
10	Esquema de aglomeración, procedimiento de adición de sémola	16
11	Esquema trabajo de aglomeración	16
12	Esquema del pistón para test de cizallamiento	18
13	Reómetro FT <sub>4</sub> , implementos, acondicionamiento y test de cizallamiento	18
14	Distribución granulométrica en porcentaje para aglomerados por P.D.H	21
15	Distribución granulométrica en porcentaje para aglomerados por G.D.S	22
16	Distribución granulométrica en porcentaje para las poblaciones por PDH	23
17	Distribución granulométrica en porcentaje para las poblaciones por GDS	24
18	Contenido de agua procedimiento PDH	25

19	Contenido de agua procedimiento GDS	26
20	Densidad aparente aglomerados procedimiento PDH	27
21	Densidad aparente aglomerados procedimiento GDS	28
22	Volumen de la Fracción sólida en función del contenido de agua para PDH	29
23	Volumen de la Fracción sólida en función del contenido de agua para GDS	29
24	Cizallamiento en función de la fuerza normal para proceso PDH	30
25	Cizallamiento en función de la fuerza normal para proceso GDS	30
26	Coeficiente de fricción en función del contenido de agua	31
27	Cohesión en función del contenido de agua	32
28	Fotografía comparativa de proceso PDH y GDS	33
29	Aglomerados por GDS a 30% contenido de agua (1,25<Diámetro<2,00mm)	34
30	Aglomerados por GDS a 40% contenido de agua (1,25<Diámetro<2,00mm)	34
31	Aglomerados por GDS a 50% contenido de agua (1,25<Diámetro<2,00mm)	35
32	Aglomerados por PDH a 30% contenido de agua (1,25<Diámetro<2,00mm)	35
33	Aglomerados por PDH a 40% contenido de agua (1,25<Diámetro<2,00mm)	36
34	Aglomerados por PDH a 50% contenido de agua (1,25<Diámetro<2,00mm)	36
35	Gráfico de test de rango múltiple de Tukey para las variables de respuesta	37

## RESUMEN

El trabajo se realizó en la *École Nationale Supérieure Agronomique* (SupAgro) de Montpellier, Francia. Específicamente en el Departamento UMR IATE (*l' Unité Mixte de Recherches Ingénierie des Agropolymères et Technologies Emergentes*) durante el período de septiembre 2013 a marzo 2014.

Este estudio se centra en los mecanismos de estructuración de los alimentos en polvo, como es la sémola de trigo duro (*Triticum durum*). Se comparan dos procedimientos de aglomeración, ambos con doce minutos en total en el ciclo de mezclado y midiendo los requerimientos energéticos para cada proceso. De esta manera se podrá determinar si los aglomerados formados tienen las mismas características de calidad y su rendimiento. Uno de los procedimientos (PDH) consiste en la hidratación a bajo flujo de agua (0,5 g/s), en la cual se mezcla la sémola con un contenido de humedad inicial de 16% en base seca, pasando por una etapa intermedia de 30% de humedad y se alcanza en la etapa final, el contenido de agua deseado, que puede ser 30, 40 o 50%. El otro procedimiento (GDS) consta de hidratar a 5 g/s la sémola inicial hasta una etapa intermedia de 75% de humedad y posterior a esto se adicionan sólidos (sémola 9 g/s) para distribuir el agua y llegar a un contenido final de 30, 40 ó 50% de humedad al igual que en el proceso anterior. Se mide el contenido de humedad real, la densidad aparente, el volumen de la fracción sólida, entre otras propiedades, para caracterizar los aglomerados en dos grandes grupos, calidad y rendimiento. Para su análisis se utiliza ANDEVA de manera de poder determinar las diferencias significativas entre procesos y procedimientos.

Los resultados obtenidos mostraron que no existen diferencias significativas estadísticamente entre procesos, exceptuando los requerimientos energéticos. Lo que quiere decir que dependiendo a que contenido de agua final se desea llegar, se podría utilizar cualquiera de los métodos. Con respecto al rendimiento, el procedimiento que obtuvo mejores resultados fue el GDS, sin embargo, sus requerimientos energéticos fueron mucho más grandes que el PDH. Para las aptitudes de calidad de los aglomerados se necesita continuar los estudios para caracterizarlos de mejor manera.

## SUMMARY

The work realized was carried out in the *École Nationale Supérieure Agronomique* (SupAgro) of Montpellier, France. Specifically in the Departament UMR IATE (*l' Unité Mixte de Recherches Ingénierie des Agropolymères et Technologies Emergentes*) during the period of September 2013 to March 2014.

This study focuses on mechanisms of structuring of powdered foods, such as semolina of durum wheat (*Triticum durum*). Comparing two methods of agglomeration, both with twelve minutes total in the cycle of mixing and measuring the energy requirements for each process. Thus it may determine if formed agglomerations have the same quality and performance characteristics. One of the procedures (PDH) consists of the hydration of low water flow (0,5 g/s), in which is mixed semolina with a content of initial moisture of 16% on dry basis, passing through an intermediate stage of 30% humidity and reaches in the final stage, the desired water content, which can be 30, 40, or 50%. Another procedure (GDS) consists of hydrating initial semolina to 5 g/s up to a 75% humidity intermediate stage and subsequent to this are added solids (semolina 9 g/s) to distribute water and reach a final content of 30, 40 or 50% humidity as in the previous process. The content of actual moisture, bulk density, the volume of the solid fraction, among others properties, to characterize the agglomerates in two large groups, quality and performance is measured. In order to analyze it, we use ANOVA to determine significant differences between processes and procedures used for analysis.

The results showed that there was no significant difference statistically between processes, with the exception of energy requirements. This means that depending on the final water content you want to get, you could use either of the methods. With regard to the performance, the procedure that obtained the best results was the GDS. However, their energy requirements were very much larger than the PDH, for the quality of the agglomerates skills requires continuing studies to characterize them better.

## 1 INTRODUCCION

Este estudio está centrado en la estructuración de los alimentos en polvo reactivos (es decir, que son sensibles a los fenómenos de absorción, hinchazón y solubilización en superficie), abordando las dinámicas de los mecanismos de estructuración según diferentes vías tecnológicas innovadoras.

Consiste en estudiar y comparar los rendimientos y características de los aglomerados a base de sémola según el procedimiento y la estructura que ha obtenido el aglomerado. Para este estudio se han planteado las siguientes interrogantes: ¿Son iguales los aglomerados realizados con diferentes procesos?, ¿Tienen las mismas características?, ¿Sirven como alternativa para un determinado producto? Estos son algunos de los cuestionamientos que se intentarán responder con esta investigación.

### 1.1 Aglomeración

La aglomeración o granulación es la operación básica opuesta a la reducción de tamaños, en efecto, se define como un método para aumentar el tamaño medio de las partículas y la distribución en la cual se combinan las partículas para formar aglomerados de tamaño superior, en donde la partícula original inicial todavía se pueden identificar (BENALI *et al.*, 2009).

Los motivos para aplicar un método de aglomeración pueden ser la necesidad de mejorar el comportamiento del flujo o facilitar el mezclado, reducir la formación de polvo o ajustar directamente la forma, el tamaño, la porosidad, la robustez, etc.

Las técnicas de aglomeración pueden estar clasificadas en 2 grandes categorías, según si el proceso se realiza en seco o por vía húmeda, en presencia de un aglutinante o ligante (LITSTER Y ENNIS, 2004)

**1.1.1 Aglomeración húmeda.** El proceso de aglomeración húmeda responde al acoplamiento de tres operaciones unitarias. La adición de un líquido, para generar las fuerzas de adhesión entre las partículas; la agitación del polvo para distribuir al líquido, generar colisiones eficaces entre las partículas y promover los mecanismos de crecimiento y una etapa final de secado es necesaria para estabilizar a los aglomerados.

Los equipamientos de aglomeración están clasificados en dos categorías, según la forma en que agitan las partículas. (a) Los mezcladores neumáticos (lechos fluidizados y atomizadores) utilizan una corriente de aire para agitar las partículas a bajo cizallamiento y secar los aglomerados formados. Entonces el secado ocurre casi simultáneamente con la aglomeración. (b) Los mezcladores mecánicos, utilizan batidores (con paredes móviles ó con palas giratorias) para agitar las partículas. La etapa de secado se lleva a cabo después de la etapa de aglomeración.

Sin importar la tecnología utilizada para el proceso, el líquido de unión se dispersará por contacto y transferencia dentro de un campo de cizallamiento creado mecánicamente (HAPGOOD, 2000).

El control de las condiciones de humedad y mezclado hace posible dominar los mecanismos de estructuración para formar los aglomerados. La cohesión de éstos depende de la interacción establecida entre las partículas que se encuentran al interior de la estructura. Las fuerzas de adhesión son fuerzas capilares o fuerzas viscosas. La fuerza de adhesión de partículas depende de la superficie viscosa, el ángulo de contacto del sistema líquido-sólido, la tensión superficial del líquido sobre la superficie de la partícula, el tiempo de contacto, y la energía cinética de las partículas durante el proceso de aglomeración (IVESON *et al.*, 2001).

**1.1.1.1 Descripción de las fases de aglomeración.** El fenómeno de aglomeración se compone de diferentes mecanismos que se suceden, entran en competencia o bien, son concurrentes (IVESON *et al.*, 2001). Este ha sido un enfoque tradicional descrito en 5 fases por SASTRY Y FUERSTENAU, 1973, citado por BARKOUTI, 2012.

(i) Nucleación: es la reunión de partículas elementales húmedas por atracción capilar, de esta manera formarán las primeras estructuras llamadas núcleos. (ii) Recubrimiento en superficie por efecto bola de nieve: los aglomerados que ya se han formado juegan un rol de iniciadores, uniendo aquellas partículas elementales humectadas o los núcleos. Este mecanismo produce un aumento continuo del tamaño de los granos y una disminución del número de partículas finas, sin aumentar el número de gránulos.

(iii) La coalescencia o fusión, conduce a la formación de estructuras de tamaño importante. (iv) Transferencia por abrasión de un choque o una colisión sin conducir al rompimiento del grano. (v) Transferencia por fragmentación-revestimiento, en el cual existe una formación de fragmentos que son redistribuidos sobre los otros granos.

Las fases de esta descripción consideran condiciones de agitación para la formación de los granos. Según cuales sean las condiciones de agitación y de mezclado, los granos podrían tener tamaños y estructuras diferentes.

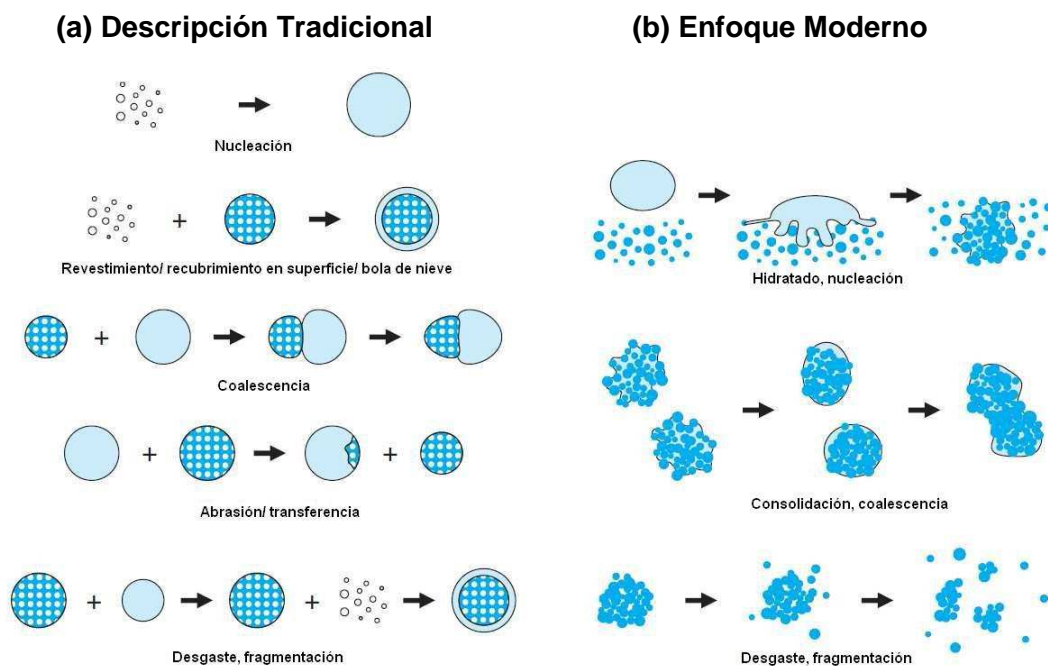
SALEH Y GUIGON, 2009, propusieron un enfoque moderno que ha sido puesto en lugar del otro para simplificar el fenómeno y reducir la sucesión de tres mecanismos distintos, que son:

(i) Hidratado y nucleación: durante esta etapa, el líquido entra en contacto con las partículas de polvo seco y se distribuye dentro de este lecho granular. Es en esta etapa donde aparecen las primeras estructuras agregadas a la unión entre el líquido y el polvo, los núcleos.

(ii) Consolidación y crecimiento: ocurren colisiones entre dos aglomerados, entre los aglomerados y el polvo seco o bien entre los aglomerados y las paredes del equipamiento, conduciendo así a la compactación y crecimiento de éstos mismos.

(iii) Desgaste y fragmentación: aquí los aglomerados hidratados o secos se rompen bajo los efectos de los choques o impactos.

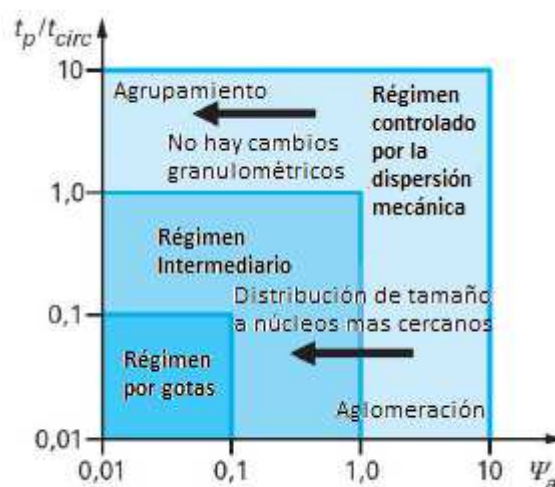
En la Figura 1 se aprecian ambas descripciones



**FIGURA 1.** Procesos de aglomeración: (a) Descripción tradicional, (b) Enfoque moderno

FUENTE: Adaptado de IVESON *et al.*, 2001

**1.1.1.2 Optimización de la aglomeración.** Cuando se forman los primeros núcleos, éstos crecen en una zona llamada zona de nucleación. Las primeras descripciones de esta zona comparan el flujo de distribución del ligante, el tamaño de la zona de nucleación y el área de partículas cubierta por el ligante cuando es distribuido. Al aumentar estos dos últimos parámetros, obtendremos mejores resultados homogéneos en cuanto a la talla de los aglomerados y también una repartición más homogénea del ligante en el medio. Existe un valor adimensional estudiado por LITSTER *et al.* (2001) con el fin de controlar las condiciones operatorias de la zona de humectado. En base a esta herramienta se puede determinar la calidad de la distribución del ligante después del humectado y el tipo de mecanismo de nucleación. De acuerdo al tiempo de penetración de la gota ( $t_g$ ) y de las características de la zona de humectado habrán 3 tipos de mecanismos de nucleación: controlado por gota, donde el líquido penetra la red de poros generado por las partículas de polvo casi instantáneamente y la distribución de tamaño de los núcleos refleja el tamaño de las gotas; controlado por dispersión mecánica, a medida que aparece este régimen, la relación entre la distribución de tamaño de las gotas y la distribución de tamaño de los núcleos disminuye progresivamente; y por último un régimen intermedio, donde ocurre algo muy similar al régimen controlado por gota, con la diferencia que aquí será más difícil de controlar la dinámica de penetración del ligante sobre la superficie del polvo, y además las fuerzas de cizallamiento tienen la misma importancia sobre la nucleación, al igual que en el régimen controlado por dispersión mecánica. Sin embargo, la carencia de los datos cuantitativos, hace que los límites precisos para cada régimen sean desconocidos hasta este momento



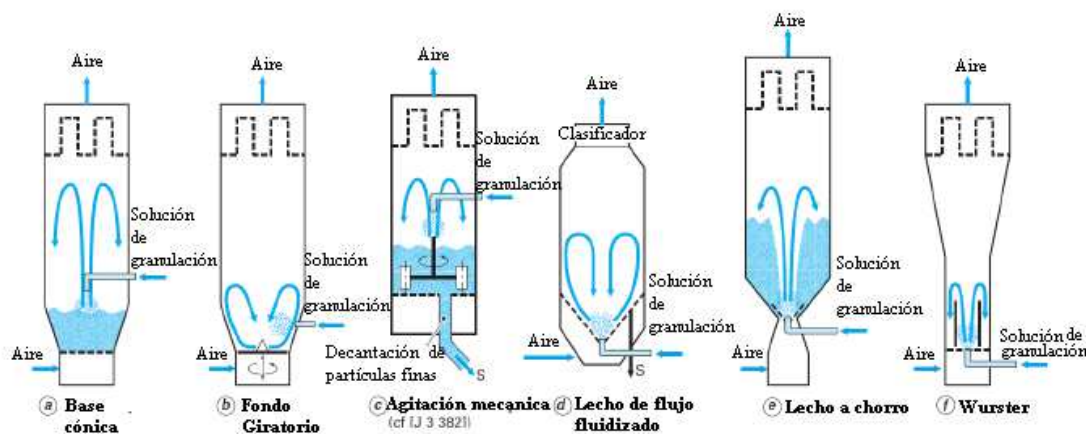
**FIGURA 2.** Diagrama de régimen de nucleación

FUENTE: Adaptado de SALEH Y GUIGON (2009)

Si se modifica la velocidad con la que pasa el polvo bajo el flujo del líquido sería posible la optimización de la fase de nucleación tanto en términos de la productividad como en términos de la calidad de los núcleos formados (tamaño y distribución granulométrica).

**1.1.2 Procesos de aglomeración por vía húmeda.** Algunos ejemplos de aglomeración por vía húmeda en la industria alimentaria pueden ser realizados en lecho fluidizado, en mezclador, etc.

**1.1.2.1 Aglomeración en lecho fluidizado.** Corresponde a un proceso que pone en contacto 3 fases: sólido, líquido y gas, permitiendo a la vez la aglomeración, el secado y eventualmente puede dar forma. En la Figura 3, podemos apreciar los diferentes tipos de lechos fluidizados aportes del ligante según si son continuos o discontinuos ( SALEH Y GUIGON, 2009)



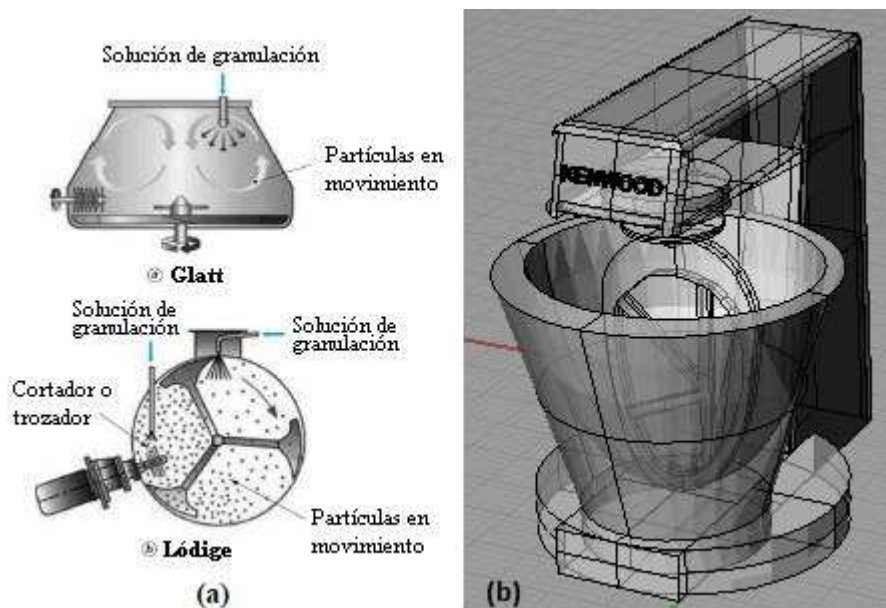
**FIGURA 3.** Tipos de lechos fluidizados granulares

FUENTE: Adaptado de SALEH Y GUIGON, 2009

**1.1.2.2 Aglomeración en mezclador.** Es importante tomar en cuenta que los estudios experimentales que se han aportado a la teoría actual de la aglomeración han sido realizados en condiciones de alta velocidad de cizallamiento. Bajo estas condiciones, el régimen de fluido que ocurre es del tipo colisional. De hecho, al existir una gran probabilidad de colisiones entre partículas humedecidas, hará más fácil el lograr una aglomeración. Dentro de las condiciones de baja velocidad de cizallamiento, el régimen de fluido que ocurre puede ser calificado como friccional y los grados de libertad entre partículas son menos elevados.

Esta aglomeración se realiza en aparatos llamados mezcladores o batidoras. Éstos, presentan la ventaja de poder operar con polvos cuya distribución granulométrica es bastante amplia, y de permitir una buena distribución de ligantes muy viscosos (KNIGHT *et al.*, 1998).

Un mezclador está constituido por un bol, que puede ser fijo o con movimiento de rotación en un eje principal, y de un conjunto de herramientas de preparación, como palas planas, caladas o en forma de peine. Las palas pueden estar montadas bajo un brazo giratorio, directamente sobre el bol del mezclador, con un movimiento rotatorio (ver Figura 4-b). Existen mezcladores de alto o bajo cizallamiento, la diferencia entre estos dos tipos de aparatos reside en la velocidad de rotación de las palas, que puede ser muy elevada ( $>10$  m/s) para el primer tipo de mezcladores (ver Figura 4-a). El modo de funcionamiento de cada aparato depende de la posición del eje principal de mezclado: vertical, horizontal o inclinado (CHARONNAT, 1999)



**FIGURA 4.** Tipos de mezcladores: (a) Alto cizallamiento, (b) Bajo cizallamiento  
FUENTE: (a) SALEH Y GUIGON (2009), (b) Elaboración propia

## 1.2 Sémola

*Triticum durum*, es el nombre científico del trigo duro, también conocido como trigo moruno, candeal, semolero, siliciano o fanfarrón. Este trigo es utilizado fundamentalmente en la elaboración de pastas y sémola de cuscús. Dentro de la

industria cerealera, la fabricación pastas o cuscús a base de sémola, implica una serie de mecanismos y de tecnologías de aglomeración húmeda, aprovechando las características de este alimento en polvo sensible a los fenómenos de absorción, hinchazón y solubilización en superficie.

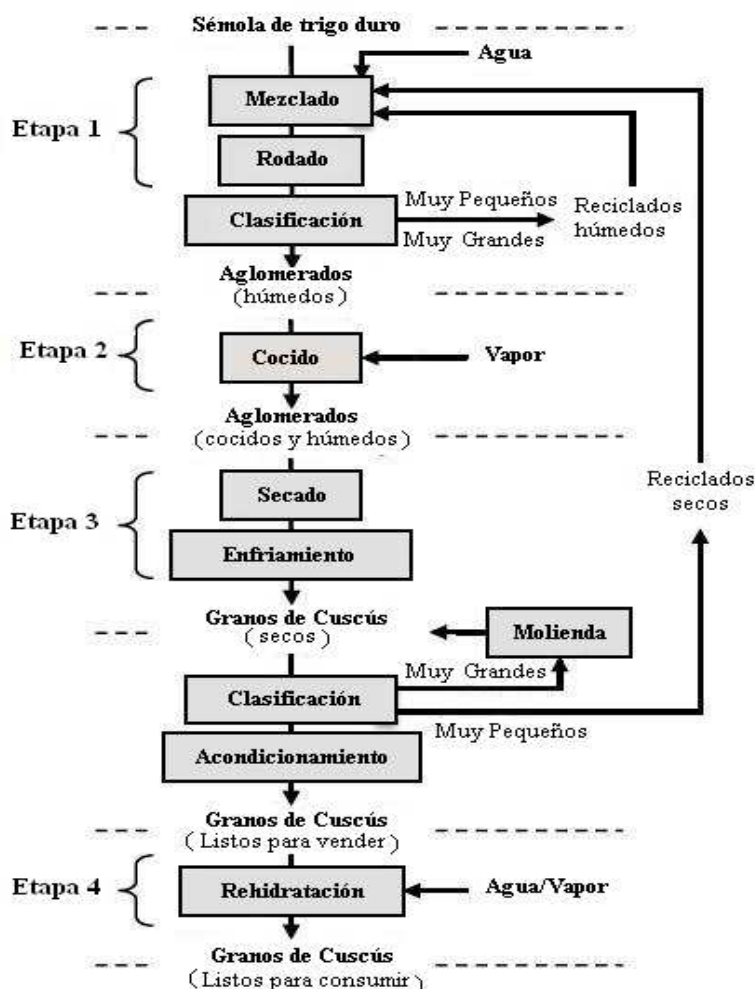
Se entiende por sémola, al producto elaborado con granos de trigo duro (*Triticum durum*) por medio de procedimientos de trituración o molienda en los que se separa la mayor parte del salvado y del germen, y el resto se muele hasta darle un grado adecuado de finura. (CODEX STANDARD 178,1991)

**1.2.1 Propiedades físico-químicas.** Según CHRISTÈLE-ICARD, 2000, citado por BARKOUTI, 2012, la sémola contiene alrededor de un 80% de hidratos de carbono (78% en forma de almidón y 2% en forma de azúcares reductores), 10-16,5% de proteínas, pentosanos representados por un 1,5-3%, éstos importantes para la gelificación. Los carotenoides son responsables del color amarillo que tienen las pastas.

El contenido de agua en la sémola es alrededor de un 14,5% dependiendo del origen de la sémola y de las condiciones de almacenamiento (CODEX STANDARD 178, 1991)

**1.2.2 Tecnologías de aglomeración de sémola: Cuscús.** El cuscús es un alimento muy antiguo. Podemos encontrar rastros de su invención en África del Norte hace más de 3000 años. Su consumo se ha extendido a través África Central, Europa y Estados Unidos. Desde hace 15 años, las líneas industriales se han vuelto cada vez más específicas, y se han adaptado para optimizar los rendimientos industriales y la calidad de estos productos.

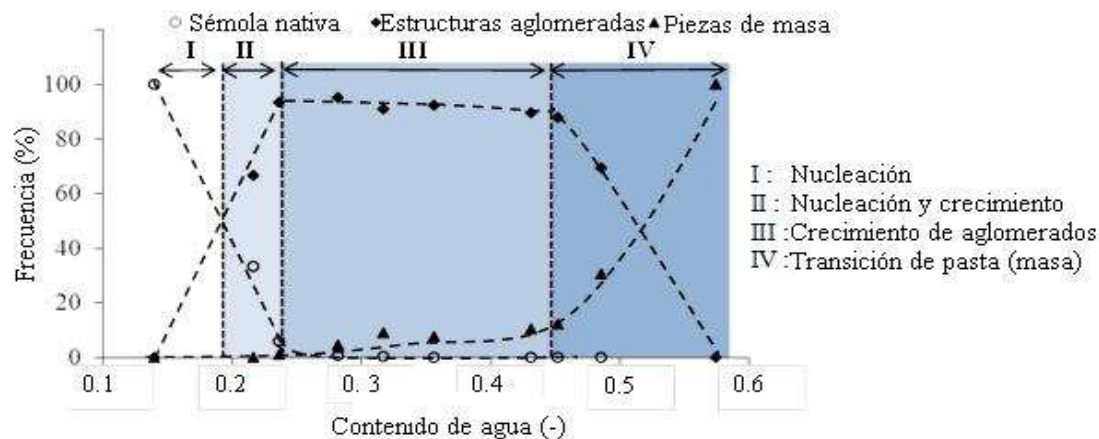
El proceso de fabricación del cuscús está compuesto por 3 etapas principales (FIGURA 5), la formación de granos de cuscús húmedos; el tratamiento térmico de los granos, es decir, la cocción al vapor y por último la estabilización del producto por medio del secado.



**FIGURA 5.** Línea de flujo para la elaboración de cuscús  
FUENTE: Adaptado de MANDATO *et al.*, 2013.

**1.2.3 Aglomeración de sémola en mezclador de bajo cizallamiento.** El cuscús es un producto de sémola, el cual se obtiene por la aglomeración de ésta en mezcladores de baja velocidad de cizallamiento. Como ligante se utiliza agua, sin embargo para asegurar la estabilidad de las propiedades del ligante durante la aglomeración se utiliza preferentemente un “jugo de sémola” producido por el contacto prolongado entre sémola y agua, de manera de extraer compuestos solubles del trigo. En una granulación húmeda dentro de un mezclador de baja velocidad de cizallamiento es posible analizar las propiedades de estructuras que se han formado por los diferentes contenidos de ligante agregado. Este análisis, basado en el monitoreo de sus características dimensionales y texturales permiten distinguir 3 tipos principales de estructuras susceptibles para su coexistencia simultánea dentro del mezclador. Ellos son las partículas nativas de sémola, las estructuras aglomeradas y las piezas o trocitos de masa. Dentro de estas tres estructuras tenemos 4 fases, tal como se muestra en la FIGURA 6 (i) fase de nucleación, la cual ocurre a baja hidratación, y está compuesta por partículas nativas de sémola y núcleos. (ii) fase de nucleación y

crecimiento, el medio está conformado por partículas de sémola, núcleos y aglomerados. (iii) fase de crecimiento de aglomerados, corresponde a la asociación de estructuras ya aglomeradas, núcleos y/o aglomerados. (iv) fase de transición de pasta o masa, es la unión de todas las partículas a una sola gran estructura.



**FIGURA 6.** Evolución de las frecuencias másicas de asociaciones de partículas en función del contenido de ligante mediano del lecho.

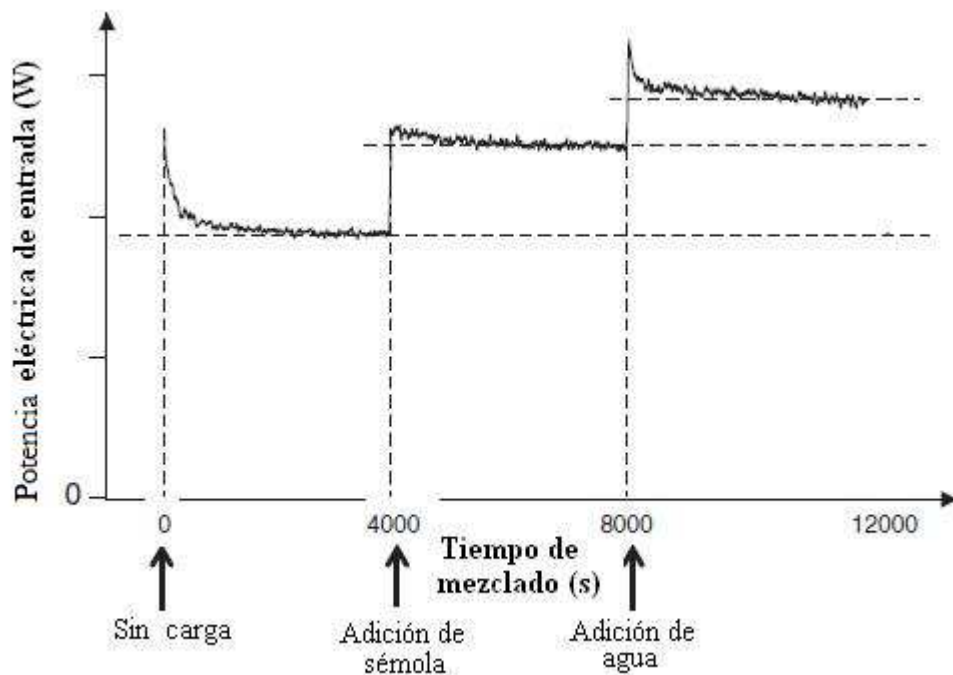
FUENTE: Adaptado de RONDET *et al.* 2013

**1.2.4 Caracterización reológica de los aglomerados.** El control de las condiciones de mezclado y humectado hace posible controlar los mecanismos de estructuración para el desarrollo de aglomerados. Su cohesión depende de las interacciones establecidas entre las partículas nativas dentro de su estructura. Existen dos fuerzas de adhesión, las fuerzas capilares y las fuerzas viscosas. La fuerza de adhesión entre partículas depende de la superficie viscosa, el ángulo de contacto del sistema líquido/sólido, la tensión superficial del líquido a la superficie de la partícula, el tiempo de contacto, la energía cinética de las partículas durante la aglomeración (IVESON *et al.*, 2001).

**1.2.5 Consumo energético de la aglomeración de sémola en mezclador de bajo cizallamiento.** La medición de energía ha sido de gran utilidad para muchos propósitos, como caracterizar la evolución del producto durante el proceso, representar la influencia de formulación y los parámetros de proceso, el control de la eficiencia de proceso, estimar la cohesión de las partículas de polvo, etc. La medición del consumo energético también ayuda a la caracterización del producto final, gracias a que establece relaciones entre la energía gastada durante la operación y las características de los aglomerados.

RONDET *et al.*, 2012, identificó un peak de consumo energético relacionado con el motor del mezclador al inicio de la puesta en marcha. Al cabo de unos minutos, la energía se estabiliza alcanzando un estado estacionario, cuyo valor depende del contenido de agua en las partículas del polvo dentro del lecho, y es relacionado con la fracción sólida de volumen del lecho. DEMEYRE *et al.*, 2007 citado por RONDET *et al.*, 2012 demostró que un incremento en la velocidad de revolución de la pala induce un incremento del consumo de energía cuando se utiliza un mezclador con 2 movimientos de revolución.

Mediante el experimento de RONDET *et al.*, 2012 podemos identificar los 3 diferentes orígenes de consumo energético: (i) Mezclado sin carga de material, de manera de evaluar la energía utilizada por el mezclador al estar vacío; (ii) Mezclado del material granular inerte; y por último (iii) Mezclado del material granular en presencia del líquido, de manera de evaluar la energía requerida para formar los aglomerados. Podemos apreciar en la FIGURA 7, el trabajo de RONDET aplicado a la sémola de trigo duro.



**FIGURA 7.** Curva típica para el consumo energético de un mezclador.  
FUENTE: Adaptado RONDET *et al.* (2012)

### 1.3 Hipótesis y objetivos de la investigación

Basándose en los antecedentes citados, la **hipótesis** de esta investigación fue:

Los aglomerados producidos mediante GDS (*Grande Débit de Solides*) presentan un rendimiento y calidad estadísticamente superior, en comparación con los aglomerados producidos por PDH (*Petit Débit d'Hydratation*)

Para comprobar la hipótesis, el objetivo general y los objetivos específicos fueron los siguientes:

#### **Objetivos Generales**

El objetivo de este estudio consiste en estudiar el rendimiento y calidad de dos procedimientos de aglomeración de sémola de trigo (*Triticum durum*), de bajo flujo de hidratación y de alto flujo de hidratación con adición de sólidos.

**Objetivos Específicos:**

- Fabricar los aglomerados de sémola mediante bajo flujo de hidratación y gran flujo de sólidos.
- Determinar la contenido de humedad real y distribución.
- Determinar densidad de los aglomerados y su compacidad.
- Determinar el coeficiente de fricción y la cohesión.
- Determinar los requerimientos energéticos de los procedimientos de aglomeración utilizados.
- Comparar mediante microscopio electrónico de barrido las estructuras de los aglomerados
- Determinar si existen diferencias significativas estadísticamente entre los procedimientos.

## 2 MATERIAL Y METODO

Los experimentos fueron realizados en los laboratorios del UMR IATE INRA (Unidades Mixtas de Investigación - Ingeniería de Agropolímeros y Tecnologías Emergentes - Instituto Nacional de Investigación Agronómica) de la Ecole SupAgro Montpellier, Francia.

### 2.1 Materiales

Los materiales e instrumentos utilizados en el desarrollo de este estudio se detallan a continuación.

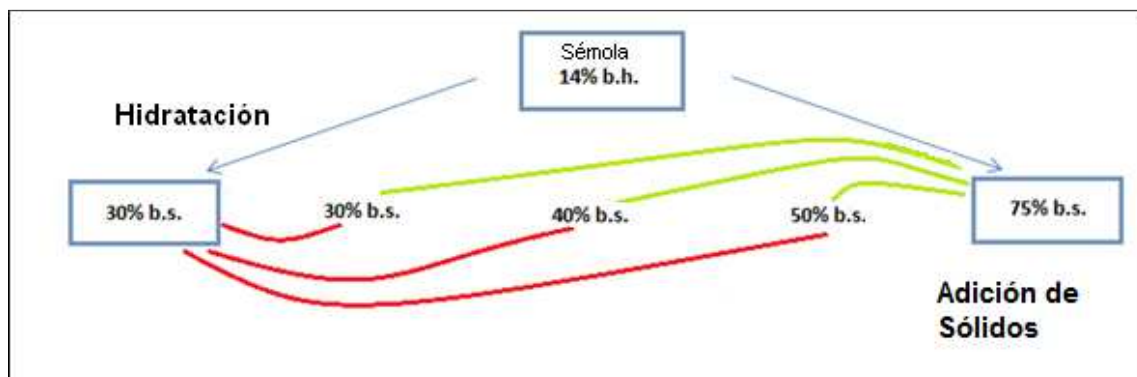
**2.1.1 Materia prima.** Sémola de trigo duro (*Triticum durum*), adquirida por el laboratorio de UMR IATE. La materia prima fue traspasada a recipientes plásticos cerrados y almacenados en una cámara de frío a  $4\pm 1^{\circ}\text{C}$  hasta el momento de su utilización.

**2.1.2 Instrumentos y utensilios.** Granulómetro láser MALVERN Mastersizer 3000, Picnómetro de helio Ultrapycnometer 1000 Quantachrome, balanzas BALCO Precisa 100A-300M; METTLER PM34, mezclador Kenwood, alimentador vibrante de sémola SINEX VL 2PP5, potenciómetro TRMS Metrix PX 120, omnibook HP XE3, tamizador rotativo, tamices (10,0; 5,6; 2,0; 1,25; 0,9; 0,8; 0,71; 0,63; 0,5; 0,4; 0,315 mm), balanza hidrostática BALCO Precisa LX120A, estufas (105°C/2 4 h); (140°C/2 h), desecador, aspersor de agua (unijet-6501; unijet-650017), reómetro FT4, taquímetro digital, cronómetro, microscopio electrónico de barrido JSM-T2000.

### 2.2 Metodología

Este estudio realiza 2 procedimientos de aglomeración, una es la hidratación de bajo flujo de agua y el otro, adición de sólidos con gran flujo de agua. La sémola se encuentra inicialmente alrededor de 14% de agua en base húmeda y 16% si se expresa en base seca.

Para ambos procedimientos, formaremos aglomerados, desde el contenido inicial de agua, hasta un contenido final de 30, 40 o 50% pasando por una etapa intermedia dependiendo del proceso es de hidratación (etapa intermedia 30% humedad en base seca) o de adición (75% humedad en base seca) como se muestra en la Figura 8. Todos los procedimientos se realizan con 1 repetición para obtener la desviación estándar de cada procedimiento.



**FIGURA 8.** Esquema de procedimientos de aglomeración  
FUENTE: Elaboración propia.

Se mide el contenido de agua inicial de la sémola por diferencia de masa, esto es, tomando muestras de 2 g por triplicado, y se deja secar en una estufa a 140°C/ 2 h. Posterior a esto se calcula la mediana de los 3 valores y se expresa en g de agua/ g de materia seca. Este procedimiento se realiza cada 2 semanas y también al momento de cambiar el lote. La densidad real de la sémola es de 1,47 g/cm<sup>3</sup> (RONDET *et al.*, 2012).

**2.2.1 Aglomeración.** El procedimiento comienza encendiendo la mezcladora 30 minutos antes de la aglomeración, de manera de estabilizar la energía que es consumida por la maquinaria. La potencia activa es medida con un potenciómetro conectado a un ordenador portátil para la lectura de los datos.

**2.&1.1 Hidratación de bajo flujo de agua.** Para la hidratación; una vez que la máquina ha completado el tiempo de estabilización de treinta minutos, se agrega el producto en polvo y espera durante 2 minutos, luego se inserta el aspersor para el ingreso de agua. El tiempo estimado depende del contenido de agua al que se desea llegar. La suma del tiempo de agregado de agua y el del mezclador después de la estabilización debe ser de 12 minutos cronometrados, como se muestra en la FIGURA 9. Se utiliza el aspersor unijet-650017, con una abertura de 25%. Esto quiere decir que en 1 segundo, el aspersor permitirá que el agua pase durante 0,25 segundos, y 0,75 segundos se mantenga cerrado el paso. De esta forma, obtendremos un flujo aproximado de 0,5 g/segundo. Para el cálculo del flujo de agua del aspersor, se pesa la cantidad de agua que se encuentra en un recipiente al cabo de 30 segundos. El flujo calculado será la mediana en base a 3 repeticiones.

Los requerimientos de materia prima y agua para la aglomeración se realizarán considerando que la masa total final entre sémola y agua es de 1500 g. Se utilizan las siguientes ecuaciones de balance de masa para el cálculo de cada preparación.

(a) Hidratación:

$$S = \left( \frac{A}{1+\omega_2} \right) + \left( \frac{A}{1+\omega_2} x \right) \quad (1)$$

$$E_1 = \left( \frac{A}{1+\omega_2} \omega_1 \right) - \left( \frac{A}{1+\omega_2} x \right) \quad (2)$$

$$E_2 = \left( \frac{A}{1+\omega_2} \omega_2 \right) - \left( \frac{A}{1+\omega_2} x \right) - \left( \frac{A}{1+\omega_2} \omega_1 \right) - \left( \frac{A}{1+\omega_2} x \right) \quad (3)$$





**2.&2 Distribución granulométrica.** La distribución granulométrica de la sémola fue realizada en el granulómetro láser MALVERN Mastersizer 3000 a temperatura ambiente. Este granulómetro, utiliza la difracción láser para medir el tamaño de las partículas. Esta técnica, consiste en medir la intensidad de luz transmitida durante el paso de un haz del láser a través de la muestra de partículas dispersas. Este dato, es inmediatamente analizado para calcular el tamaño de las partículas que creó como la imagen de difracción.

Para los aglomerados se toman 250 g de la mezcla homogenizada, y se separan los aglomerados con el uso de una columna de tamices, puestas en orden descendente (10,0; 5,6; 2,0; 1,25; 0,9; 0,8; 0,71; 0,63; 0,5; 0,4; 0,315 mm) en el tamizador rotativo durante 3 minutos. La población de cada tamiz será medida en porcentaje con respecto a los 250 g de muestra.

**2.&3 Contenido de agua.** Luego del tamizado, pesar 2 g de cada tamiz y medir el contenido de humedad por diferencia de peso realizada en una estufa que almacena las muestras durante 24 h a 105°C de acuerdo con el método oficial AACC (American Association for Clinical Chemistry) (AACC, 2000) utilizado por MANDATO *et al.*, 2013. Una vez que las muestras se retiran de la estufa, se dejan enfriar durante 15 minutos en una cápsula de vacío a temperatura ambiente.

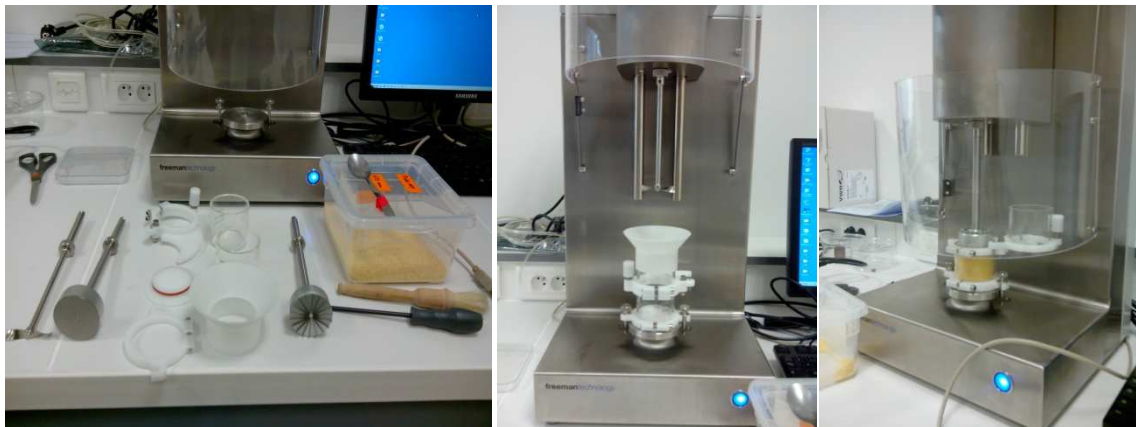
**2.&4 Densidad aparente.** La densidad aparente de los aglomerados ( $\rho_{ag}$ ) se determina con la balanza hidrostática BALCO Precisa LX120A usando la parafina como líquido de referencia, debido al alto comportamiento hidrostático de la sémola con el agua. Este procedimiento se basa en el principio de Arquímedes, utilizando tres valores medidos, estos son, la masa de partículas (sémola o aglomerados) en el aire ( $m_a$ ), masa de partículas completamente sumergidas en el líquido de referencia ( $m_l$ ) y la densidad del líquido ( $\rho_l$ ) y tomando la densidad del aire ( $\rho_a$ ) como 0,0012 g/cm<sup>3</sup>. La densidad del aglomerado se calcula con la siguiente fórmula:

$$\rho_{ag} = \frac{m_a}{m_a - m_l} * (\rho_l - \rho_a) + \rho_a \quad (6)$$

**2.&5 Test de cizallamiento.** Esta prueba consiste inicialmente en una etapa de acondicionamiento, donde ingresa una hélice de 48 mm para acomodar los aglomerados dentro de la cápsula cilíndrica, luego la muestra es aplastada por un pistón también de 48 mm, la fuerza vertical aplicada por este pistón llega hasta 26 N. Posterior a esto comienza el programa para polvos hidratados, este consiste en aplicar una fuerza normal ( $\sigma$ ) de 9, 8, 7, 6 y 5 kPa, y una fuerza de cizallamiento ( $\tau$ ) analizada gracias a la representación del diagrama de mohr en un plano ( $\sigma, \tau$ ) (Freeman *et al.*, 2009) (ejemplo de las fuerzas ejercidas por el pistón FIGURA 12).



**FIGURA 12.** Esquema del pistón para test de cizallamiento  
FUENTE: Freeman Technology, 2008



**FIGURA 13.** Reómetro FT<sub>4</sub>, implementos, acondicionamiento y test de cizallamiento

La fuerza normal se puede relacionar con los valores críticos de cizallamiento gracias a una ecuación que considera el coeficiente de fricción y la cohesión, como se muestra a continuación:

$$\tau = \mu\sigma + c \quad (7)$$

Estos valores pueden ser deducidos por las mediciones realizadas en el reómetro FT<sub>4</sub> a los aglomerados de sémola de 1,25 mm de diámetro. La fricción corresponde a la pendiente y la cohesión a la intersección con el eje y de la relación lineal entre  $\sigma$  y  $\tau$ .

Las muestras para esta prueba tienen un volumen constante de 393 ml, que corresponden a la medida de volumen de la cápsula del reómetro, exceptuando aquellos donde no se logró recuperar suficientes aglomerados. El volumen de la fracción sólida del lecho de aglomerados ( $\phi$ ) se calcula con la masa de la muestra ( $m_T$ , en g), la densidad real de la sémola ( $\rho_s^* = 1,47 \text{ g/cm}^3$ ), el volumen de la cápsula de FT<sub>4</sub> ( $V_T = 393 \text{ ml}$ , se midió el volumen utilizando Rhinoceros 3.0™ para el caso de los

aglomerados con insuficiente cantidad para la muestra) y el contenido de agua de la muestra ( $\omega$ , en g de agua/ g de materia seca)

$$\varphi = \frac{m_T}{\rho_s^* V_T (1 + \omega)} \quad (8)$$

**2.&6 Observaciones en SEM.** Las estructuras externas de los diferentes granos (partículas de sémola, núcleos, aglomerados y trozos de masa) obtenidas para diferentes contenidos de agua fueron observadas mediante un microscopio electrónico de barrido (JSM-T2000, JEOL, Tokio, Japón). Para esto se realizaron los diferentes procedimientos de aglomerado por la mañana, y se observaron por la tarde.

**2.2.7 Análisis estadístico.** Se utilizó ANDEVA multifactorial al 95% de confianza para evaluar las variables de respuesta de los aglomerados entre 1,25 y 2,00 mm. Donde los factores son el procedimiento (GDS y PDH) como variable no continua, y los contenidos de humedad a los que se desea llegar como variable continua con 3 niveles (30, 40 y 50%). El diseño experimental arrojó los ensayos mostrados en el CUADRO 1, y cada uno con una repetición. Se comparó los resultados de cada proceso y tratamiento determinando si existen diferencias significativas estadísticamente. En caso de existir diferencias significativas se utilizó la prueba de rango múltiple de Tukey.

**CUADRO 1.** Diseño experimental de trabajo

Procedimiento	GDS	PDH	GDS	PDH	PDH	GDS
Contenido de humedad	30	30	50	40	50	40

FUENTE: Elaboración Propia

### 3 PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

A continuación se presentan las tablas de resultados y las gráficas obtenidas para cada respuesta medida de los aglomerados.

Para el rendimiento de producto se utilizó la distribución granulométrica, siendo el diámetro de partícula de interés entre 1,25 y 2 mm, esto se debe a que esa es la talla ideal para aglomerados de cuscús, y por lo tanto el producto que se desea mejorar o modificar

#### 3.1 Distribuciones granulométricas

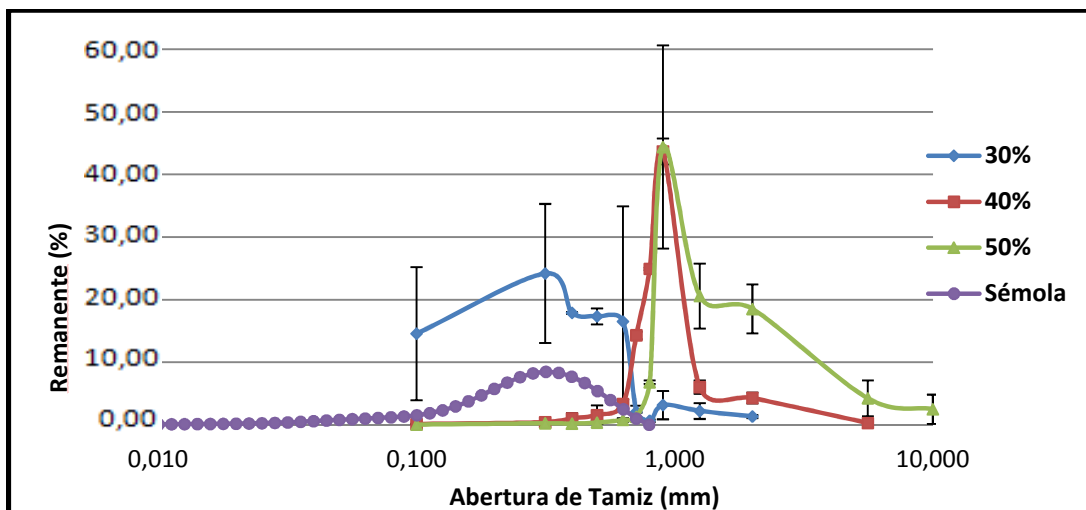
En la FIGURA 14 se puede apreciar que la curva que mejor representa una distribución normal es la roja de 40%, en términos de calidad es la que tiene un mayor porcentaje de aglomerados de un determinado tamaño.

De acuerdo con las poblaciones el 24,20% de las partículas con un 30% de agua corresponden a sémola. El 43,70% de la población de 40% de humedad corresponde a núcleos y para 50% contenido de humedad el mayor porcentaje se encuentra en los núcleos, sin embargo, el segundo y tercer mayor porcentaje se encuentra en la población correspondiente a los aglomerados.

Se agrega como referencia la curva granulométrica de la sémola para su comparación con las curvas de aglomeración.

**CUADRO 2.** Distribución proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación

Abertura de Tamiz (mm)	30%		40%		50%	
	aglomerados P.D.H.	SD	aglomerados P.D.H.	SD	aglomerados P.D.H.	SD
10,000	-	-	-	-	2,50	2,34
5,600	-	-	0,29	0,05	4,24	2,86
2,000	1,33	0,23	4,30	0,86	18,52	3,91
1,250	2,21	1,26	6,05	1,06	20,59	5,19
0,900	3,16	2,26	43,70	2,08	44,40	16,24
0,800	0,66	0,20	24,93	0,18	6,81	0,29
0,710	2,11	0,95	14,31	0,59	1,28	0,68
0,630	16,52	18,39	3,31	0,76	0,79	0,26
0,500	17,33	1,29	1,55	1,56	0,37	0,36
0,400	17,90	0,13	1,03	0,88	0,20	0,16
0,315	24,20	11,11	0,42	0,13	0,26	0,19
0,100	14,57	10,63	0,12	0,05	0,04	0,00
Total	100,00	-	100,00	-	100,00	-



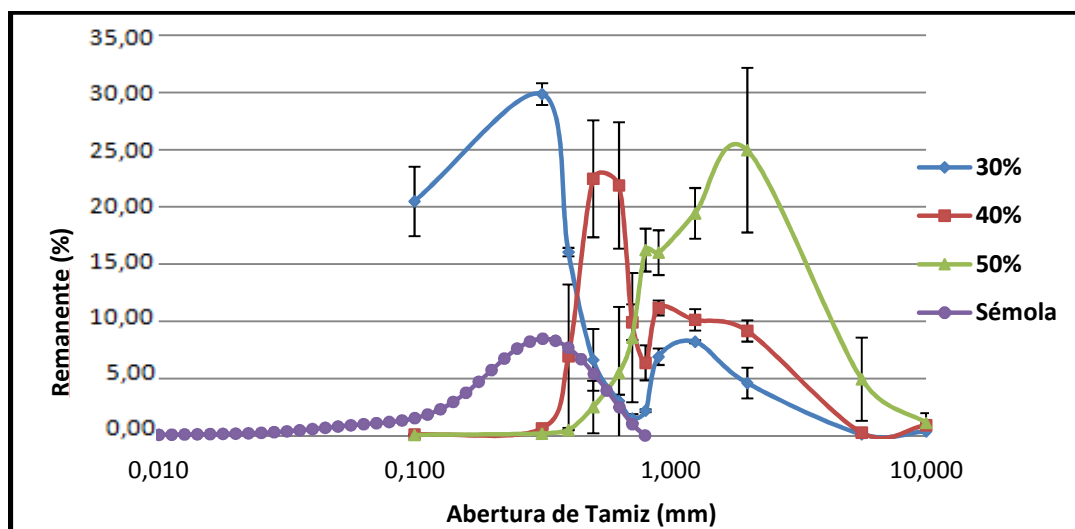
**FIGURA 14.** Distribución granulométrica en porcentaje para aglomerados por P.D.H

De acuerdo con el CUADRO 3 y FIGURA 15 podemos apreciar que los tamices que obtienen mayor cantidad de partículas son 0,315; 0,500 y 2,000 mm para 30,40 y 50% contenido de humedad respectivamente. Estos tamaños de partículas corresponden a sémola para 30%, núcleos para 40% y aglomerados en el caso de 50% de humedad. En este caso, la curva que más se acerca una distribución normal es la verde de 50%, en términos de calidad es la que tiene un mayor porcentaje de aglomerados de un determinado tamaño

Se agrega como referencia la curva granulométrica de la sémola para su comparación con las curvas de aglomeración.

**CUADRO 3.** Distribución proceso de aglomeración por adición de sólidos

Abertura de Tamiz (mm)	30%		40%		50%	
	aglomerados G.D.S.	SD	aglomerados G.D.S.	SD	aglomerados G.D.S.	SD
10,000	0,38		0,92	0,34	1,12	0,85
5,600	0,14	0,03	0,28	0,00	4,94	3,64
2,000	4,61	1,34	9,16	0,93	24,96	7,19
1,250	8,21	0,13	10,13	0,93	19,44	2,22
0,900	6,91	0,72	11,17	0,65	16,00	1,96
0,800	2,19	0,13	6,38	1,53	16,23	1,87
0,710	1,51	0,38	9,93	1,56	8,58	5,66
0,630	3,03	0,56	21,88	5,52	5,49	5,78
0,500	6,63	2,70	22,46	5,11	2,51	2,29
0,400	16,05	0,37	6,96	6,27	0,50	0,03
0,315	29,86	0,96	0,64	0,00	0,18	0,03
0,100	20,48	3,04	0,10	0,09	0,06	0,03
Total	100,00	-	100,00	-	100,00	-



**FIGURA 15.** Distribución granulométrica en porcentaje para aglomerados por G.D.S

Conforme al CUADRO 4 el diámetro promedio de partícula para las distintas hidrataciones corresponden a 0,46; 0,93 y 1,22 mm para 30, 40 y 50% de humedad respectivamente

**CUADRO 4.** Distribución acumulada proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación

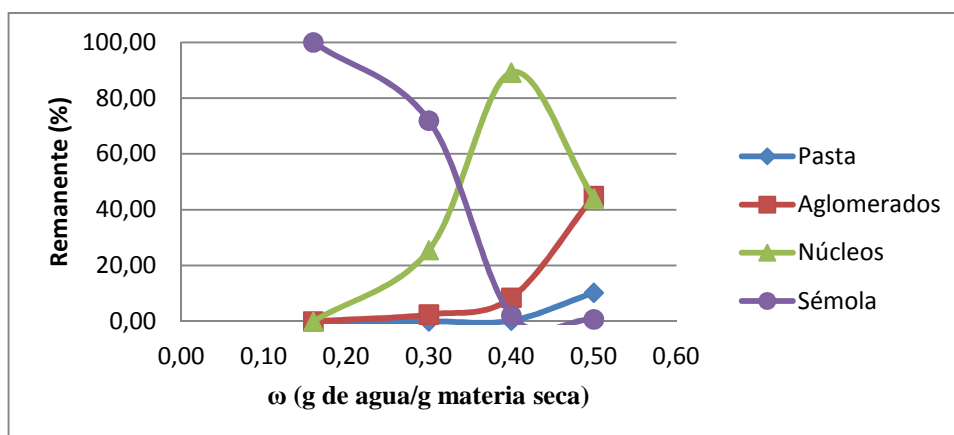
	30%	40%	50%
Abertura de Tamiz (mm)	Distribución acumulada P.D.H.	Distribución acumulada P.D.H.	Distribución acumulada P.D.H.
10,000	0,00	0,00	2,50
5,600	0,00	0,29	6,74
2,000	1,33	4,59	25,26
1,250	3,54	10,64	45,85
0,900	6,70	54,34	90,25
0,800	7,36	79,27	97,06
0,710	9,47	93,57	98,34
0,630	26,00	96,89	99,13
0,500	43,33	98,43	99,51
0,400	61,23	99,46	99,70
0,315	85,43	99,88	99,96
0,100	100,00	100,00	100,00
Total	-	-	-

Conforme al CUADRO 5 el diámetro promedio de partícula para las distintas hidrataciones corresponden a 0,40; 0,70 y 1,27 mm para 30, 40 y 50% de humedad respectivamente.

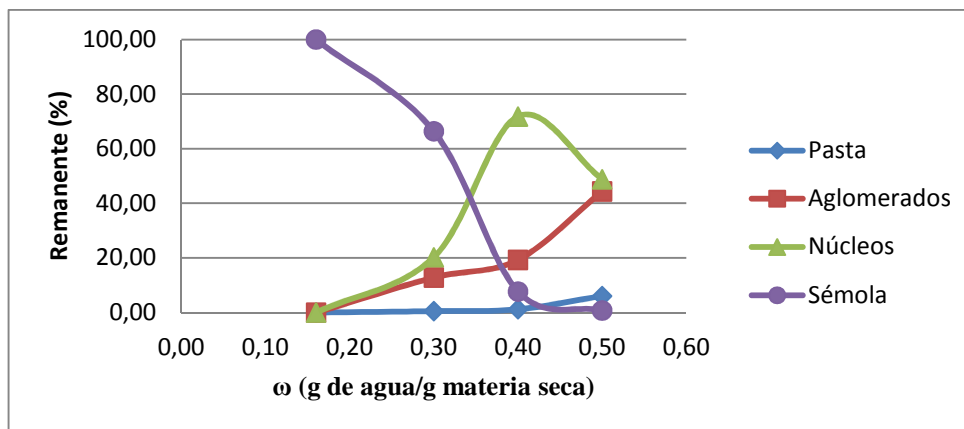
**CUADRO 5.** Distribución acumulada proceso de aglomeración por adición de sólidos

	30%	40%	50%
Abertura de Tamiz (mm)	Distribución acumulada G.D.D.	Distribución acumulada G.D.D.	Distribución acumulada G.D.D.
10,000	0,38	0,92	1,12
5,600	0,52	1,20	6,06
2,000	5,13	10,37	31,02
1,250	13,34	20,49	50,45
0,900	20,25	31,66	66,46
0,800	22,43	38,04	82,68
0,710	23,94	47,96	91,26
0,630	26,97	69,84	96,75
0,500	33,60	92,30	99,26
0,400	49,65	99,26	99,76
0,315	79,52	99,90	99,94
0,100	100,00	100,00	100,00
Total	-	-	-

De las gráficas de la FIGURA 16 y 17 podemos ver que ambos procedimientos, siguen con el patrón de la FIGURA 6. Sin embargo la mayor diferencia se produce en la población de aglomerados producidos por la adición de sólidos.



**FIGURA 16.** Distribución granulométrica en porcentaje para las poblaciones por PDH



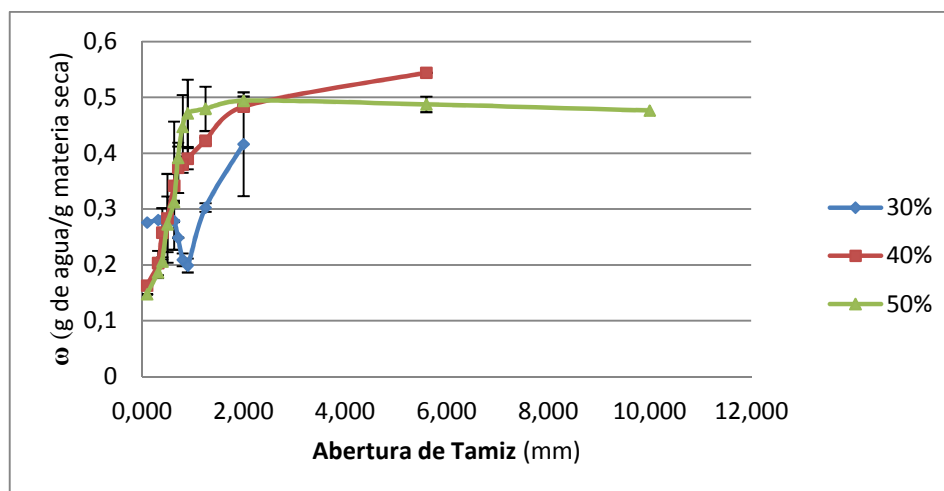
**FIGURA 17.** Distribución granulométrica en porcentaje para las poblaciones por GDS

### 3.2 Contenido de agua

Del CUADRO 6 y la FIGURA 18 podemos dilucidar que a medida que aumentamos el contenido de humedad se hace más grande la diferencia de estos contenidos en las distintas poblaciones de partículas. A pesar de estas diferencias, la cantidad de agua existente en el tamaño de partícula de interés, es decir 1,25 mm se encuentra cercano al contenido deseado.

**CUADRO 6.** Contenido de agua proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación

Abertura de Tamiz (mm)	30%		40%		50%	
	aglomerados P.D.H.	SD	aglomerados P.D.H.	SD	aglomerados P.D.H.	SD
10,000	-	-	-	-	0,48	0,00
5,600	-	-	0,54	0,27	0,49	0,01
2,000	0,42	0,04	0,48	0,00	0,49	0,01
1,250	0,30	0,01	0,42	0,00	0,48	0,04
0,900	0,20	0,09	0,39	0,01	0,47	0,06
0,800	0,21	0,01	0,38	0,02	0,45	0,06
0,710	0,25	0,01	0,37	0,01	0,39	0,02
0,630	0,28	0,01	0,34	0,05	0,31	0,00
0,500	0,28	0,00	0,28	0,11	0,27	0,05
0,400	0,28	0,00	0,26	0,08	0,21	0,00
0,315	0,28	0,00	0,20	0,04	0,19	0,01
0,100	0,28	0,00	0,16	0,02	0,15	0,00
Total	0,28	0,01	0,37	0,02	0,36	0,04

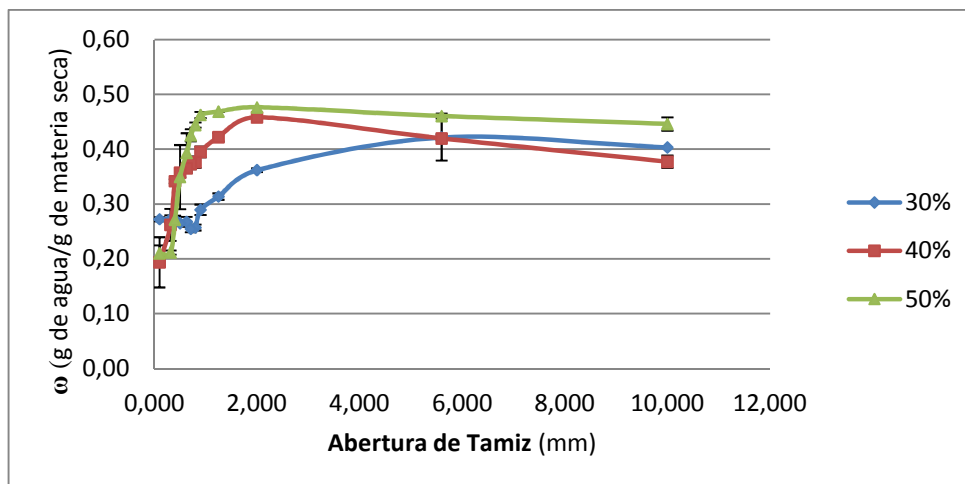


**FIGURA 18.** Contenido de agua procedimiento PDH

Para el CUADRO 7 y la FIGURA 19 ocurre lo mismo que el procedimiento PHD, sin embargo es más preciso para los tratamientos de 50% de humedad.

**CUADRO 7.** Contenido de agua proceso de aglomeración por GDS

Abertura de Tamiz (mm)	30%		40%		50%	
	aglomerados G.D.S.	SD	aglomerados G.D.S.	SD	aglomerados G.D.S.	SD
10,000	0,40	0,00	0,38	0,01	0,45	0,01
5,600	0,42	0,01	0,42	0,04	0,46	0,00
2,000	0,36	0,00	0,46	0,00	0,48	0,00
1,250	0,31	0,01	0,42	0,01	0,47	0,00
0,900	0,29	0,01	0,39	0,01	0,46	0,01
0,800	0,26	0,01	0,38	0,01	0,44	0,00
0,710	0,25	0,01	0,37	0,01	0,43	0,01
0,630	0,27	0,01	0,36	0,01	0,39	0,04
0,500	0,27	0,00	0,36	0,01	0,35	0,06
0,400	0,27	0,01	0,34	0,00	0,27	0,01
0,315	0,27	0,01	0,26	0,03	0,21	0,00
0,100	0,27	0,00	0,19	0,05	0,21	0,01
Total	0,29	0,00	0,37	0,01	0,42	0,00



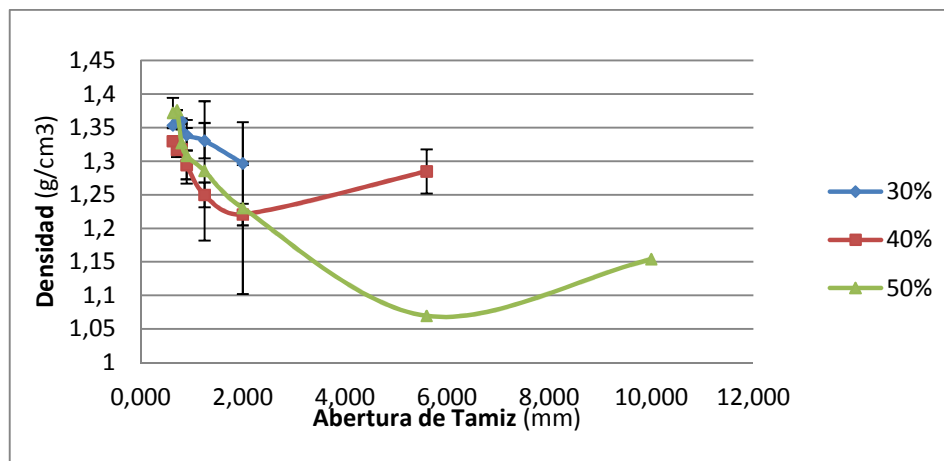
**FIGURA 19.** Contenido de agua procedimiento GDS

### 3.3 Densidad aparente

Las densidades representada en el CUADRO 8 y Figura 20 para los aglomerados por bajo flujo de agua oscilan entre 1,07 y 1,38 g/cm<sup>3</sup>, siendo el procedimiento a 50% de humedad el que presenta mayor variación entre densidades de los distintos tamaños de aglomerados para el mismo tratamiento.

**CUADRO 8.** Densidad proceso de aglomeración a pequeño flujo de hidratación

Abertura de Tamiz (mm)	30%		40%		50%	
	aglomerados P.D.H.	SD	aglomerados P.D.H.	SD	aglomerados P.D.H.	SD
10,000	-	-	-	-	1,15	0,00
5,600	-	-	1,28	0,09	1,07	0,00
2,000	1,30	0,03	1,22	0,03	1,23	0,13
1,250	1,33	0,04	1,25	0,02	1,29	0,10
0,900	1,34	0,00	1,29	0,02	1,31	0,04
0,800	1,36	0,03	1,32	0,02	1,33	0,02
0,710	1,36	0,02	1,32	0,00	1,38	0,00
0,630	1,35	0,00	1,33	0,01	1,37	0,02
Media	1,34	0,01	1,29	0,01	1,27	0,08

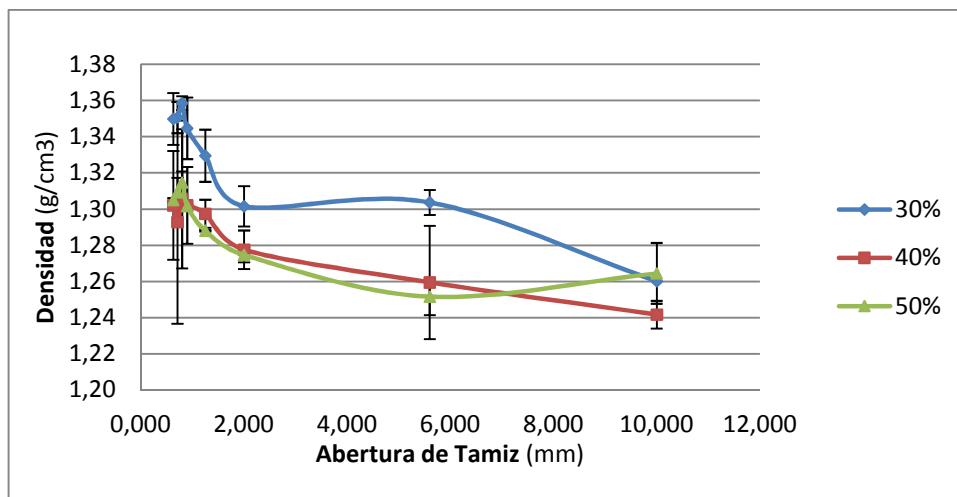


**FIGURA 20.** Densidad aparente aglomerados procedimiento PDH

Las densidades representada en el CUADRO 9 y FIGURA 21 para los aglomerados por adición de sólidos oscilan entre 1,24 y 1,36 g/cm<sup>3</sup>, siendo el procedimiento a 30% de humedad el que presenta mayor variación entre densidades de los distintos tamaños de aglomerados para el mismo tratamiento.

**CUADRO 9.** Densidad proceso de aglomeración por adición de sólidos

Abertura de Tamiz (mm)	30%		40%		50%	
	aglomerados G.D.S.	SD	aglomerados G.D.S.	SD	aglomerados G.D.S.	SD
10,000	1,26	0,00	1,24	0,01	1,26	0,02
5,600	1,30	0,01	1,26	0,03	1,25	0,01
2,000	1,30	0,01	1,28	0,01	1,27	0,00
1,250	1,33	0,01	1,30	0,01	1,29	0,00
0,900	1,34	0,02	1,30	0,02	1,30	0,00
0,800	1,36	0,00	1,31	0,04	1,31	0,01
0,710	1,35	0,01	1,29	0,06	1,31	0,01
0,630	1,35	0,01	1,30	0,03	1,31	0,00
Media	1,33	0,00	1,28	0,03	1,30	0,00



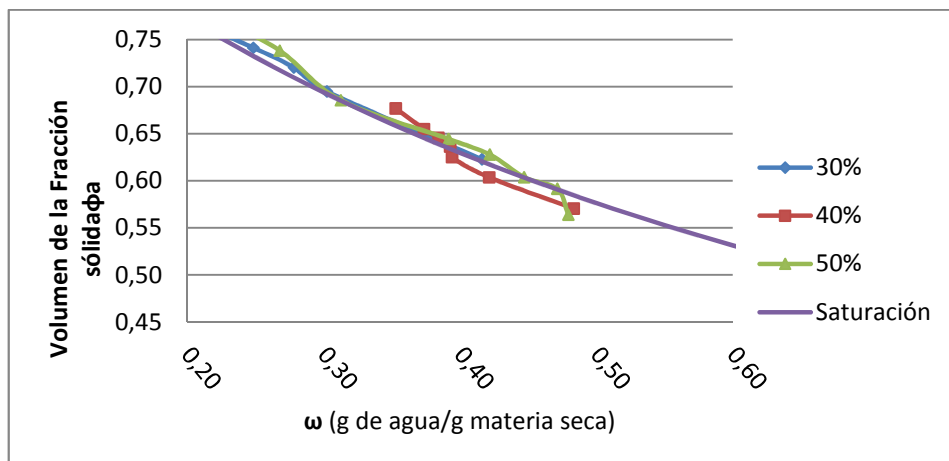
**FIGURA 21.** Densidad aparente aglomerados procedimiento GDS

### 3.4 Volumen de la fracción sólida

Los valores del volumen de la fracción sólida de las partículas intermedias y superiores, es decir, núcleos ( $0,63 < N < 0,9$  mm), aglomerados ( $1,25 < A < 2,00$  mm), y Pasta ( $5,60 < P < 10,00$  mm) en ambos procesos son presentados en función del contenido de agua real de las estructuras. En ellas podemos observar que todos los puntos obtenidos se encuentran ya sea, cercanos o bien sobre la curva de saturación, lo que quiere decir que incluso las estructuras con un menor contenido de agua han logrado reemplazar el aire existente dentro de su estructura por el agua.

**CUADRO 10.** Volumen de la fracción sólida para aglomerados de hidratación de bajo flujo

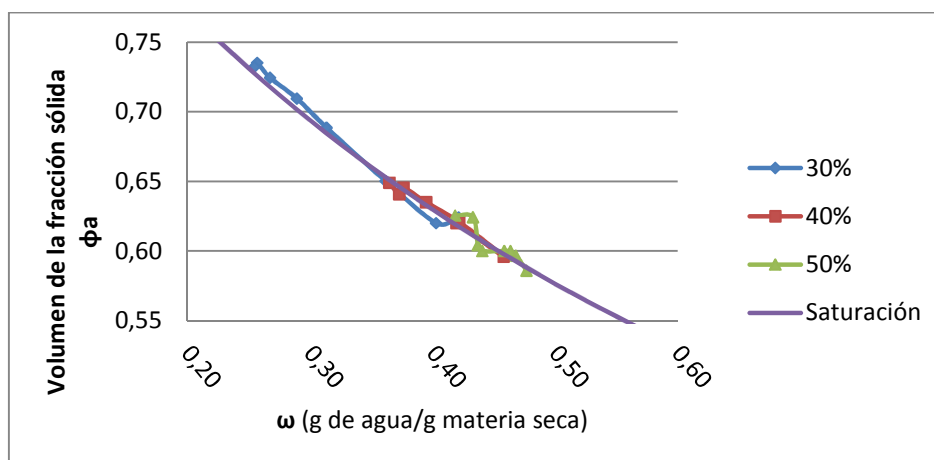
30%		40%		50%	
$\omega$	$\phi_a$	$\omega$	$\phi_a$	$\omega$	$\phi_a$
				0,48	0,56
		0,48	0,57	0,47	0,59
0,42	0,62	0,42	0,60	0,45	0,60
0,30	0,69	0,39	0,63	0,42	0,63
0,28	0,72	0,39	0,64	0,39	0,64
0,25	0,74	0,38	0,65	0,31	0,69
0,21	0,77	0,37	0,65	0,27	0,74
0,20	0,76	0,35	0,68	0,22	0,77



**FIGURA 22.** Volumen de la Fracción sólida en función del contenido de agua para PDH

**CUADRO 11.** Volumen de la fracción sólida para aglomerados por adición de sólidos

30%		40%		50%	
$\omega$	$\phi_a$	$\omega$	$\phi_a$	$\omega$	$\phi_a$
0,42	0,62		0,61	0,48	0,59
0,40	0,62	0,42	0,62	0,47	0,60
0,36	0,65	0,46	0,60	0,46	0,60
0,31	0,69	0,42	0,62	0,46	0,60
0,29	0,71	0,39	0,64	0,44	0,60
0,27	0,72	0,38	0,65	0,44	0,60
0,26	0,74	0,37	0,64	0,43	0,62
0,25	0,73	0,36	0,65	0,42	0,63



**FIGURA 23.** Volumen de la Fracción sólida en función del contenido de agua para GDS

### 3.5 Test de cizallamiento

Las FIGURAS 24 y 25, se apoyan con el CUADRO 12, puesto que indican en ambos procesos que existe una tendencia en la cohesión entre partículas de aumentar progresivamente cuando se aumenta el contenido de agua (FIGURA 27).

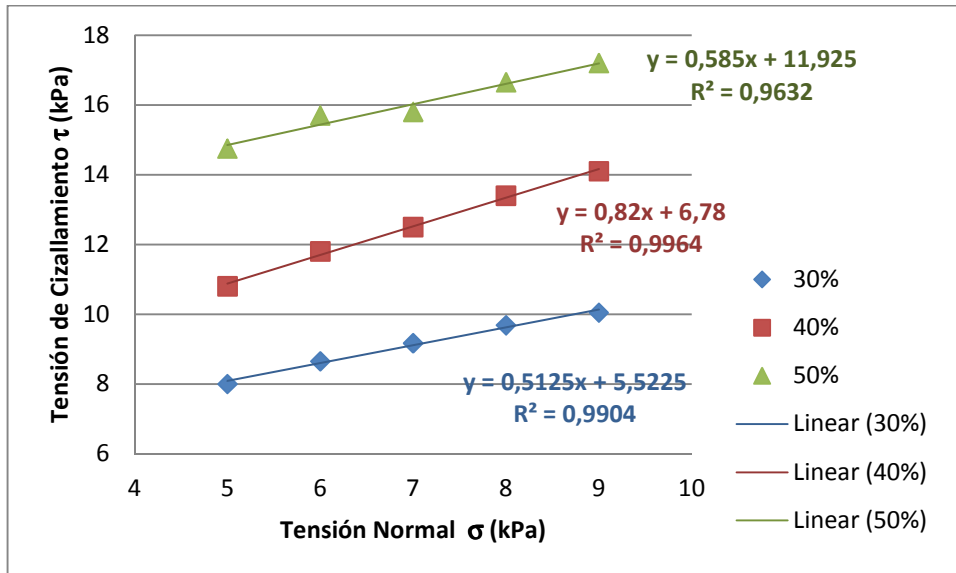


FIGURA 24. Cizallamiento en función de la tensión normal para proceso PDH

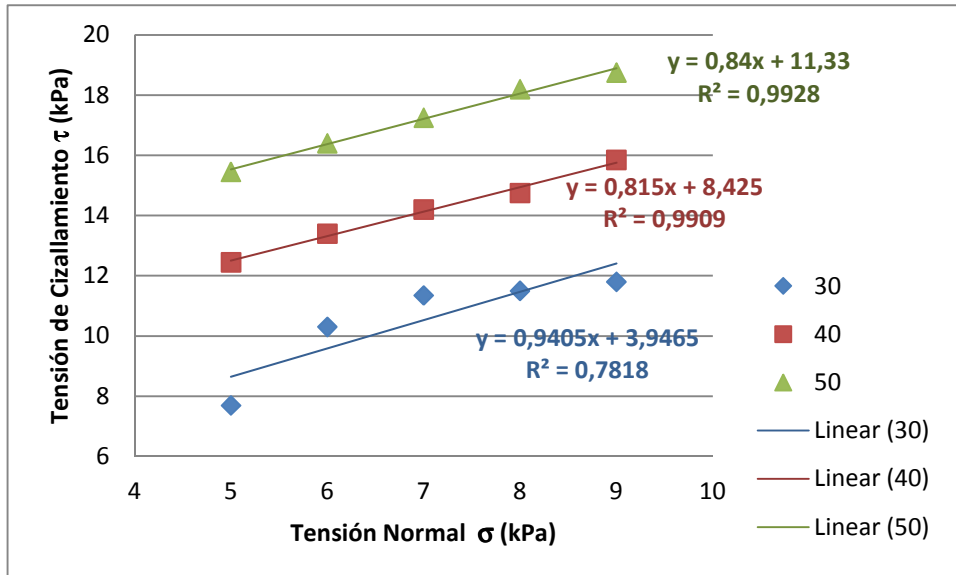
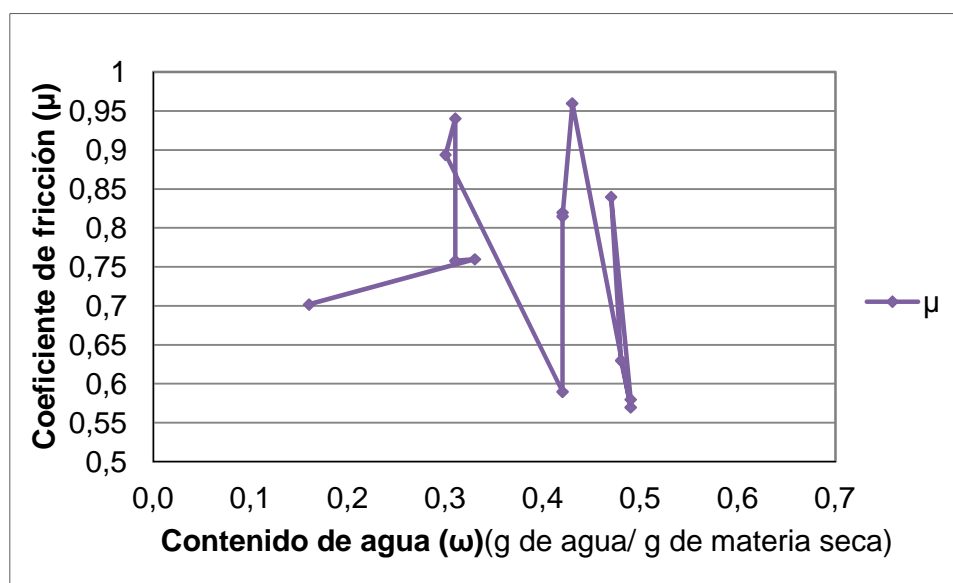


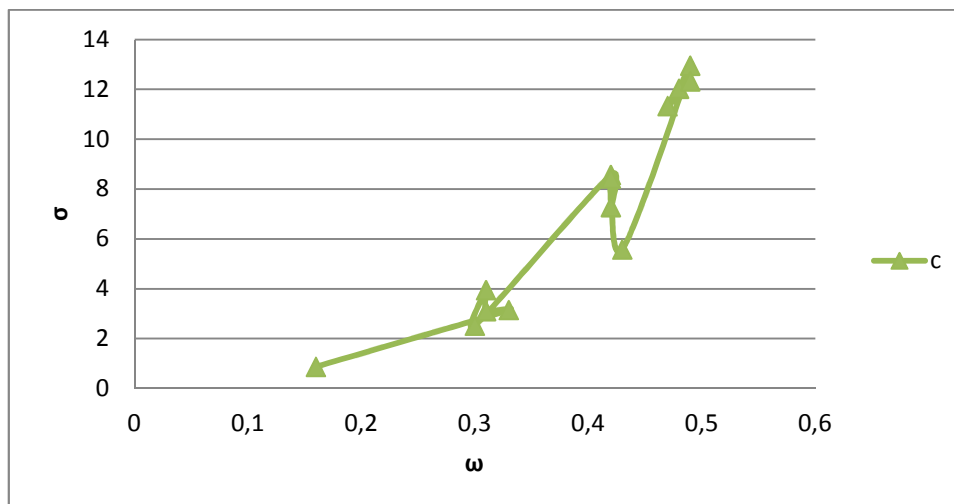
FIGURA 25. Cizallamiento en función de la tensión normal para proceso GDS

**CUADRO 12.** Valores de coeficientes de fricción y cohesión para PDH y GDS

PDH				GDS			
	$\omega$	$\mu$	c		$\omega$	$\mu$	C
Sémola	0,16	0,70	0,87	Sémola	0,16	0,70	0,87
30%	0,31	0,76	3,11	30%	0,31	0,94	3,95
40%	0,42	0,82	7,28	40%	0,42	0,82	8,43
50%	0,48	0,63	12,03	50%	0,47	0,84	11,33

En el caso del coeficiente de fricción, no se muestra ninguna tendencia, por lo que se infiere que no existe una relación con el contenido de agua, tal como se muestra en la FIGURA 26.

**FIGURA 26.** Coeficiente de fricción en función del contenido de agua.



**FIGURA 27.** Cohesión en función del contenido de agua.

### 3.6 Requerimientos energéticos

Del CUADRO 13, podemos destacar que en el proceso de adición de sólidos, la energía aumenta progresivamente a medida que el contenido de agua es mayor. Esto se debe a que para formar la masa de 75% se adiciona una cantidad mayor de sémola, haciendo mucho más difícil el movimiento de esta gran bola de sémola en el mezclador, en cambio para realizar los aglomerados con 30% de humedad en GDS, la cantidad de sémola que se adiciona después de la etapa intermedia es mucho mayor, haciendo más fácil la rotación de la pala del mezclador.

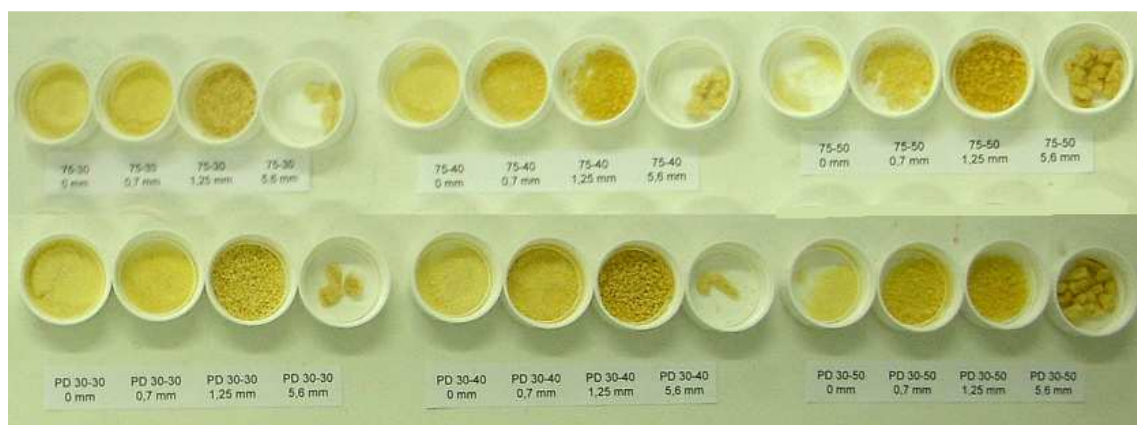
A diferencia del proceso GDS, el PDH no presenta una variación tan grande entre cada tratamiento, de hecho se mantiene prácticamente constante, esto puede deberse a que al hidratar con un flujo tan bajo, no genera grandes esfuerzos para el mezclador al tratar de mantener la misma fuerza durante todo el proceso, sin embargo podemos notar que disminuye un poco la energía al formar aglomerados de 50%, lo que podríamos atribuir que a medida que aumentamos su contenido de agua, disminuye la densidad de los aglomerados, facilitando su movimiento.

**CUADRO 13.** Requerimientos energéticos para procedimiento y tratamiento.

PDH				GDS			
	30	40	50		30	40	50
Potencia mediana estabilización (W)	44,81	43,35	41,92	Potencia mediana estabilización (W)	41,78	44,91	44,38
Potencia mediana hasta 2 minutos (W)	55,59	49,43	48,16	Potencia mediana hasta 2 minutos (W)	42,60	46,36	47,57
Energía de 0 a 2 min (J)	3335,69	2966,04	2889,72	Energía de 0 a 2 min (J)	2556,24	2781,36	2854,20
Energía de 2 a 12 min (J)	3623,91	3639,61	3473,08	Energía de 2 a 12 min (J)	4278,90	5543,19	7640,83

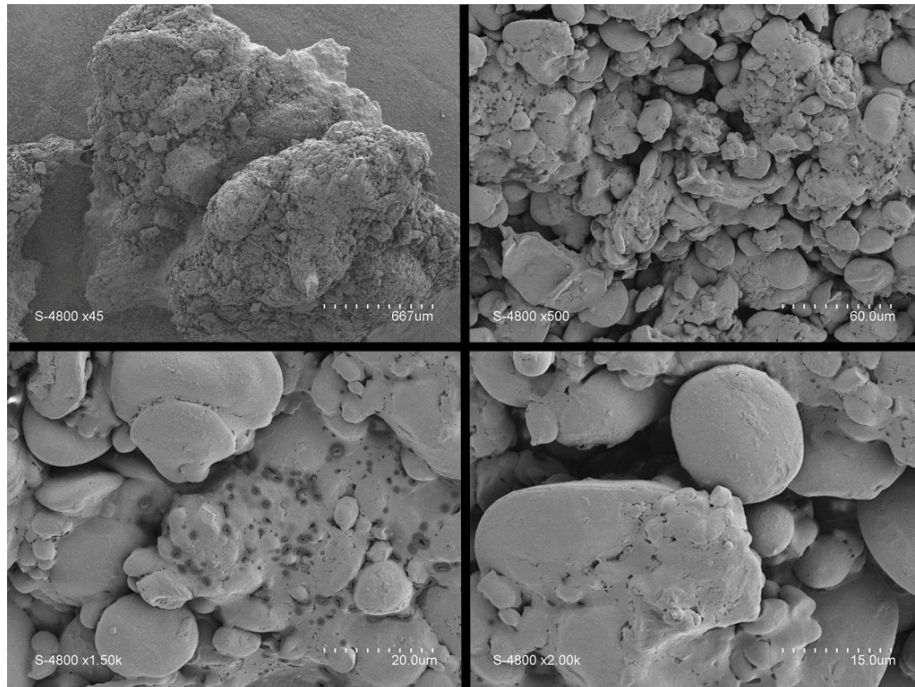
### 3.7 Observaciones en SEM y aglomerados secos

En la FIGURA 28 podemos apreciar las diferentes estructuras formadas en cada proceso y tratamiento, existen diferencias de color a medida que aumenta el contenido de agua. También cambian de forma según con el proceso con el que se trabaje, los aglomerados generados por sólo un bajo flujo de agua, tienen una forma más esférica, en cambio aquellos formados por un alto flujo de agua y la adición de sémola toman una forma más aplanada, lo que podría provocarse por el cizallamiento entre la sémola como partícula nativa con la masa de 75% de humedad en el mezclador.

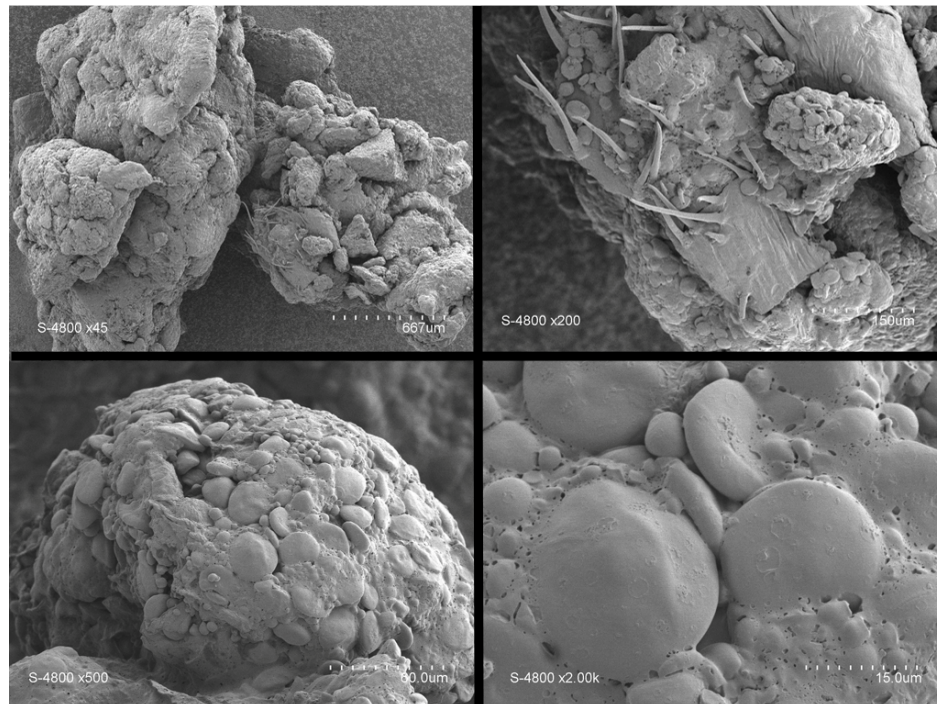
**FIGURA 28.** Fotografía comparativa de proceso PDH y GDS

Para las FIGURAS 29 a 34, las cuales corresponden a fotografías tomadas por el microscopio electrónico de barrido, se puede apreciar cómo a pesar de realizarse mediante diferentes procedimientos y a distintos contenidos de humedad conservan la estructura básica de un aglomerado, donde se pueden distinguir todas las microestructuras que lo componen, es decir, la unión de partículas de sémola y núcleos. Sin embargo, poseen formas distintas. Los aglomerados formados por PDH tienden a formar una estructura más esférica a medida que aumentan el porcentaje de

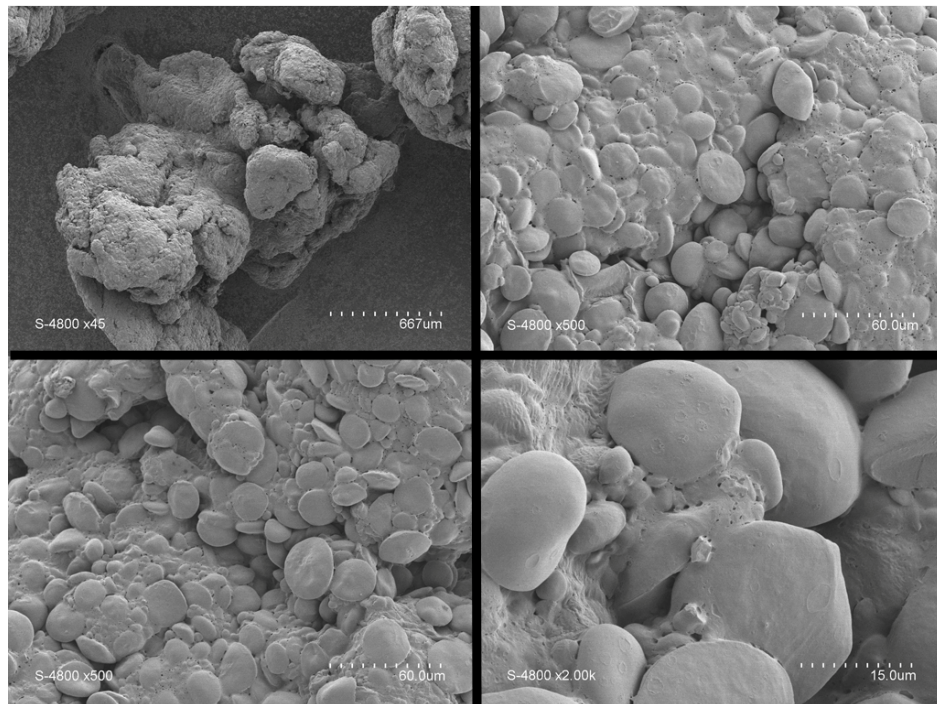
humedad, en cambio, los aglomerados elaborados por GDS, toman una forma redondeada un tanto aplastados.



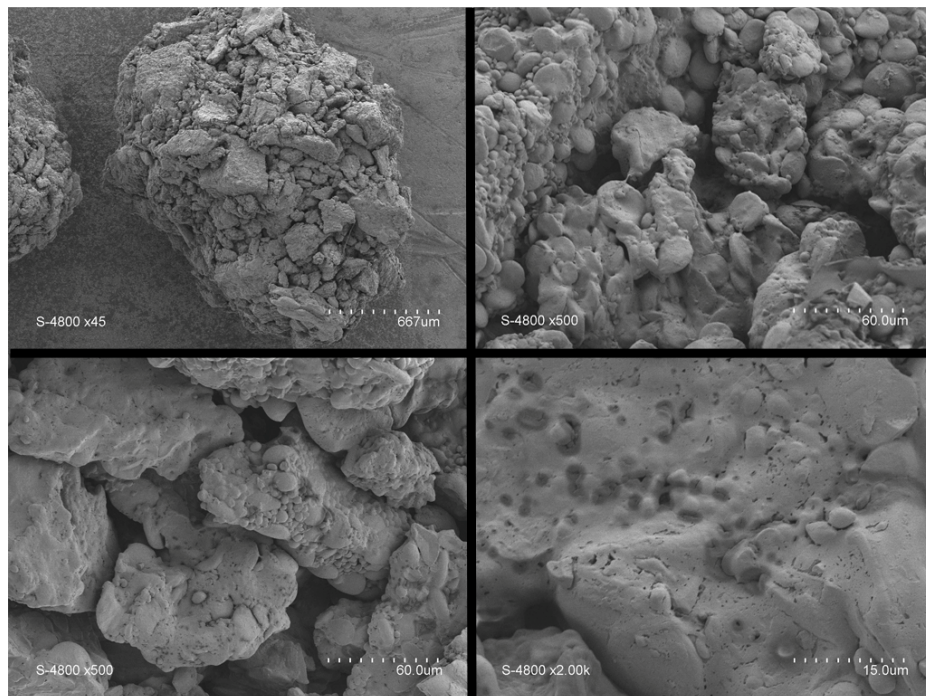
**FIGURA 29.** Aglomerados por GDS a 30% contenido de agua ( $1,25 < A < 2,00 \text{mm}$ )



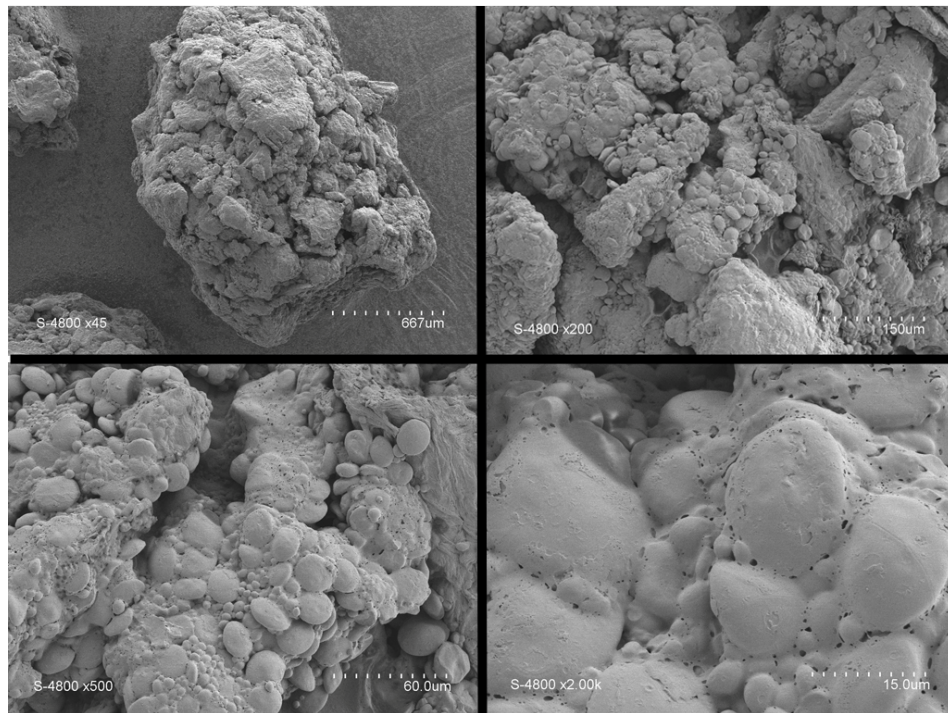
**FIGURA 30.** Aglomerados por GDS a 40% contenido de agua ( $1,25 < A < 2,00 \text{mm}$ )



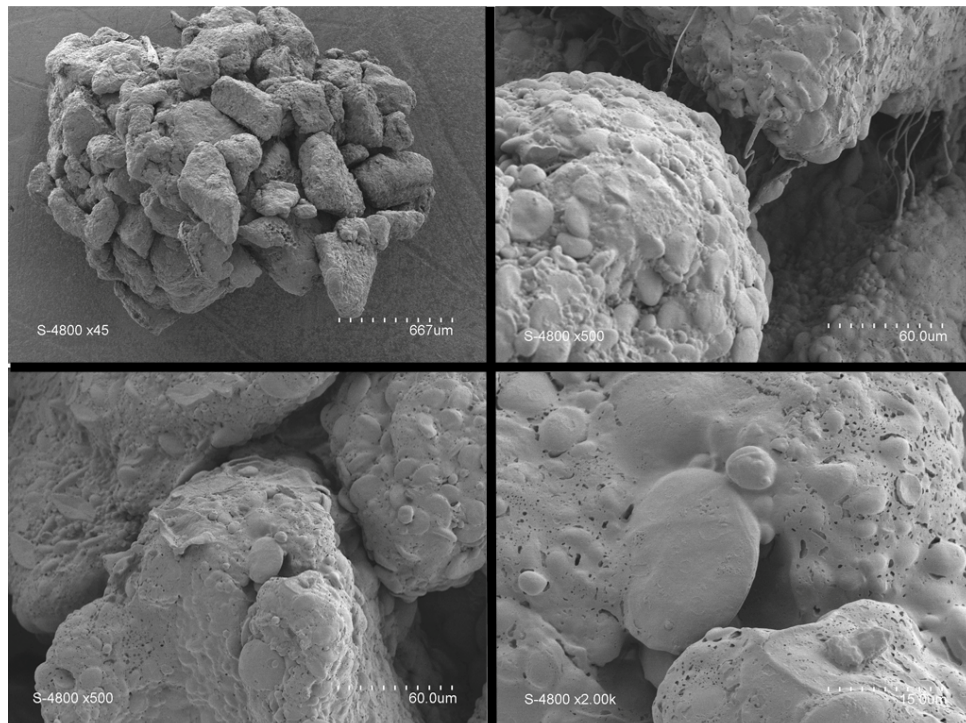
**FIGURA 31.** Aglomerados por GDS a 50% contenido de agua ( $1,25 < A < 2,00 \text{mm}$ )



**FIGURA 32.** Aglomerados por PDH a 30% contenido de agua ( $1,25 < A < 2,00 \text{mm}$ )



**FIGURA 33.** Aglomerados por PDH a 40% contenido de agua ( $1,25 < A < 2,00 \text{mm}$ )



**FIGURA 34.** Aglomerados por PDH a 50% contenido de agua ( $1,25 < A < 2,00 \text{mm}$ )

### 3.8 Análisis estadístico

De acuerdo con los análisis de varianza para cada variable de respuesta de los aglomerados, es decir, contenido de agua, densidad, volumen de la fracción sólida, coeficiente de fricción, cohesión, requerimientos energéticos de proceso y la distribución de talla, con un 95% de confianza, no existen diferencias significativas estadísticamente entre la combinación de los factores (proceso y nivel de humedad) para ninguno de los factores exceptuando los requerimientos energéticos, por lo que estadísticamente hablando el único criterio de elección para realizar un tipo de aglomerado u otro, será la cantidad de energía que se está dispuesto a utilizar en el proceso.

Las características de cada aglomerado varían también con el contenido de humedad, exceptuando su coeficiente de fricción y el requerimiento energético, los cuales no dependen de este factor.

Todo esto fue confirmado por el test de rango múltiple, método HSD de Tukey, tal como se muestra en la FIGURA 35

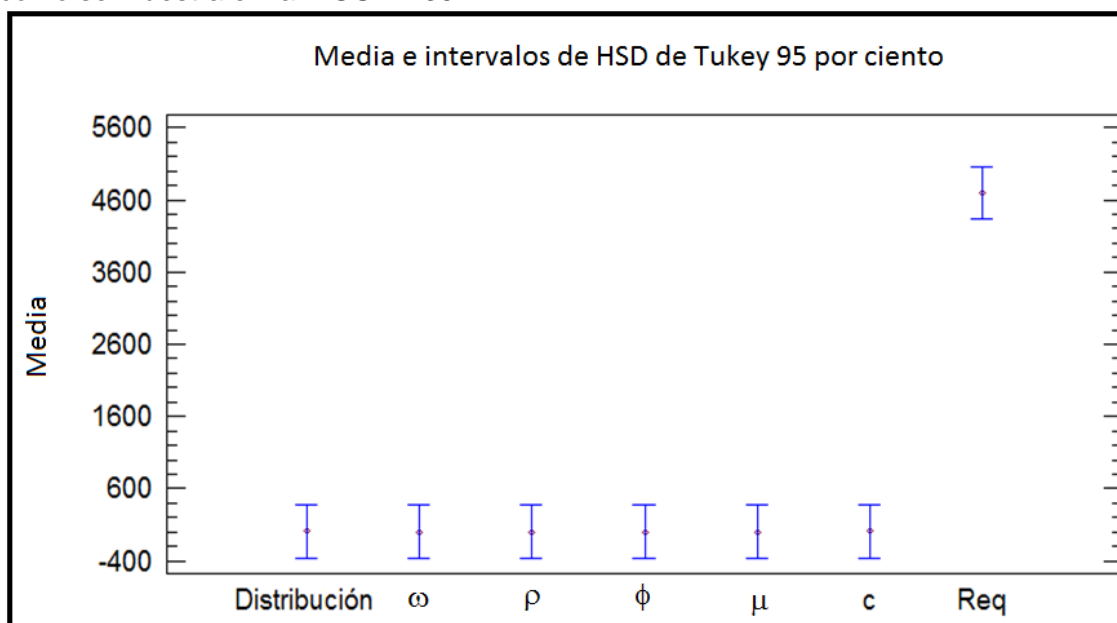


FIGURA 35. Gráfico test de rango múltiple de Tukey para las variables de respuesta.

## 4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mostraron que con un 95% de confianza, no existen diferencias significativas estadísticamente entre las variables de respuesta medidas en los procesos, exceptuando el requerimiento energético con mediciones como 3623, 3639 y 3473 W/h para el proceso PDH a 30, 40 y 50% respectivamente. Y para GDS 4278, 5543 y 7640 W/h para 30, 40 y 50% respectivamente. Estas diferencias significativas fueron corroboradas con el test de rango múltiple de tukey, lo que quiere decir que dependiendo a que contenido de agua final se desea llegar, se podría utilizar cualquiera de los dos procedimientos.

Sin embargo, existen diferencias cuando hablamos de aglomerados con diferente contenidos de humedad, esto puede deberse a que estas propiedades están directamente relacionadas con el contenido de humedad de estructuras resultantes.

Se observó mediante microscopio electrónico de barrido, que los aglomerados elaborados por los dos procesos tienen formas distintas, la forma y tendencia a formar estructuras esféricas obtenidas en hidrataciones de bajo flujo, se debe a que el tamaño de las gotas de agua son muy pequeñas, lo que hace que las partículas de sémola se adhieran de grupos más pequeños para formar los aglomerados. En cambio las estructuras producidas por GDS, debido a que se hidrató la sémola inicialmente al 75% de humedad, se forma una gran masa, que luego fue dispersando el agua entre las nuevas partículas de sémola adicionadas en la etapa final. Ellas, fueron adhiriéndose a esta gran masa y como su porcentaje de agua, es menor, el mezclador logró separarlas formando estructuras aplanadas.

Para las aptitudes de calidad de los aglomerados crudos, se puede establecer que el tratamiento PDH 40%, obtuvo un 43,70% aglomerados de 0,9 mm, siendo el tratamiento que mejor se comportó en cuanto a un tamaño más homogéneo y sin mayores variaciones del proceso PDH, con un diámetro promedio de partícula de 0,93 mm. En cuanto al proceso GDS, se obtuvo el 24,96% para los aglomerados de 2 mm del tratamiento a 50% de humedad. Con un diámetro promedio de partícula de 1,22 mm fue el más homogéneo y con menores variaciones, de los 3 tratamientos por GDS.

Para evaluar las características de calidad de los aglomerados como un nuevo producto, se necesita continuar los estudios, como se comportan a la cocción, conocer sus capacidades de absorción de agua y por supuesto evaluar las respuestas de los consumidores y de la industria con respecto a un nuevo formato de cuscús.

## 5 BIBLIOGRAFIA

- ABECASSIS, J., BOGGINI, G., CUQ, B., NAMOUNE, H. 2012. Other traditional durum derived Products. *In*: SISSONS, M.J., CARCEA, M., MARCHYLO, M., ABECASSIS, J. Durum wheat: Chemistry and Technology. 2da edición. AACC International. *In press*.
- BARKOUTI, 2012. Agglomération humide de poudres à réactivité de surface - Approche mécanistique de la morphogénèse de structures alimentaires agglomérées. Tesis de Doctorado. Ecole Doctorale: Sciences des Procédés-Sciences des Aliments. Université Montpellier II. 186p
- BENALI, M., GERBAUD, V., HEMATI, M. 2009. Effect of operating conditions and physico-chemical properties on the wet granulation kinetics in high shear mixer. *Powder Technology*. 190: 160- 169.
- CASTEL, B. 1996. Mise en forme des solides, Procédés et appareils. *In* : Techniques de l'Ingénieur, traité Opération unitaires, article J 3 382.
- CHARONNAT, Y., 1999. Fabrication du béton hydraulique. *In*: Techniques de l'Ingénieur. C 2 225.
- CHRISTELE-ICARD, V. 2000. De la semoule du blé dur aux pâtes alimentaires: évènements physiques et biochimiques. *Industries Agricoles et Alimentaires*. 117. 35-43. (Original no consultado)
- CODEX STANDARD 178, Norma del Codex para la sémola y la harina de trigo duro, 1991.
- DEMEYRE J.F., GATUMEL, H., BERTHIAUX, M., GRANDJEAN, M. 2007. Caractérisation de l'agitation de milieux granulaires en mélangeur TRIAXE. *Récents Progrès en Génie des Procédés*. 92. 8pp. (Original no consultado)
- ESTADOS UNIDOS, AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS. 2000. Official Methods of the AACC. Method 76-13. 10th ed. (Original no consultado).
- FREEMAN, R.E., COOKE, J.R., SCHNEIDER, L.C.R. 2009. Measuring shear properties and normal stresses generated within a rotational shear cell for consolidated and non- consolidated powders. *Powder Technology*. 190. 65-69.
- FREEMAN TECHNOLOGY. 2008. Manuales de uso reómetro FT<sub>4</sub>.
- HAPGOOD K.P., 2000. Nucleation and binder dispersion in wet granulation. Tesis de Doctorado. School of Engineering. University of Queensland.
- IVESON, S., LITSTER, J., HAPGOOD, K., ENNIS, B. 2001. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. 117. 3-39.
- KNIGHT, P., INSTONE, T., PEARSON J.M.K., HOUNSLOW, M.J. 1998. An investigation into the kinetic of liquid distribution and growth in high sear mixer agglomeration. *Powder Technology*. 97. 246-257.
- LITSTER, J.D., ENNIS, B.J. 2004. The Science and Engineering of Granulation Processes. Kluwer Powder Technology Series, B. Scarlett (ed.).

- LITSTER, J.D., HAPGOOD, K.P. MICHAELS, J.N., SIMS, A., ROBERTS, M., KAMENESI, S.K., HSU, T. 2001. Liquid distribution in wet granulation: dimensionless spray flux. *Powder Technology*. 114. 32-39.
- MANDATO, S. 2012. Génie des procédés d'agglomération de poudres alimentaires : éléments de phénoménologie des apports d'eau et d'énergie mécanique. Tesis de Doctorado. Ecole Doctorale: Sciences des Procédés- Sciences des Aliments. Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques. 256p
- MANDATO, S., TALIANI, C., ABDERRAHMANE, A.-K., RUIZ, T., CUQ, B. 2013. In-line monitoring of durum wheat semolina wet agglomeration by near infrared spectroscopy for different water supply conditions and water addition levels. *Journal of Food Engineering*. 119. 533-543.
- RONDET, E., DENAVAUT, M., MANDATO, S., DURI, A., RUIZ, T., CUQ, B. 2012. Power consumption profile analysis during wet agglomeration process: Energy approach of wheat powder agglomeration. *Powder Technology*. 229. 214-221.
- RONDET, E., RUIZ, T., CUQ, B. 2013. Rheological and mechanical characterization of wet agglomerates processed in low shear mixer. *Journal of Food Engineering*. 117. 67-73.
- RONDET, E. TURCHIULI, C., RUIZ, T., DELALONDE, M. 2013. Mécanismes d'agglomération humide de poudres alimentaires en lit fluidisé et mélangeur à faible cisaillement. 8p
- SALEH, K. Y GUIGON, P. 2009. Mise en œuvre des poudres. *Techniques de granulation humide et liants. Techniques de l'ingénieur* article J2254.
- SASTRY, K.V.S. Y FUERSTENAU, D.W. 1973. Mechanisms of agglomerate growth in green pelletization. *Powder Technology*. 7. 97-105. (Original no consultado).