



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

EFFECTO DE COADYUVANTES Y CONDICIONES DE PROCESO EN
LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE COMPACTADOS DE CAFÉ SOLUBLE.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

GEORGINA ISABEL COLÍN ENRÍQUEZ

ASESORES: IBQ. NORMA BEATRIZ CASAS ALENCÁSTER
MI. FERNANDO BERISTAIN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a:

Dios Padre:

Gracias te sean dadas, Señor de la paz y de la vida, por habernos regalado tu perdón, hacernos amados y predilectos tuyos, dándonos siempre lo mejor según tu voluntad.

Mamá:

Amiga, luz y calor de mi ser, por entregarme sin límites su amor, bondad, compañía y comprensión; por su inagotable entusiasmo, aliento y apoyo que hicieron posible la culminación de la carrera y de la presente; por instruirme con toda su sabiduría y gracia, acompañarme en mis triunfos y fracasos, enseñarme a ver lo mejor de las personas, mostrarme las opciones y la libertad, pero sobretodo, gracias muchas gracias por enseñarme a tener fe y amar a Dios.

Moisés Escalona:

Pareja, compañero, amigo y confidente, por su valiosa presencia agraciada de intelecto y cualidades; por enseñarme a luchar y ser fuerte, por su compañía y motivación durante toda la carrera y en este proyecto, por ser parte de mis triunfos y fracasos, por brindarme convicción para alcanzar todos mis ideales, simplemente gracias por la felicidad y amor que hemos compartido, *con el corazón*.

Papá:

Por su cariño, conocimientos y educación, como ejemplo en buscar la mejor forma de hacer cada uno de los planes que te propongas, por ser modelo de lo recto y de la realidad para forjar valores que concluyen la edificación personal.

Lydia Colín y Humberto Colín:

Licenciada e Ingeniero, hermanos y amigos, por su respeto, cariño y bondad, por su apoyo y comprensión brindados en el presente proyecto y de antemano en los subsiguientes, además, de su ejemplo en aspirar y alcanzar grandes metas.

IBQ. Norma B. Casas Alencáster:

Amiga y asesora de este proyecto, por su paciencia, colaboración, enseñanzas y valiosas orientaciones para la ejecución de la presente.

MI. Fernando Beristain:

Coasesor de este proyecto, por su disposición, respaldo y orientación durante el desarrollo de la presente.

IA. Alfredo Álvarez Cárdenas, IA. Edith Fuentes Romero, y a la Doctora Patricia Martínez Padilla:

Por su orientación, estímulo y enseñanzas para permitir que este logro se hiciera realidad.

Mis amigas Ivonne Rosas, Vanessa Cárdenas e Ingrid De la Mora:

Por su amistad, compañía y todos los momentos buenos y malos, divertidos, agobiantes, emotivos, etc., durante toda la carrera.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de las condiciones de proceso, la concentración de coadyuvantes y el tipo de café soluble sobre las propiedades físicas y mecánicas de compactados de café para preparar una bebida instantánea, y la influencia sobre las propiedades físicas de las mezclas de material particulado para la obtención de los compactados.

Utilizando un Diseño Taguchi L27 (3**) se estudió el efecto de: presión de compactación (1.5, 2.5 y 3.5 kg/cm²), tiempo de compresión (1.5, 2 y 2.5 minutos), tipo de café (secado por aspersion aglomerado, secado por aspersion fino y liofilizado), concentración de dextrosa anhidra (8, 16 y 20%) como aglutinante y jarabe de sorbitol al 70% (0.9, 2.7 y 4.5%) como lubricante y humectante.

La compactación se efectuó por compresión con aire y empleando un molde y punzón diseñados para tal fin. La distribución de tamaño de partícula de las mezclas se determinó por tamizado; la compresibilidad de las mezclas y las propiedades mecánicas de los compactados se evaluaron con un texturómetro Texture Analyser, TAXT2i, calculando la fuerza para comprimir la mezcla, la fuerza y distancia a la que se fracturaron los compactados; el color se midió en un colorímetro Minolta CR 300, obteniendo Luminosidad (L) y tono; la solubilidad se determinó con el tiempo en que se disolvían completamente los compactados en agua a 86 °C ±2, con agitación mecánica controlada.

El factor de variación con mayor influencia sobre las propiedades físicas tanto de las mezclas como de los compactados, fue la concentración de sorbitol. Asimismo, con la mayor concentración de este coadyuvante y en mezcla con el café obtenido por aspersion fino, se obtuvieron aglomerados con mayor tamaño de partícula, dando como resultado, mezclas más compresibles, compactados con la mayor resistencia mecánica, atractivo tono café oscuro (rojizo) y un tiempo de disolución de 11 a 15 segundos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	x
CAPÍTULO I	
ANTECEDENTES	
1.1 Café	1
1.1.1 Tratamientos post-cosecha	2
1.1.2 Café soluble	5
1.1.2.1 Tipos de proceso y propiedades físicas	7
1.2 Compresión de polvos	10
1.2.1 Clasificación de métodos de compactación	10
1.2.2 Equipos de compresión	13
1.2.3 Tipos de productos compactados o presentados en comprimidos	15
1.3 Funcionalidad de los coadyuvantes para la compactación de polvos	16
1.3.1 Diluyentes	18
1.3.2 Aglutinantes	18
1.3.3 Deslizantes	19
1.3.4 Lubricantes	19
1.3.5 Desintegrantes	20
1.3.6 Humidificantes	20
1.3.7 Colorantes	20
1.3.8 Saborizantes	20
1.3.9 Sorbitol líquido al 70% como coadyuvante de compresión	21
1.3.10 Dextrosa anhidra como coadyuvante de compresión	21
1.3.11 Fuerzas de asociación intermolecular en líquidos y sólidos	22
1.4 Influencia de las propiedades físicas de los polvos en la compactación	25
1.4.1 Tamaño de partícula	25
1.4.2 Densidad global y contenido de humedad de los polvos	26
1.5 Propiedades físicas y de solubilidad de los compactados	27
1.5.1 Densidad	27
1.5.2 Dureza y cohesión	27
1.5.3 Solubilidad	28
1.6 Relación entre las propiedades físicas de los polvos y las propiedades de los compactados	29

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1	Objetivos	31
2.2	Justificación	32
2.3	Materiales y métodos	32
2.3.1	Materiales	32
2.3.2	Diseño experimental	33
2.3.3	Formulación de mezclas	33
2.3.4	Preparación de mezclas	33
2.3.5	Caracterización de las mezclas para desarrollar compactados de café soluble	35
2.3.6	Compactación de las mezclas para obtener los compactados de café soluble	40
2.3.7	Propiedades físicas y de solubilidad de los compactados de café soluble ...	41

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1	Caracterización de las mezclas para desarrollar compactados de café soluble .	50
3.1.1	Densidad global de las mezclas	51
3.1.2	Distribución de tamaño de partícula de las mezclas	52
3.1.3	Contenido de humedad	54
3.1.4	Compactabilidad	55
3.1.5	Resistencia a la compactación	58
3.1.6	Trabajo de compactación	58
3.2	Propiedades físicas y de solubilidad de los compactados de café soluble	59
3.2.1	Densidad	60
3.2.2	Color	61
3.2.3	Dureza	63
3.2.4	Resistencia a la fractura, fracturabilidad y trabajo de compresión	65
3.2.5	Solubilidad	67
3.3	Relaciones entre las propiedades físicas de las mezclas y de los compactados.	68
	CONCLUSIONES	74
	RECOMENDACIONES	78
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

APÉNDICE

GLOSARIO

ÍNDICE DE TABLAS

1. Obtención del café para los procesos de solubilización	6
2. Especificaciones del café puro soluble sin descafeinar	6
3. Coadyuvantes para la compactación de polvos	17
4. Fuerzas intermoleculares en líquidos y sólidos	25

ÍNDICE DE CUADROS

1. Formulaciones a evaluar obtenidas del Diseño Taguchi L27 (3**)	34
2. Coeficientes de variación (%) de las propiedades físicas y solubilidad	47
3. Valores promedios de las propiedades físicas de las mezclas	48
4. Valores promedios de las propiedades físicas y solubilidad de los compactados de café	49
5. Análisis de varianza de las mezclas, porcentaje de influencia de los factores de variación	50
6. Densidades globales, humedades y distribución de tamaño de partícula experimentales de los tipos de café solos	52
7. Análisis de varianza de los compactados de café soluble, porcentaje de influencia de los factores de variación	60

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Cereza de café madura	1
2. Estructura interna de una cereza de café	2
3. Tratamientos post-cosecha del café	4
4. Procesos para la obtención de café soluble	7
5. Punzones inferior, superior y matriz como unidades mecánicas básicas para la compresión de compactados	13
6. Punzón simple	14
7. Punzones de la máquina rotativa	14
8. Máquina rotativa de alta velocidad	14
9. Molécula de sorbitol	21
10. Molécula de D- y L-glucosa	22
11. Acoplamiento para la prueba de densidad global por compactación de las mezclas	35
12. Agitador de tamices con acoplamiento para la prueba de distribución del tamaño de partícula de las mezclas	36

13. Analizador de humedad MB45 OHAUS®	37
14 a) Vista superior del molde de acero inoxidable	38
14 b) Colocación del molde en el texturómetro	38
14 c) Punzón	38
14 d) Prueba de compactación	39
15. Curva modelo fuerza - distancia en prueba de compactabilidad	39
16. Máquina de compactación para el desarrollo de compactados de café soluble	40
17. Interior de la estufa de circulación de aire ELISA®	41
18. Dimensiones para el cálculo de volumen	42
19. Colorímetro Minolta CR300	43
20. Espacio de color CIE L^* , a^* , b^*	43
21. Caras de un compactado de café	43
22. Curva modelo fuerza - distancia en prueba de compresión de compactados de café soluble	44
23. Prueba de disolución	46
24. Efecto del sorbitol y del tipo de café soluble sobre la densidad global de las mezclas	52
25. Efecto del sorbitol y del tipo de café soluble sobre el diámetro promedio	53
26. Efecto de los coadyuvantes de compresión y del tipo de café soluble sobre la humedad de las mezclas	54
27. Efecto del sorbitol y del tipo de café soluble sobre la compactabilidad de las mezclas	56
28. Curvas de compactación de las mezclas con la mayor y menor fuerza de compactabilidad	57
29. Efecto de los coadyuvantes de compresión sobre la resistencia de las mezclas	58
30. Efecto del tipo de café soluble y del sorbitol sobre el trabajo de compactación de las mezclas	59
31. Efecto del tipo de café soluble y de la presión de compactación sobre la densidad de los compactados de café soluble	61
32. Efecto del tipo de café soluble y de la dextrosa sobre el color (L) de los compactados de café soluble	62
33. Efecto del tipo de café soluble y del sorbitol sobre el color (h) de los compactados de café soluble	62
34. Efecto del sorbitol, presión de compactación y del tipo de café soluble sobre la dureza de los compactados de café soluble	64
35. Curvas de compresión obtenidas para los compactados con mayor y menor dureza	65
36. Efecto del sorbitol sobre la resistencia a la fractura de los compactados de café soluble	66
37. Efecto del sorbitol y de la presión de compactación sobre la fracturabilidad	

de los compactados de café soluble	66
38. Efecto del sorbitol, presión de compactación y del tipo de café soluble sobre el trabajo de compresión de los compactados de café soluble	66
39. Efecto del sorbitol sobre la solubilidad de los compactados de café soluble	68
40. Efecto del sorbitol sobre la dureza de los compactados, densidad global y compactabilidad de las mezclas	69
41. Efecto del tipo de café sobre la dureza de los compactados, densidad global y compactabilidad de las mezclas	70
42. Efecto del sorbitol sobre la compactabilidad de las mezclas, dureza y densidad de los compactados	70
43. Efecto del sorbitol sobre la dureza de los compactados, θ_{promedio} y compactabilidad de las mezclas	71
44. Efecto del tipo de café sobre la dureza de los compactados, θ_{promedio} y compactabilidad de las mezclas	72
45. Efecto del sorbitol y tipo de café sobre la dureza y solubilidad de los compactados	73

NOMENCLATURA

$F_{\text{máx.}}$	Fuerza máxima (m kg/s^2)
d	Distancia (mm)
ρ	Densidad (kg/m^3)
θ_{promedio}	Diámetro promedio (mm)
L	longitud (cm)
l	largo (cm)
a	ancho (cm)
V	Volumen (cm^3)
V_i	Volumen inicial (cm^3)
V_c	Volumen compactado (cm^3)
L	Luminosidad
h	Tono
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage (Comisión Internacional de Iluminación)

INTRODUCCIÓN

El consumo del café como bebida instantánea es una práctica arraigada en nuestra sociedad en general; tiene un gran auge y demanda por su cómodo y rápido empleo. En la actualidad, existen diferentes presentaciones de café soluble en polvo con gran aceptación, algunos ejemplos son: café soluble puro, sin cafeína, combinaciones de café con leche y azúcar, y cappuccino (original, moka y vainilla); ofrecidos al consumidor en frascos de vidrio, cajas con sobres y latas. Todas las presentaciones tienen la versatilidad de prepararse en agua ó leche, ya sea caliente, fría o congelada.

Para que una taza de café proporcione placer y satisfacción al consumidor debe tener buen sabor, pero además, atracción por parte del producto y practicidad en su forma de preparación, motivo por el cual se busca la manera de proponer novedades, tal es el caso de la gama de presentaciones del café soluble. En este trabajo, se presenta el café soluble en forma de compactados, ofreciendo un producto con las propiedades mecánicas que permitan su fácil manejo y una adecuada solubilidad para preparar una bebida instantánea.

La elaboración de productos compactados a partir de mezclas de materiales particulados, presenta cierto grado de complejidad, por lo que es fundamental el conocimiento de los factores que influyen para la obtención de un producto de calidad, tales como: tipo de proceso, condiciones de proceso (tiempo y presión de compactación), las características físicas de los materiales particulados (tamaño de partícula, densidad global, humedad y compactabilidad), y la selección de los coadyuvantes adecuados.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Café

Es una semilla procedente del árbol del cafeto, perteneciente a la familia de las rubiáceas y al género *coffea*. Los cafetos cultivados en el mundo a nivel industrial son de la especie *coffea arábica* y *coffea canephora*. El café crece de manera apropiada en una zona tórrida en lugares que reúnen condiciones especiales de suelo, temperatura, altitud, y radiación solar. Los suelos ricos en materia orgánica con profundidades de 80 cm, para la penetración de las raíces, son ideales para el café. El café se desarrolla en el curso de 32 semanas, iniciando con una flor blanca en el cafeto, que da lugar a un fruto pequeño (cereza) verde claro que cambia a rojo oscuro o amarillo según la variedad, color con el cual se le considera maduro y listo para ser recolectado (Figura 1).



Figura 1. Cereza de café madura (www.cafedecolombia.com, 2010).

Las especies más importantes del café son (Prieto, 2002; Coronel, 2010):

- **Café Arábica:** aunque se cultiva en todo el mundo, el de mejor calidad es de las zonas montañosas; las cerezas de café son voluminosas y alargadas, de coloración verde, verde - azulado o verde pálido. Dentro de este género existen las variedades: moka, típica, caturra, catuai, kent, amarella y maragogipe.
- **Café Canephora o Robusta:** cultivado en zonas de baja altitud, las cerezas de café son pequeñas y producen una bebida menos aromática, el haba es más corta y redonda, de color grisáceo.

1.1.1 Tratamientos post-cosecha. Los tratamientos post-cosecha varían según el país, tiempo de cultivo y especie de café, comúnmente son conocidos como beneficio y secado. La importancia de estos procesos es separar el mesocarpio del endocarpio, por lo que es recomendable conocer las partes que conforman una cereza de café: la Figura 2 indica la estructura interna, donde se observa que la pulpa (mesocarpio) de la cereza es de naturaleza mucilaginosa y está circundada por una piel (exocarpio); el mesocarpio contiene normalmente dos semillas envueltas por una membrana plateada, cubierta a su vez, por una capa de coloración amarilla llamada pergamino o endocarpio (cafedecolombia, 2010).

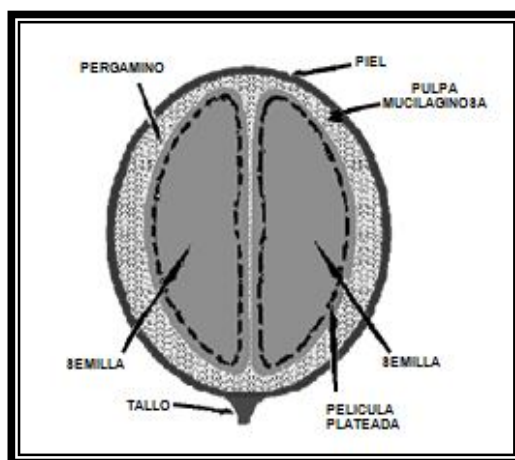


Figura 2. Estructura interna de una cereza de café (Prieto, 2002).

Los tratamientos más utilizados son el beneficio húmedo y seco (Figura 3), consisten en transformar la cereza en un producto seco, posteriormente, pasa por la operación de trilla para obtener el café verde o almendra, el cual es exportado o procesado. Este café verde es el insumo para la elaboración del café tostado, del café soluble y de los extractos de café, y se caracteriza por su color verde, olor característico de café fresco y una humedad promedio entre 10 y 12% (cafedecolombia, 2010). A continuación una breve descripción de los beneficios.

Beneficio seco

El grano se cosecha e inmediatamente se somete al secado. Inicia con la recolección de las cerezas que comienzan a secarse en el propio cafeto con un contenido de humedad de 60 a 65%. Dependiendo del clima, el secado al aire o natural, puede durar entre dos y cuatro semanas. En algunas zonas productoras es necesario el uso de secadores dinámicos, para un mejor manejo y eficiencia del equipo, se sugiere reducir el contenido de humedad hasta un 30 y 35% a través de un presecado al sol. El secado se debe interrumpir cuando el grano haya alcanzado un 12% de humedad, condición en la cual se somete a la operación de trilla para separar la pulpa seca y el pergamino, obteniendo así el café verde. Finalmente, son clasificados según su tamaño, peso y calidad (Prieto, 2002; cafedecolombia, 2010).

Beneficio húmedo

Las cerezas de café son medidas y seleccionadas previamente, con base en su índice de frescura y calidad, retirando frutos verdes, pintones, secos, quemados y sobremaduros; posteriormente, el primer paso del beneficio es separar del café los elementos pesados (piedras, arena, etc.) por medio de canaletas y los elementos livianos (ramas, hojas, etc.) por sifones con agua; en seguida, se retiran los frutos verdes remanentes con las separadoras de verdes que empujan el café desde el centro de un cilindro con rejillas calibradas hacia afuera, el café maduro que es blando y elástico pasa por las rejillas pero el verde es empujado hacia los extremos.

Las cerezas de café maduro son despulpadas mediante máquinas que funcionan con base en la presión y la fricción que se ejerce sobre las cerezas por medio de una superficie fija y otra móvil. El despulpado debe realizarse en un máximo de ocho horas después de la recolección, en caso de que se retrase, el grano se fermenta produciendo un sabor vinagre. Posteriormente se retira el mucílago (miel, goma o baba) por medio de la fermentación del grano en tanques de fermentación o por medios mecánicos (desmucilaginosos). La descomposición puede durar entre 12 y 30 horas, dependiendo de la temperatura del lugar (zonas más frías requieren mayor tiempo de fermentación), diseño de los tanques, calidad del agua y madurez del café. El grano se lava para eliminar totalmente el mucílago y se seca natural o mecánicamente hasta obtener un grano de humedad final del 10 al 12% conocido como café pergamino. Luego se pasa por el proceso de trilla para retirar el pergamino, el café verde obtenido se selecciona y clasifica por su tamaño, peso, color y apariencia física (Prieto, 2002; cafedecolombia, 2010).

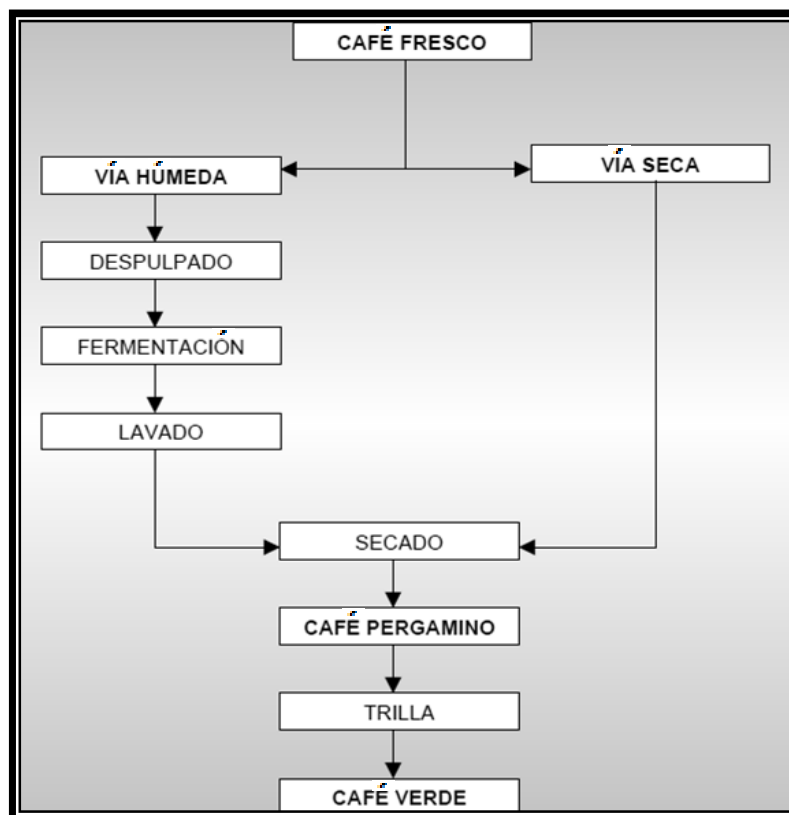


Figura 3. Tratamientos post-cosecha del café (Prieto, 2002).

Los tipos de café industrializados para su comercialización, corresponden a (Prieto, 2002; cafedecolombia, 2010):

- **Café verde o crudo.** La cereza de café madura se somete al beneficio para separar el mesocarpio del endocarpio, y por medio de la trilla, el pergamino, quedando así la almendra únicamente.

- **Café tostado.** El café verde se somete a condiciones de temperatura y tiempo para producir cambios en la estructura y composición del grano desarrollando el sabor y aroma característicos del café tostado.

- **Café tostado y molido.** La molienda es necesaria para la extracción de componentes solubles y volátiles del café tostado. Para obtener un porcentaje alto de extracción se necesita una molienda muy fina con poca cantidad de agua o una molienda gruesa en mayor cantidad de líquido y con temperatura y presión más elevadas.

- **Café descafeinado.** Después del proceso de descafeinado, el café tiene un contenido de cafeína menor a 0.1% máximo para tostados y 0.3% para solubles. Las técnicas utilizadas usan solventes como el cloruro de metilo, el acetato de etilo, o inclusive agua en conjunto con un adsorbente como el carbón activado.

- **Café soluble atomizado**
- **Café soluble aglomerado**
- **Café soluble liofilizado**

1.1.2 Café soluble. La fácil preparación del café soluble ha conseguido que sea un producto muy atractivo para los consumidores. Son sólidos obtenidos del extracto líquido del café puro tostado, usualmente por percolación, que posteriormente se deshidratan mediante diferentes procesos con el fin de obtener el polvo que contiene los principios solubles, sápidos y aromáticos del café, utilizando métodos físicos y agua como agente extractor y único componente que no es derivado del café. En la Tabla 1 se describe el proceso de obtención del extracto líquido concentrado para producir los diferentes tipos de café soluble. De acuerdo a su proceso de obtención y para su comercialización, el café soluble se puede presentar atomizado, aglomerado y liofilizado. Algunas especificaciones del café soluble se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. *Obtención del café para los procesos de solubilización* (www.cafeelcafe.com, 2010; www.cafedecolombia.com, 2010; Merchán et al., 2009).

Clasificación	El grano de café verde se separa por su tamaño, forma y peso.
Limpieza	Extracción de materia extraña.
Almacenamiento	Por variedad de café Arábica y Robusta.
Tostado y molienda	<ul style="list-style-type: none"> • Los granos son expuestos a temperaturas entre 180 y 240 °C. El tiempo de tostado y el color dependen de la temperatura, diseño del tostador industrial y el tipo de café. • En la molienda influye la calidad y punto de tosti3n del café. El tamaño de las partículas obtenidas dependen del tipo de molino, cuchillas (c3nicas o redondas) y de la preparaci3n posterior del café, oscilan desde un polvo muy fino hasta gránulos gruesos para la extracci3n a nivel industrial.
Extracci3n	Mediante un flujo de agua a presi3n y temperatura elevada se extraen los s3lidos solubles a los granos molidos.
Filtraci3n y Centrifugaci3n	El líquido obtenido (extracto) del proceso anterior, se filtra y posteriormente se centrifuga para eliminar residuos s3lidos.
Concentraci3n o Crio-concentraci3n	<p>Los métodos más utilizados para reducir el contenido de agua (utilizada en la extracci3n) en el extracto de café son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Concentraci3n: el sistema más utilizado es la evaporaci3n realizada al vaci3o a 45 °C. • Crio-concentraci3n: el extracto se enfría por debajo de 0 °C, al retirar los cristales de hielo el extracto queda concentrado.
Filtraci3n	Eliminaci3n de impurezas. El líquido obtenido se le denomina extracto líquido concentrado de café.
Secado	<ul style="list-style-type: none"> • Café soluble por aspersi3n ó atomizaci3n • Café soluble aglomerado • Café soluble liofilizado

Tabla 2. *Especificaciones del café puro soluble sin descafeinar* (NMX-F-139-SCFI-2004).

Parámetro	Especificaci3n
pH (soluci3n al 1%)	4.2 – 5.5
Humedad, máximo	5 %
Cenizas, máximo	11.0 % b.h.
Cafeína: Soluble sin descafeinar, mínimo	1.8 % b.s.
Almidones (prueba de lugol)	Negativo
Glucosa total, máximo	2.6 % b. s.
Xilosa total, máximo	0.6% b.s.
Fructosa libre, máximo	1.0 % b. s.

1.1.2.1 Tipos de proceso y propiedades físicas. Cualquier proceso para la transformación del extracto del café puro tostado a café soluble en polvo (Figura 4), influye notablemente en sus propiedades físicas, es por ello que se menciona en cada proceso las propiedades obtenidas con cada uno.

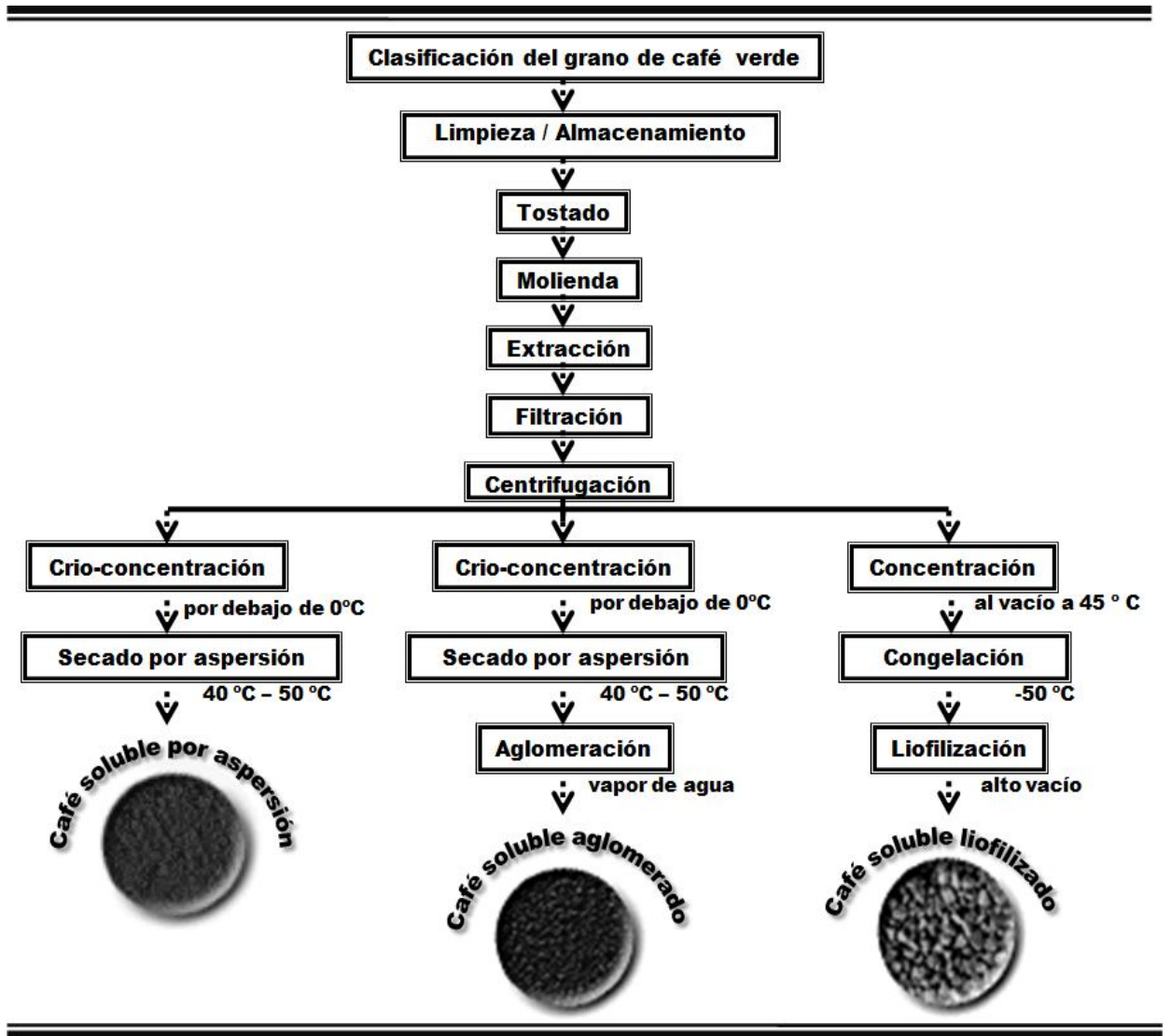


Figura 4. Procesos para la obtención de café soluble (www.cafeelcafe.com, 2010; www.cafedecolombia.com, 2010).

- Secado por aspersión o atomización

Se parte del extracto líquido concentrado de café con una concentración de 20 a 26 °Brix, el cual se inyecta en una torre de secado, con una superficie de transferencia de calor grande, en donde una niebla del producto se forma y pequeñas gotas caen, simultáneamente se hace contacto con un flujo de aire caliente en contracorriente a temperaturas entre 40 y 50 °C. El contacto entre el aire caliente y las pequeñas gotas del extracto, resulta en la evaporación del contenido de agua residual, transformando así las gotas del líquido en polvo fino de café, en seguida se recoge en el fondo cónico del secador en recipientes de acero inoxidable para su posterior envasado (Cafeelcafe, 2010; López, 2009). Como producto final se obtiene el polvo de café instantáneo provisto de características, tales como: mayor uniformidad de las partículas y facilidad para disolverlas (Lannes y Medeiros, 2003; Hegenbart, 1991).

- Aglomeración

Las pequeñas partículas de polvo de café instantáneo obtenidas por aspersión, se ponen en contacto con vapor de agua, consiguiendo que las partículas se fusionen formando estructuras aglomeradas del producto; con la aglomeración de polvo con partículas de alrededor de 100 micras se logra conseguir partículas de varios milímetros de diámetro. Después, el café aglomerado se separa de acuerdo al tamaño de los gránulos y se empaca (Cafeelcafe, 2010; Barletta, 1993); con éste método se logran gránulos con mejor humectabilidad, y se evita la formación de terrones (Mullier et al., 1991). Asimismo, los lechos de aglomerado tienen mayor fluidez, homogeneidad y apariencia, más resistencia a la segregación y mejores propiedades instantáneas (Alvarado y Aguilera, 2001). Los aglomerados son menos duros y tienen menor resistencia mecánica, normalmente son quebradizos y se rompen fácilmente cuando son expuestos a impactos mecánicos o a vibración durante el procesamiento o transporte. La energía cinética que se genera debido a la compresión mecánica o a la vibración, provoca colisiones entre aglomerados y éstos contra las paredes de los contenedores, causando atrición y compactación (Alvarado y Aguilera, 2001).

- Liofilización

El extracto líquido concentrado de café con una concentración de 20 a 26 °Brix, se conduce por tuberías hacia el área de liofilizado donde por medio de bandas de acero es depositado en el túnel de enfriamiento, el cual, con una temperatura de -50 °C y después de 30 minutos logra congelar el extracto de café hasta su solidificación total, la pasta congelada se muele y posteriormente se somete a condiciones de alto vacío (de menos de una milésima de la presión atmosférica) y a suaves perfiles de calentamiento, con lo cual, los cristales de hielo se subliman directamente en forma de vapor. Los gránulos de café se deshidratan y alcanzan la temperatura ambiente fijada. Una vez terminado el proceso de liofilización, se rompe el vacío y se permite la entrada de nitrógeno seco, el producto se saca y se transfiere rápidamente a una habitación con baja humedad para su posterior envasado. La molienda de la pasta congelada facilita el secado y la obtención de la presentación final del producto. El resultado final es un café de alta solubilidad, mejores propiedades organolépticas como un gran sabor y mayor conservación del aroma, además de otros componentes volátiles; sin embargo, la liofilización es una forma de deshidratación de alimentos bastante costosa, hasta cuatro veces más que el secado convencional, debido a la velocidad lenta de secado y a la necesidad de usar vacío (Cafeelcafe, 2009; Ramírez, 2006).

En general, un polvo instantáneo debe tener las siguientes características principales:

- Capacidad de mojado, habilidad del polvo para ser penetrado por el líquido.
- Dispersibilidad, dispersión de los polvos con un pequeño mezclado.
- Solubilidad, solución de partículas en el líquido.

La disolución (bebida) de cualquier tipo de café soluble, ocurre al disolver el café soluble en agua a temperatura mayor a la del medio ambiente y menor a la de su punto de ebullición (NMX-F-139-SCFI-2004).

1.2 Compresión de polvos

La modalidad de presentar los productos de polvo en comprimidos, podría representar una forma atractiva para el consumidor por ser un producto novedoso y práctico en su manejo. Sin embargo, se debe considerar que en la elaboración de productos a partir de mezclas de polvos, es fundamental el conocimiento de las propiedades físicas y el control del proceso, para garantizar un producto de calidad (Alvarado y Aguilera, 2001).

Los compactados o comprimidos se forman por compresión de polvos, solos o en combinación con coadyuvantes. La física de la compactación de los polvos, puede ser expresada como la compresión y consolidación de un sistema de dos o más fases sólido-gas debido a la fuerza aplicada. El término compresión significa una reducción del volumen total del material como resultado del desplazamiento de la fase gaseosa. La consolidación es un aumento en la fuerza mecánica del material, resultante de las interacciones partícula-partícula (Lachman et al., 1986; Lannes y Medeiros, 2003). En el proceso de compactación existen interacciones complejas entre las partículas constituyentes del material y las fuerzas aplicadas, por lo que se hace necesario el estudio de los factores que influyen en dicho proceso (Mani et al., 2006).

1.2.1 Clasificación de métodos de compactación. Existen tres métodos generales para preparar compactados: granulación húmeda, granulación seca y compresión directa.

Granulación húmeda

Su popularidad se debe a la mayor probabilidad de que la granulación pueda hallar en este método todos los requerimientos físicos convenientes para la obtención de buenos compactados, teniendo por objeto el aumento de tamaño de las partículas y la mejora de las propiedades de flujo. Sus principales desventajas son la cantidad de pasos involucrados, así como el tiempo y el trabajo necesario para llevar a cabo el proceso, en especial en gran escala. Los pasos comprenden el pesado, la mezcla, la granulación húmeda, el tamizado de la masa húmeda, el secado, el tamizado en seco, la lubricación y la compresión. El equipamiento depende de la cantidad o el tamaño del lote. En el mezclado, se requiere que las soluciones del agente aglutinante como: almidón, gelatina, azúcares, etc., se agreguen a

los polvos mezclados con agitación, hasta que la masa del polvo se humedezca con la solución aglutinante y adquiera la consistencia de nieve húmeda o azúcar morena, no se debe exceder la humedad de los polvos ya que se tendría un granulado duro y con ello dificultad para la compactación. La masa húmeda se impulsa de manera gradual a través de una malla de número 6 u 8 de la serie Tyler (abertura de 3.35 y 2.38 mm, respectivamente) para formar la granulación húmeda. La mayoría de las mezcladoras de alta velocidad están equipadas con una cuchilla cortadora que opera con independencia de las palas mezcladoras principales, y puede reemplazar el paso de la masa húmeda a través de las mallas para formar la granulación húmeda. Posteriormente se utilizan molinos, en donde la granulación se forza a través del dispositivo tamizador por martillos rotativos, cuchillas o barras oscilantes. El producto del tamizado de la granulación húmeda se coloca en hojas de papel sobre bandejas de alambre de poca profundidad y se pone en gabinetes de secado con una corriente de aire circulante y control termostático de la temperatura. Durante el secado es conveniente conservar una humedad residual que ayude a mantener hidratados algunos componentes como los almidones, lo que además contribuye a reducir las cargas eléctricas estáticas de las partículas. Después del secado, se reduce el tamaño de las partículas del granulado con molinos de martillos y se hacen pasar por un tamiz de malla más pequeña, consiguiendo así mayor homogeneidad en el tamaño de los gránulos. Con la finalidad de tener mayor revestimiento es aconsejable agregar los lubricantes en forma de polvo fino (estearato de magnesio, aceites vegetales, manitol, etc.); debido a que cada gránulo debe estar cubierto por el lubricante; se realiza una mezcla suave, generalmente mediante una mezcladora con acción oscilante para mantener el tamaño del gránulo. Una vez realizados todos los pasos anteriores, el material se comprime. La presencia de algunos finos es imprescindible para llenar apropiadamente la cavidadde los equipos de compresión (Remington, 2003).

Granulación seca

También llamado precompresión, o doble compresión. Se emplea cuando los componentes de los comprimidos son sensibles a la humedad o incapaces de soportar temperaturas elevadas durante el secado, o cuando los componentes poseen propiedades

inherentes aglutinantes o cohesivas. Incluye pesado, mezclado, precompresión, tamizado en seco, lubricación y compresión. Se mezclan los polvos, el diluyente (si se requiere) y parte del lubricante. Uno de los componentes debe tener propiedades cohesivas. La mezcla se somete a precompresión; el material en polvo contiene una considerable cantidad de aire, bajo presión este aire se expulsa y se forma una pieza densa. Cuanto más tiempo transcurra para que se escape el aire, mejor será el comprimido. Después se tritura por medio de un molino triturador y los gránulos obtenidos son tamizados. El lubricante remanente se agrega a la granulación, se mezcla con suavidad y el material se compacta por segunda ocasión. La principal ventaja de la granulación seca es la obtención de granulados de mejor uniformidad después del tamizado en seco, permitiendo que la compresión se realice con mayor facilidad (Remington, 2003).

Compresión directa

Consiste en compactar los componentes de una formulación de manera directa a partir del material en polvo sin modificar su naturaleza física. Abarca el pesado, la mezcla y compresión. Presenta una gran ventaja respecto a los otros métodos en cuanto a la reproductibilidad del proceso, debido a que la simplicidad de las operaciones representan un menor margen de error, además del ahorro de trabajo, tiempo, equipos, etc. Las propuestas para hacer que este método sea aplicable en forma más universal incluyen la introducción de aditivos capaces de impartir a la formulación las características necesarias para la compresión, y el uso de dispositivos de alimentación forzada para mejorar el flujo de las mezclas de polvos. Los materiales sometidos a compresión directa deben tener buenas características de fluidez y compresibilidad. Estas propiedades son impartidas por pasos previos del proceso, como la granulación húmeda, secado por aspersion, o la cristalización, ya que estos métodos incluyen formas procesadas de la mayoría de los diluyentes (coadyuvante) más comunes como la lactosa anhidra, lactosa secada al rocío, almidón pregelatinizado, azúcar compresible, manitol, y celulosa. Por otro lado, al incluir en la compresión directa algunos coadyuvantes como los aglutinantes, se requiere que éstos sean suficientemente cohesivos, como la celulosa microcristalina, dextrosa microcristalina y amilosa (Remington, 2003).

1.2.2 Equipos de compresión. La unidad mecánica básica de todos los equipos de compresión, para producción a gran escala, está constituida por un punzón inferior que encaja en el fondo de un molde matriz, y un punzón superior que se acopla sobre la cavidad del molde matriz después de ser ocupada por el material a comprimir (Figura 5). Ambos punzones son de iguales formas de cabezas y dimensiones. El compactado se forma por la presión aplicada de los punzones sobre el granulado, y adquiere el tamaño y la forma de los mismos.

Existen diversos equipos a nivel industrial para la elaboración de los comprimidos, todos funcionan bajo el mismo principio; así tenemos las máquinas de punzón simple diseñadas con un solo punzón (Figura 6), las máquinas rotativas para elaborar comprimidos a gran escala, constituidas por un cabezal con múltiples juegos de punzones y matrices que giran en forma continua (Figura 7), y las máquinas rotativas de alta velocidad (Figura 8), capaces de obtener compactados a altas velocidades de producción debido al aumento en la cantidad de punzones y matrices en cada revolución del cabezal. La principal dificultad en las máquinas de alta velocidad es asegurar que las matrices se llenen de manera adecuada. Asimismo, se encuentran equipos con dobles o triples puntos de compresión que permiten la compactación parcial del material antes de su compactación final, esto proporciona una salida parcial del aire y la orientación de las partículas del material antes de la compresión final, ayudando a la compactación directa de los materiales y reduciendo la laminación por el aire atrapado. En general, los punzones y las matrices pueden ser extraídos con facilidad para su inspección, limpieza e insertar diferentes juegos para producir gran variedad de tamaños y formas de compactados (Remington, 2003).



Figura 5. Punzones inferior, superior y matriz como unidades mecánicas básicas para la compresión de compactados (Remington, 2003).

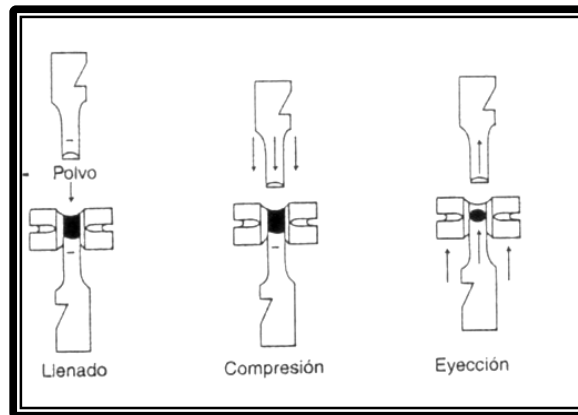


Figura 6. Punzón simple (Remington, 2003).

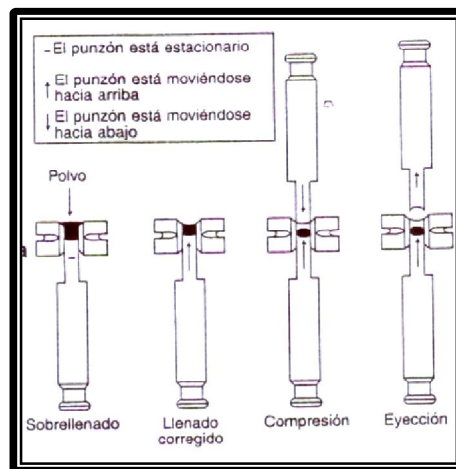


Figura 7. Punzones de la máquina rotativa (Remington, 2003).

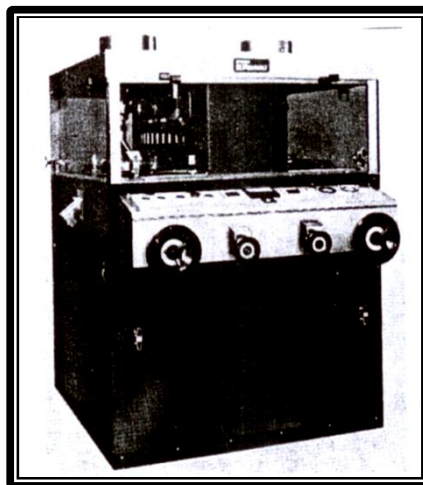


Figura 8. Máquina rotativa de alta velocidad (Remington, 2003).

1.2.3 Tipos de productos compactados o presentados en comprimidos. En el área de alimentos se producen golosinas en presentación de comprimidos, cuya forma se adquiere utilizando técnicas procedentes de la industria farmacéutica y con la compactación de la masa por medio de una maquinaria especializada, consiguiendo una textura característica que la diferencia de otro tipo de golosina; en general, los comprimidos contienen dextrosa, glucosa, azúcar compresible, acidulante, emulgente, aromas y colorantes. Algunas golosinas comprimidas son: botellitas, collares, pequeñas pastillas empaquetadas a modo de caramelo, relojes, corazones, etc. (Golomania, 2010). A partir del secado por atomización de una solución de sacarosa, con un contenido inicial de sacarosa inferior a la tasa de saturación y adición de un agente anticristalizante, se obtiene azúcar compresible para su empleo en comprimidos y confitería (Tereos, 2007).

Por otro lado, el azúcar cristal blanca y morena de caña o remolacha, se puede comercializar comprimida en cubos mediante prensas para terrones de azúcar (Food-Info, 2010).

Actualmente se han desarrollado prototipos de producción para lograr tabletillas de chocolate a partir de la compresión de la pasta de cacao en mezcla con la manteca de cacao, azúcar, aromatizante y emulsionante, consiguiendo adoptar la forma del molde, al igual que en la obtención de mazapanes firmemente comprimidos con textura lisa y suave al morder (Expodime, 2005; Cerezo, 2010).

Otro tipo de caramelos con apariencia de comprimidos son los denominados como tabletas comprimidas o pastillas, sin embargo, para procesarlos no se requiere de la compactación, ya que se obtienen por medio de la mezcla de azúcar, jarabe de glucosa, y un ligante apropiado (generalmente, agente gelificante para mantener el jarabe en su forma más sólida), se revuelve la mezcla hasta alcanzar la densidad requerida, posteriormente se separan las piezas formadas y se secan cuidadosamente para que el saborizante no se evapore; pertenecen al grupo de los caramelos blandos, como ejemplo se tiene a los caramelos masticables de leche y de sabores frutales (Cakebread, 1981). Inclusive los caramelos duros, a pesar de tener el aspecto de un comprimido, se obtienen por mezcla de los componentes, calentamiento de la mezcla, enfriamiento con agitación constante en el caso de agregar saborizantes, o sólo se vierte en moldes para dejar reposar por lapsos cortos

de tiempo y finalmente desmoldar el caramelo, comúnmente son caramelos grandes o pequeños sabor a frutas con vivos colores (Cakebread, 1981).

Así también, los cubos de consomé de pollo, res y/o vegetales son denominados como tal por su forma geométrica, pudiéndose presentar también en paralelepípedos, en tabletas o cualquier otra forma tridimensional, actualmente son elaborados mediante la mezcla continua de los componentes (opcionalmente, carne, extracto de carne, hidrolizados de proteínas, grasa, vegetales y/o extractos de vegetales, colorantes, condimentos, hierbas y conservadores) en un extrusor que se enfría de manera externa con el fin de cristalizar la grasa de la mezcla y obtener una pasta homogénea y lista para extruir mediante una matriz de conformación determinada, la tira de extrudido alcanza una consistencia estable pocos segundos después de su extrusión, se divide en piezas individuales dispuestas a empaquetar (Tamagni, 2010).

Por otro lado, en el campo de la bioenergía se preparan compactados de residuos de pajas de trigo, cebada y maíz para su empleo como cultivos energéticos (materia prima) en la producción de biocombustibles (Mani et al., 2006).

1.3 Funcionalidad de los coadyuvantes para la compactación de polvos

En el proceso de compactación se utilizan coadyuvantes con diferente funcionalidad, su empleo tiene impacto tanto en el proceso (al compactar, ligando los ingredientes para proporcionar integridad estructural) como en las características del producto final (para dar una mejor apariencia, resistencia y solubilidad) (Sameer et al., 2009; Matthew et al., 1996). Los coadyuvantes son aditivos que permiten la incorporación de sustancias de propiedades especiales y que son adecuadas para mejorar las propiedades de las formas comprimidas (Voigt, 1982). La variedad de coadyuvantes necesarios para la compresión de las formas comprimidas es amplia. Pueden clasificarse de acuerdo con su papel en el comprimido terminado; el primer grupo abarca aquellos materiales que contribuyen a impartir características de procesamiento y compresión satisfactorias a la formulación: diluyentes, aglutinantes, deslizantes y lubricantes; el segundo grupo ayuda a brindar las características físicas deseadas a los compactados terminados: desintegrantes,

humidificantes, colorantes, agentes saborizantes y edulcorantes (Remington, 2003). En la Tabla 3 se encuentran las sustancias que conforman a dichos grupos.

Tabla 3. *Coadyuvantes para la compactación de polvos* (Remington, 2003; Voigt, 1982).

Primer grupo		Segundo grupo	
Diluyentes	Fosfato dicálcico, sulfato de calcio, lactosa, celulosa, manitol, cloruro de sodio, almidón seco y pregelatinizado, azúcar en polvo, sorbitol, dextrina, glucosa, sustancias anhidras.	Desintegrantes	Almidones, arcillas, celulosas, alginato, gomas y polímeros con enlaces cruzados, goma guar, pulpa de citrus y carboximetilcelulosa
Aglutinantes	Almidón, gelatina, azúcares: glucosa, sacarosa, dextrosa microcristalina, melaza y lactosa. Gomas naturales y sintéticas como la arábica, alginato de sodio, carboximetilcelulosa, etc. Polietilenglicol, agua y alcoholes.	Lentificadores de disgregación	Sacarosa, goma arábica, tragacanto, dextrina, grasas hidrogenadas, combinaciones hidrófilas como los polietilenglicoles.
Deslizantes	Dióxido de silicio coloidal al 1% o menos, almidón, óxido de magnesio, estereato de magnesio, sacarosa, talco libre de asbesto.	Humidificantes	Glicerina, almidón, soluciones de sorbitol
Lubricantes	Estearato de magnesio y calcio, aceites vegetales hidrogenados, talco, alcoholes univalentes y polivalentes como el polietilglicol, glicerina, sorbitol.	Colorantes	Rojo 40, rojo 22, rojo natural 4, amarillo 6, amarillo 5, betacaroteno, azul 1, azul 2, verde 3, caramelo, etc.
		Saborizantes	Sacarosa, aspartame, sorbitol, manitol y lactosa.

1.3.1 Diluyentes. También conocidos como elementos de relleno, se agregan para aumentar el volumen de los polvos, con el propósito de obtener un tamaño útil para la compresión (Voigt, 1982). Algunos diluyentes como el manitol, lactosa y sorbitol pueden impartir a los compactados propiedades desintegrantes satisfactorias, con grato sabor, sin dejar una sensación desagradable en la boca. Los diluyentes utilizados como aditivos para las fórmulas llevadas a compresión directa, se someten a procesos previos para darles fluidez y compresibilidad, como la granulación húmeda, secado por aspersion, esferonización o la cristalización; algunos ejemplos son: almidón pregelatinizado, azúcar compresible, manitol, fostatodicálcico y lactosa anhidra. En el caso del azúcar compresible, sobre todo sacarosa, se procesa para tener propiedades adecuadas para la compresión directa, también puede contener pequeñas cantidades de dextrina, almidón o azúcar invertida. Los diluyentes requieren la incorporación de un lubricante adecuado a niveles normales para lubricidad. Las sustancias anhidras, como el caso de algunos disacáridos y monosacáridos, poseen buena capacidad de fluidificación y compresibilidad, se pueden utilizar en la compresión directa siempre que estén presentes un desintegrante y un lubricante (Remington, 2003).

1.3.2 Aglutinantes. Voigt, en 1982 los dio a conocer como sustancias “*ligantes*” que proporcionan firmeza y resistencia a los compactados; cuidando además de la consistencia de las partículas pulverulentas en un granulado. Estableció que la firmeza podía ser influida por la presión de compresión así como por el ligante, y que los elementos de relleno cumplían en parte la función de los ligantes.

Remington, en el 2003, las describió como sustancias que otorgan a las formulaciones de los compactados una cohesividad que asegura que éstos permanezcan intactos después de la compresión; proporcionan a las formulaciones de granulados la dureza y el tamaño deseado. El uso excesivo de un aglutinante produce un compactado duro, que no puede desintegrarse fácilmente y además puede causar un desgaste de los dispositivos utilizados en la elaboración de los compactados. La misma cantidad de aglutinante en solución puede ser más efectiva que si estuviera dispersa en forma seca y humedecida con un solvente, ya que para este último procedimiento, el agente aglutinante

no es tan efectivo en la penetración y la humectación de cada una de las partículas dentro de la masa del polvo. Debido a que los polvos tienen una cubierta de aire adsorbida en su superficie que debe atravesarse antes de que sean humectados, por lo que difieren con facilidad en su forma de humectación, se recomienda la incorporación del aglutinante en solución, con lo que se consigue una mejor humectación de cada partícula de la mezcla, además de una adhesión más efectiva con una menor concentración del agente aglutinante. Debido a la acción solvente que tiene el agua y los alcoholes sobre algunos componentes como la lactosa y el almidón, son capaces de funcionar como aglutinantes al cambiar el material pulverizado a gránulos, provocando la adhesión entre los materiales al comprimirlos debido a la humedad residual retenida por los mismos (Remington, 2003).

1.3.3 Deslizantes. Son sustancias que mejoran las características de flujo de una mezcla de polvos. Se agregan en el estado seco antes de la compresión; es de especial cuidado el orden de adición y el proceso de mezcla, ya que se busca maximizar su efecto sin que influya sobre la funcionalidad de los lubricantes (Remington, 2003). Los deslizantes o “*reguladores de flujo*” cuidan la dosificación del material desde la tolva a la matriz de la máquina de comprimir. Disminuyen el rozamiento interno, consiguiendo un llenado regular de la cavidad de la matriz y un constante volumen de la masa a comprimir (Voigt, 1982).

1.3.4 Lubricantes. Los lubricantes parecen formar una capa que recubre a los gránulos individuales, la cual parece permanecer más o menos intacta durante el proceso de compresión (Matthew et al., 1996); debido a la película formada entre los gránulos, éstos ejercen una baja resistencia a la compresión (Sameer et al., 2009), también ayuda a reducir la fricción entre los polvos durante la compresión y evita que los otros ingredientes (polvos), con los que se encuentra en mezcla, se agrupen en terrones o se peguen en los equipos donde se elaboran los comprimidos (Sameer et al., 2009). La selección deficiente o la cantidad excesiva pueden originar la impermeabilización de los comprimidos, obteniendo una escasa desintegración o una disolución retardada de los mismos (Remington, 2003).

1.3.5 Desintegrantes. Facilitan la ruptura o desintegración de un compactado. La desintegración de los comprimidos se debe a un aumento en la velocidad de humectación. Además de la presencia de los desintegrantes, el tiempo de desintegración de los compactados puede ser afectado por los aglutinantes, la dureza del comprimido y el lubricante (Remington, 2003).

El tamaño, forma y antigüedad del compactado así como la presión de compresión son otros factores que afectan la desintegración. Los desintegrantes se clasifican en tres grupos (Voigt, 1982):

- 1) Sustancias que aumentan la capilaridad, adsorben humedad y esponjan.
- 2) Combinaciones que efervescen, con desprendimiento de gas, por efecto de la humedad.
- 3) Sustancias que aumentan la humectabilidad de los comprimidos.

Por otro lado, existen “*lentificadores de la disgregación*” cuando no es deseable la disolución rápida de los compactados (Voigt, 1982).

1.3.6 Humidificantes. Impiden la excesiva desecación del granulado y de los compactados, los vestigios de humedad en los compactados aceleran la desintegración. Los humidificadores adsorben humedad atmosférica y actúan como reguladores de agua de los comprimidos. Se ha recomendado la adición del 1 al 3% de algunos humidificantes (Voigt, 1982).

1.3.7 Colorantes. Tienen la única función de mejorar la apariencia estética de los compactados. El color ayuda al fabricante a controlar el producto durante su preparación y al usuario a identificar el producto (Remington, 2003).

1.3.8 Saborizantes. Algunos diluyentes como el manitol, sorbitol y la lactosa cumplen también con la funcionalidad de endulzar a los compactados. El uso de los agentes edulcorantes naturales y artificiales, no afectan en forma marcada las características físicas de los comprimidos ya que su empleo es en pequeñas cantidades (Remington, 2003).

1.3.9 Sorbitol líquido al 70% como coadyuvante de compresión. El sorbitol o D-Glucitol-L, se encuentra presente en ciertas frutas pequeñas (cerezas, ciruelas, peras, etc.). Se obtiene industrialmente por reducción de la glucosa, por hidrogenación a presión o por electro-reducción; también es conocido como un poliol de azúcar (Figura 9) de fórmula empírica $C_6H_{14}O_6$ (Cakebread, 1981). Se puede presentar sólido en tabletas o polvo; y como soluciones en jarabes de diferentes concentraciones, viscosas, sin color, de sabor dulce y miscibles en agua. Su dulzor relativo es del 50-60% en relación con la sacarosa. La industria alimentaria y farmacéutica lo han empleado en la elaboración de diversos productos (Astroquim® S.A. DE C.V., México, Edo. de México). Se utiliza como edulcorante en productos alimenticios dietéticos por su bajo valor calórico de 2.6 kcal/g, comparado con el valor de 3.95 kcal/g que proporciona la sacarosa. Posee función emulsionante aplicable a la confitería y repostería. También se emplea en la fabricación de vitamina C, cosméticos, velas, papel, etc. (Kellogg's®, 2008; Benjumea, 2001). Además, se utiliza en la compactación de polvos por su funcionalidad diluyente, aglutinante, lubricante, desintegrante, humidificante, lentificador y saborizante (Remington, 2003; Voigt, 1982).

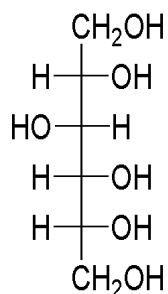


Figura 9. Molécula de sorbitol (Remington, 2003).

1.3.10 Dextrosa anhidra como coadyuvante de compresión. La dextrosa anhidra (Figura 10) es glucosa en polvo cristalino y blanco, que se obtiene por hidrólisis enzimática completa del almidón (Cakebread, 1981). Es soluble en agua, tiene un dulzor relativo con respecto a la sacarosa del 65-80%, y valor calórico de 3.74 kcal/g. Al igual que el sorbitol, la dextrosa se ha utilizado en la industria alimentaria y farmacéutica para la elaboración de varios productos. En panificación y en bebidas se utiliza como un azúcar fermentable al ser

fácilmente asimilada por las levaduras; se usa en confitería, conservas de frutas y cárnicos, realizando los sabores naturales del producto. A su vez, la dextrosa anhidra se ha utilizado en la compactación directa de polvos por tener componentes como la dextrosa, dextrina y el almidón soluble (AMFHER foods® S.A. DE C.V., México, D.F) con propiedades de diluyente, aglutinante, lentificador y saborizante (Remington, 2003; Voigt, 1982).

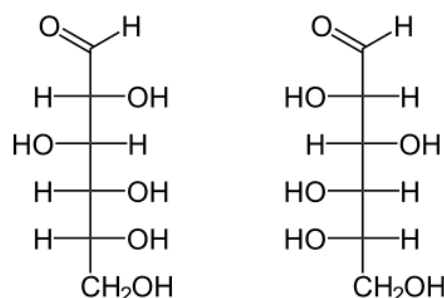


Figura 10. Molécula de D- y L-glucosa (Remington, 2003).

1.3.11 Fuerzas de asociación intermolecular en líquidos y sólidos. Las moléculas tanto de los coadyuvantes de compresión como de los materiales con los que se encuentren en contacto para la obtención de un producto final, forman complejos moleculares debido a sus propiedades químicas; dichos complejos, comprenden fuerzas intermoleculares, que resultan de la atracción entre distintas moléculas, es decir, son las encargadas de mantener unido a un líquido o a un sólido así como los enlaces covalentes mantienen unida a una molécula. Durante la ebullición o fundición se rompen las fuerzas intermoleculares no las covalentes (Ruiz, 2010). Las fuerzas intermoleculares permiten proporcionar mayor resistencia estructural o pueden propiciar la desintegración parcial de los componentes del complejo molecular. Este tipo de asociación se presenta con las interacciones entre las partículas, por ejemplo, la interacción entre los grupos hidroxilo de un diluyente y un aglutinante, tales como: sorbitol y glucosa, forman fuertes uniones moleculares debido a los puentes hidrógeno. El efecto total de las fuerzas de asociación intermolecular es considerado como la resultante de varias fuerzas que actúan simultáneamente. Todo depende del carácter de las moléculas puestas en juego (ver página 25). Las fuerzas de

unión entre moléculas pueden ser: Fuerzas de Coulomb, fuerzas directrices, fuerzas de iones-dipolo, fuerzas de London y puentes de hidrógeno (Voigt, 1982).

Fuerzas de Coulomb (ion-ion). La fuerza de coulomb rige a los enlaces cuyas cargas no están en movimiento, tal es el caso de un enlace apolar, el cual puede presentarse cuando los átomos que conforman la unión son iguales, ya que atraerán al par de electrones covalente con la misma fuerza logrando que los electrones permanezcan en el centro (Voigt, 1982).

Fuerzas directrices (dipolo-dipolo). Al formarse una molécula, el par de electrones covalente tiende a desplazarse hacia el átomo que tiene mayor carga nuclear, originando un dipolo permanente, es decir, una densidad de carga desigual (positiva y negativa) entre los núcleos que forman el enlace, dando lugar a una molécula polar cuyo momento dipolar es distinto a cero. Las fuerzas dipolo-dipolo se dan por la atracción electrostática entre el extremo positivo de una molécula y el extremo negativo de la molécula vecina. Estas fuerzas directrices se incrementan al aumentar el momento de dipolo y pueden presentarse asimismo como fuerzas de inducción (Colón, 2010; Voigt, 1982).

Fuerzas de iones-dipolo. Son interacciones entre un catión y la carga parcial negativa de un dipolo, o un anión y la carga parcial positiva de un dipolo, un ejemplo es la solubilidad de un soluto iónico como la sal en un solvente polar como el agua.

En general, los enlaces iónicos se presentan en el caso de los electrolitos y desempeñan un importante papel en los complejos metálicos, así como en la formación de complejos con macromoléculas iónicas. Las constantes moleculares decisivas para estas fuerzas, son la carga de los iones, el radio de los iones y la constante dieléctrica. Para el efecto recíproco entre iones y dipolos hay que tener en cuenta el momento de dipolo (Voigt, 1982).

Fuerzas de London o dipolo inducido o dipolo temporario o fuerzas de dispersión (dipolo ion-dipolo inducido). Una molécula apolar puede ser inducida por una corriente eléctrica o por un dipolo permanente, consiguiendo por un instante la deformación de sus nubes electrónicas (polarizabilidad) por el movimiento de los electrones, y con ello, la formación de un dipolo momentáneo o inducido que polariza a las moléculas vecinas generando otros dipolos inducidos. Los dipolos temporarios dependen del momento dipolo e incrementan conforme al tamaño de la nube electrónica, ya que entre más electrones mayor polarizabilidad. Un ejemplo es la solubilidad de un compuesto no polar como cloro o dióxido de carbono en agua (Colón, 2010; Ruiz, 2010).

Puentes de hidrógeno. Es un caso particular de la fuerza dipolo permanente, se debe a la unión entre un átomo de hidrogeno de una molécula con un átomo muy electronegativo de otra molécula. Las asociaciones por puentes de hidrógeno se presentan en moléculas con los grupos $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$. El hidrógeno adquiere una carga parcial positiva por estar unido a un átomo muy electronegativo, esta carga parcial positiva puede interaccionar con el par de electrones libre de un átomo vecino, especialmente si este átomo es tan electronegativo que pueda tener carga parcial negativa. Las moléculas que presentan unión puente hidrógeno presentan entonces las fuerzas intermoleculares dipolo-dipolo e inducción (Colón, 2010; Voigt, 1982).

Las fuerzas de London, las directrices y las de puente de hidrogeno (resumidas como de Van der Waals) hacen su aparición frecuentemente en coadyuvantes moleculares no iónicos. Estas moléculas poseen casi siempre pares de electrones libres en átomos de N, de O, o cargas parciales negativas. Los enlaces entre iones y dipolos, así como entre dipolos unos con otros, no producen agregados moleculares limitados, se originan fuertes enlaces intermoleculares, mediante puentes de hidrógenos y puentes de electrones π (Voigt, 1982).

La unión química sea iónica, metálica o covalente es más intensa que cualquier fuerza intermolecular. Las fuerzas puente hidrógeno son más fuertes que las dipolo permanente y éstas son más intensas que las fuerzas de London (Tabla 4).

Tabla 4. *Fuerzas intermoleculares en líquidos y sólidos* (Ruiz, 2010).

Fuerza	Magnitud (kJ/mol)	Interacción entre
London	1-10	Todas las moléculas
Directrices	3-4	Moléculas polares
Puente de Hidrógeno	10-40	Moléculas con –OH, –COOH, –NH ₂
Ion-dipolo	10-50	Iones- moléculas polares

Tanto el jarabe de sorbitol como la dextrosa anhidra son coadyuvantes polares, no iónicos, capaces de formar fuerzas intermoleculares del tipo de Van der Waals (Ruiz, 2010; Voigt, 1982).

1.4 Influencia de las propiedades físicas de los polvos en la compactación

En el proceso de compactación existen interacciones complejas entre las partículas constituyentes y las fuerzas aplicadas (Mani et al., 2006) por lo que se deben estudiar los factores que influyen en dicho proceso.

1.4.1 Tamaño de partícula. La medida del tamaño, así como de su distribución, es uno de los métodos para caracterizar polvos más ampliamente utilizados en la industria. Su medida se utiliza para realizar el control de calidad del producto final, pues puede ser relacionada con algunas otras propiedades físicas (Barbosa-Cánovas et al., 1987). Se sabe que el tamaño de partícula es uno de los factores que influye en gran medida en las propiedades físicas de los sistemas de partículas, tales como: densidad global, compresibilidad, y fluidez (Yan y Barbosa-Cánovas, 1997). Además influye en las propiedades físicas de los productos compactados por lo que es fundamental tenerlo caracterizado para poder relacionarlo con las propiedades físicas del producto final

(Barbosa-Cánovas et al., 1987). Generalmente se asume que a menor tamaño de partícula (alrededor de 0.1 mm a 0.3 mm para algunos materiales particulados) se incrementa la fuerza de los comprimidos, siempre que las partículas permanezcan intactas durante la compactación (Bacher et al., 2008).

El tamaño de partícula juega un papel importante sobre la compresibilidad. A mayor tamaño de partícula (alrededor de 0.4 mm a 1.7 mm para algunos alimentos particulados) aumenta la compresibilidad y la reducción de volumen. Asimismo, las partículas de mayor tamaño disminuyen moderadamente la dureza de los comprimidos propiciando la ruptura (Yan y Barbosa-Cánovas, 1997).

1.4.2 Densidad global y contenido de humedad de los polvos. El término de densidad global se emplea para determinar la densidad de los polvos. Se define como la masa de partículas que ocupan una unidad de volumen determinada. Las partículas que conforman el polvo poseen su propia densidad, definida como la masa de cada partícula sobre su volumen. Debido a que los polvos son compresibles, la densidad global es referida a especificaciones adicionales como: pérdida de densidad global, densidad global de compactación por golpeo, o densidad global compactada (Alvarado y Aguilera, 2001).

Un aumento en la densidad global del polvo se puede originar por vibración o “*tapping*”; el fenómeno ocurre durante el transporte o el manejo de los alimentos en polvo, por presión estática al almacenarlos en grandes recipientes, o por compresión mecánica.

Guan y Zhang en el 2009, indicaron que la cohesión entre las partículas y la densidad global de los polvos de harina, té y lactosuero, incrementan durante la consolidación, obteniendo productos más cohesivos y compactos.

La tendencia al cambio en las propiedades físicas y químicas de los alimentos en polvo se debe, en parte, a la humedad de los mismos (Yan y Barbosa-Cánovas, 1997). Los compactados como los residuos de cereales con bajo contenido de humedad, alrededor del 8%, y alta densidad del compactado, más de 600 kgm^{-3} , se estiman eficientes para su almacenamiento y transporte (Mani et al., 2006).

Mani y colaboradores en el 2006, realizaron estudios de 13 alimentos en polvo, reportaron que el incremento en el contenido de humedad hace que los polvos sean más

cohesivos, pero en ciertos niveles, la humedad podría actuar como un lubricante mejorando su flujo. Así también demostraron que la exposición a la humedad de los polvos en el aire, hace que incremente su cohesividad.

Yan y Barbosa-Cánovas, en 1997, establecieron que las partículas de los alimentos en polvo con bajo contenido de humedad son más frágiles y por lo tanto más compresibles; los polvos evaluados fueron: leche desnatada, leche semidesnatada y café soluble.

1.5 Propiedades físicas y de solubilidad de los compactados

1.5.1 Densidad. De acuerdo a Voigt (1982), la densidad se define como la relación entre la masa de una sustancia y su volumen. La densidad que se refiere a los materiales con estructura porosa es la aparente, cuyo valor es más bajo en comparación con la densidad verdadera (Voigt, 1982). Para el concepto de densidad verdadera se considera un cuerpo bien proporcionado, sin inclusiones.

La compactación incrementa la densidad de los materiales por efecto de la presión mecánica, Mani y colaboradores en el 2006 reportaron que con una presión de aproximadamente 969 kg/cm^2 se obtiene una densidad alrededor de 900 kg/m^3 para compactados de paja de trigo.

1.5.2 Dureza y cohesión. La dureza es la capacidad de un sólido de resistirse a la deformación o fractura de su superficie. Está relacionada con la fuerza, que es la encargada de vencer dicha resistencia (Prieto, 2002).

Mani y colaboradores en el 2006, encontraron que la dureza de los compactados de paja se incrementa moderadamente con el decremento del tamaño de partícula.

Al incrementar la fuerza de compresión, aumenta la dureza. Por el mismo motivo disminuye la capacidad de desintegración; por lo tanto, con frecuencia es necesario buscar un equilibrio entre resistencia mecánica y desintegración (Voigt, 1982). Asimismo, si el compactado no posee propiedades cohesivas después de la compresión, éste puede deshacerse al manipularlo (Remington, 2003).

La fuerza cohesiva de los sólidos incrementa a medida que el material se compacta. La máxima presión de compactación que el material puede experimentar durante su almacenamiento y manejo puede tener efecto significativo en su pérdida de estructura, cambiando así su forma original, e incluso puede conducir a una ruptura total del mismo. La realización de pruebas a diferentes alimentos en polvo, ha demostrado que conforme aumenta la presión de compactación, incrementa la cohesión de las partículas; sin embargo, hay polvos que no tienen cambios en su cohesión, como el almidón, únicamente por la aplicación de la fuerza de compactación, si no que requieren la combinación de dicha fuerza con otros factores como el incremento de la humedad para notar cambios sobre su cohesión (Guan, y Zhang, 2009).

1.5.3 Solubilidad. Es la capacidad de una sustancia para disolverse en otra. Las relaciones de materia disuelta (solute) y medio de disolución (solvente) pueden expresarse como: % de masa, % de volumen, % de masa-volumen, concentración molar (M), concentración molal (m) y concentración normal (N) (Voigt, 1982).

El término de solubilidad, además de ser utilizado para expresar cuantitativamente la concentración de las soluciones, también se emplea para designar al fenómeno cualitativo del proceso de disolución. Durante el proceso de disolución, y bajo el correspondiente consumo de energía, deben debilitarse las uniones moleculares en el caso de los no electrolitos, o los enlaces iónicos en el caso de los electrolitos y, finalmente, desligarse totalmente, de forma que, en el caso ideal, los elementos queden aislados unos de otros en el medio solvente; lo que sucederá sí la energía de disolución aportada sobrepasa a la energía de enlace. En las soluciones reales se alcanza un efecto de cambio intermolecular entre las moléculas de la sustancia disuelta y las del medio disolvente (solvatación), de modo que la constitución estructural y la distribución de cargas son parámetros determinantes de la disolución. Su confirmación práctica se encuentra en el hecho de que los no electrolitos, que están capacitados para la formación de puentes de hidrógeno, se disuelven en agua, en tanto que son prácticamente insolubles en disolventes apolares.

El fenómeno de disolución está relacionado con el calor de disolución. Los no electrolitos, sobre todo las combinaciones orgánicas, cuyas uniones están gobernadas por fuerzas de Van der Waals relativamente débiles, y no presentan efectos marcados de intercambio con las moléculas del solvente, se disuelven endotérmicamente. El calor de disolución de los electrolitos resulta como diferencia entre energía de enlace y de solvatación. Según sea la magnitud de ambos parámetros, el proceso de disolución puede cursar de forma exotérmica o endotérmica.

Por mecanismos no completamente aclarados todavía, ciertas sustancias con grupos moleculares polares marcadamente hidrófilos aumentan la hidrosolubilidad de otras sustancias. De este efecto hidrotrópico es probablemente responsable la potencia de combinación de los puentes de hidrógeno y la formación parcial de complejos. Algunos ejemplos de sustancias hidrotrópicas son las que contienen hidroxilos-carboxilos, tales como los alcoholes univalentes y polivalentes: propilenglicol, glicerina y sorbitol (Voigt, 1982).

La presión excesiva, que puede necesitarse para obtener la cohesión de ciertos materiales, es uno de los factores capaces de prolongar el tiempo de disolución (Remington, 2003). Rodríguez y colaboradores en el 2003, encontraron que las formulaciones con las que se obtenía la mayor dureza de comprimidos vegetales hidrofílicos, ofrecieron un tiempo de desintegración igual o mayor de 15 segundos, representando el 50 % del tiempo límite de aceptación correspondiente a 30 segundos.

1.6 Relación entre las propiedades físicas de los polvos y las propiedades de los compactados

A pesar de que las propiedades físicas de los polvos y las condiciones de proceso siguen generalmente una tendencia sobre su influencia en la compactación, se pueden presentar diferentes resultados, debido a las propias características físicas de los distintos polvos, formulación, tipos de proceso para la compactación, condiciones de proceso, etc. Por mencionar algunos ejemplos:

- Yan y Barbosa-Cánovas, en 1997, estudiaron los efectos del tamaño de partícula y actividad de agua sobre las características de compresión de alimentos en polvo aglomerados; clasificaron los alimentos por tamaño de partícula en cinco o seis fracciones, cada fracción se llevó a tres niveles de actividad de agua, y fueron comprimidas en un texturómetro TA-XT2. La fuerza máxima aplicada fue de 245 N. Encontraron que a mayor tamaño de partícula mayor reducción de volumen, y que las muestras con menor actividad de agua eran más fáciles de comprimir, aunque el cambio de actividad de agua no tuvo efecto significativo sobre las características de compresión.
- Mércia y Caetano, en el 2007, estudiaron la relación del tamaño y densidad de partícula, con la fuerza de compactación en mezclas de polvos para elaborar bebidas de chocolate. La fuerza de compactación la midieron en un texturómetro TA-XT2, se compactó 80 mL de polvos hasta una distancia de 12 mm, a una velocidad de prueba de 2 mm/s; la fuerza de compactación varió entre 5.21 y 160.82 N y el tiempo de compactación fue de 5 segundos. Las muestras más compactables (necesitaron la menor fuerza de 5.21 N) fueron las que mostraron el tamaño de partícula más pequeño y homogéneo, lo cual lo atribuyeron a un mayor contacto de superficie que favoreció la compactación. Las muestras cuyos polvos fueron menos densos, fueron las más compactables.
- Mani y colaboradores, en el 2006, estudiaron el efecto de cinco niveles de fuerza de compresión (1000, 2000, 3000, 4000, y 4400 N), tres niveles de tamaño de partícula (3.2, 1.6, y 0.8 mm) y dos niveles de contenido de humedad (12 y 15%) sobre las propiedades mecánicas de compactados de biomasa de trigo, cebada y maíz. Con una baja presión durante la compresión, el compactado de biomasa de maíz obtuvo la mayor densidad. La fuerza de compresión, tamaño de partícula, y contenido de humedad afectaron significativamente la densidad de los comprimidos de la biomasa de trigo, cebada y maíz. Sin embargo, entre los tres diferentes tamaños de partícula de trigo, no hubo diferencia significativa sobre la densidad del comprimido.

CAPÍTULO II

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Objetivos

General

- Analizar la funcionalidad de coadyuvantes de compresión, el efecto del tipo de café y de las condiciones de proceso en el desarrollo de compactados de café soluble, por medio de pruebas físicas y de solubilidad, a través de un diseño Taguchi L27 (3**), con la finalidad de garantizar un producto con alta resistencia mecánica para su manejo y una solubilidad característica para preparar una bebida instantánea.

Particulares

- Caracterizar las mezclas de material particulado con sorbitol, mediante pruebas de las propiedades físicas (densidad global, humedad, distribución de tamaño de partícula y compactabilidad), a través de un diseño Taguchi L27 (3**), con la finalidad de relacionarlas con las propiedades físicas y de solubilidad del producto terminado (compactados de café soluble).
- Evaluar el efecto de la dextrosa anhidra y jarabe de sorbitol líquido al 70% como coadyuvantes de compresión y el efecto del tipo de café, sobre las propiedades de dureza, densidad, color, y solubilidad de los compactados de café soluble, a través de un diseño Taguchi L27 (3**).

- Evaluar el efecto del tiempo y presión de compactación como condiciones de proceso, en las propiedades de dureza, densidad, color y solubilidad de los compactados de café soluble, a través de un diseño Taguchi L27(3**).

2.2 Justificación

Debido a que los ingredientes y las condiciones de compactación de las formulaciones para elaborar productos a partir de la compresión de polvos o gránulos, influyen notoriamente en las propiedades físicas y de solubilidad (determinantes para el manejo y consumo del producto final), se hace necesario estudiar la funcionalidad de los aditivos como es el caso de la dextrosa y jarabe de sorbitol, además del efecto del tiempo y presión de compactación, con la finalidad de desarrollar una presentación de café soluble en forma de compactados. Se hace notar que el término de solubilidad se emplea aquí para designar al fenómeno cualitativo del proceso de disolución, asimismo que las mezclas de material particulado comprenden el café soluble, dextrosa anhidra y azúcar mascabado. Para el análisis estadístico se llevó a cabo un diseño Taguchi L27 (3**), que con un número aceptable de corridas experimentales, permite obtener el porcentaje de influencia de cada variable estudiada en las propiedades físicas tanto de las mezclas así como las de los compactados y solubilidad de los mismos. Además, se eligieron las interacciones más importantes, que en este caso fueron las del tipo de café y los coadyuvantes: tipo de café-dextrosa, tipo de café-sorbitol y dextrosa-sorbitol.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Materiales. Los coadyuvantes para la compactación fueron: dextrosa anhidra (AMFHER foods® S.A. DE C.V., México, D.F.) y jarabe de sorbitol líquido al 70% (Astroquim® S.A. DE C.V., México, Edo. de México). Los tipos de café soluble utilizados fueron los obtenidos por el proceso de atomización: Oro®, aglomeración: Café soluble Nescafé Clásico®, y liofilización: Member's Mark®. Los tipos de café soluble se presentan en granulados, por lo que el café Oro® se molió con un mini procesador de alimentos por 15 segundos con la finalidad de tener una tercera presentación, se empleó el polvo de café

Oro® que pasó la malla 80 del sistema ASTM (USA standard, norma E-11); se decidió moler el café atomizado (Oro®) debido a que por su proceso de obtención, de menor elaboración, sería el que menos modificaciones sufriría en cuanto a la presentación del tamaño de partícula. Se utilizó azúcar mascabado METCO®.

2.3.2 Diseño experimental. Se llevó a cabo un Diseño Taguchi L27 (3**) por medio del software Minitab® versión 14.1, el cual se corrió para las mezclas de material particulado con sorbitol antes de ser compactadas así como para los compactados, con la finalidad de obtener las formulaciones a evaluar (Cuadro 1) y posteriormente conocer el factor con mayor efecto en las propiedades físicas tanto de las mezclas así como de los compactados y solubilidad de los mismos. Los factores de variación para la evaluación de las mezclas de material particulado con sorbitol fueron tres variables de formulación con tres niveles cada una, correspondientes a dextrosa anhidra: 8, 16, y 20%, jarabe de sorbitol: 0.9, 2.7, y 4.5%, y tipo de café soluble: atomizado (molido), aglomerado y liofilizado. Los factores de variación para la evaluación de los compactados, además de los mencionados en las mezclas, fueron dos variables de proceso con tres niveles cada una, correspondientes a la presión: 1.5, 2.5, y 3.5 kg/cm² y tiempo de compactación: 1.5, 2.0, y 2.5 minutos.

2.3.3 Formulación de mezclas. La cantidad de mezcla tanto para su caracterización así como para el desarrollo de los compactados fue de 5 gramos, más la cantidad de sorbitol agregada. El 30% (1.5 g) fue de café soluble; la dextrosa anhidra se varió entre 8, 16 y 20% y el azúcar mascabado entre 62, 54 y 50% a fin de completar el 100%. El sorbitol líquido se agregó como extra del 100% de la mezcla de material particulado en forma de gotas, se incorporó el 0.9, 2.7 y 4.5% con relación a los 5 gramos de la mezcla.

2.3.4 Preparación de mezclas. El material particulado correspondiente a cada corrida del Diseño Taguchi L27 (3**) fue pesado en una balanza analítica de laboratorio modelo Adventurer (OHAUS®, China), se colocó en un vaso de precipitados de 50 ml y se agregó la cantidad correspondiente de sorbitol líquido sobre las partículas, posteriormente se

mezcló con ayuda de una microespátula por un periodo de cuatro minutos. Dicho procedimiento se llevó a cabo para cada una de las mezclas a evaluar.

Para fines prácticos, en las propiedades físicas, el término “mezcla” se refiere a la mezcla de material particulado con sorbitol.

Cuadro 1. *Formulaciones a evaluar obtenidas del Diseño Taguchi L27 (3**).*

Mezclas	* Tipo de café soluble	Dextrosa (%)	Azúcar mascabado (%)	Sorbitol (%)	** Presión (kg/cm ²)	** Tiempo (min)
1	Nescafé Clásico® (Proceso de obtención: aglomeración)	8	62	0.9	1.5	1.5
2		8	62	2.7	2.5	2
3		8	62	4.5	3.5	2.5
4		16	54	0.9	2.5	2
5		16	54	2.7	3.5	2.5
6		16	54	4.5	1.5	1.5
7		20	50	0.9	3.5	2.5
8		20	50	2.7	1.5	1.5
9		20	50	4.5	2.5	2
10	Member's Mark®. (Proceso de obtención: liofilización)	8	62	0.9	2.5	2.5
11		8	62	2.7	3.5	1.5
12		8	62	4.5	1.5	2
13		16	54	0.9	3.5	1.5
14		16	54	2.7	1.5	2
15		16	54	4.5	2.5	2.5
16		20	50	0.9	1.5	2
17		20	50	2.7	2.5	2.5
18		20	50	4.5	3.5	1.5
19	Oro® (Proceso de obtención: atomización (molido)), se sometió a trituración en un mini procesador de alimentos por 15 segundos	8	62	0.9	3.5	2
20		8	62	2.7	1.5	2.5
21		8	62	4.5	2.5	1.5
22		16	54	0.9	1.5	2.5
23		16	54	2.7	2.5	1.5
24		16	54	4.5	3.5	2
25		20	50	0.9	2.5	1.5
26		20	50	2.7	3.5	2
27		20	50	4.5	1.5	2.5

*La cantidad de café soluble tanto en las mezclas como en el desarrollo de los compactados fue la correspondiente a 1.5 gramos (30%).

**Las condiciones de presión y tiempo solo fueron aplicadas en la elaboración de los compactados de café soluble.

2.3.5 Caracterización de las mezclas para desarrollar compactados de café

Densidad global por compactación de las mezclas

Fue determinada por la relación masa total (kg) / volumen compactado de la mezcla (m^3), como se indica en la ecuación 1. Para obtener la masa total de la mezcla y el volumen compactado (V_c), se colocó una probeta graduada de 10 cm^3 en el interior de una balanza analítica de laboratorio modelo Adventurer (OHAUS®, China), la cual se taró, en seguida, se vertió la cantidad total de mezcla en la probeta, se reportó la masa en kilogramos y se registró el volumen inicial (V_i). Posteriormente se vibró la probeta con la muestra en un agitador para tamices (Figura 11) por un periodo de cinco minutos, tiempo en el que por medio de pruebas preliminares se notó el máximo cambio sobre el descenso del volumen de la muestra. Después de la vibración se registró el volumen compactado en metros cúbicos. La prueba se realizó por triplicado para cada una de las muestras, bajo las mismas condiciones.

$$\rho = m/V_c \quad \text{.....ecuación 1}$$

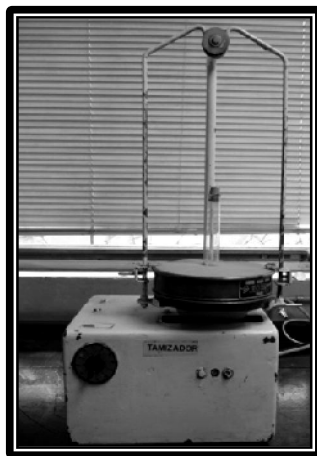


Figura 11. Acoplamiento para la prueba de densidad global por compactación de las mezclas.

Distribución de tamaño de partícula de las mezclas

Se utilizaron cuatro tamices de 7 cm de diámetro del sistema ASTM (USA standard, norma E-11) de malla 20, 40, 60 y 80, los cuales corresponden a una abertura de 0.841, 0.420, 0.250 y 0.177 mm, respectivamente. Los tamices se ajustaron y colocaron en un agitador de tamices (Figura 12), ordenados de mayor a menor apertura de malla. La muestra de 5 gramos, más la cantidad correspondiente de sorbitol, se colocó sobre el tamiz de malla 20 y se tamizó durante cinco minutos; el tiempo de tamizado fue propuesto mediante pruebas preliminares, donde se observó que después de dicho tiempo el total de la muestra había llegado a la charola inferior de los tamices. Después del tamizado, la masa retenida en cada tamiz fue pesada. La prueba se realizó por triplicado para cada una de las muestras, bajo las mismas condiciones. Posteriormente se realizó un análisis, determinándose el θ_{promedio} (mm) de la distribución de la mezcla que correspondería al diámetro del tamiz hasta el cual se retuvo el 80% de la mezcla (Bond, 1952).



Figura 12. Agitador de tamices con acoplamiento para la prueba de distribución del tamaño de partícula de las mezclas.

Contenido de humedad

Se llevó a cabo en el analizador de humedad MB45 (OHAUS®, Suiza) que se muestra en la Figura 13; con el programa de temperatura estándar, temperatura de

dsecación de 103 °C y criterio de terminación A60, apropiado para café soluble y muestras en polvo. La cantidad de mezcla total, aproximadamente 5 gramos, se colocó sobre el platillo del analizador y se obtuvo directamente en la pantalla del mismo, el porcentaje de humedad. La prueba se realizó por triplicado para cada una de las muestras, bajo las mismas condiciones.

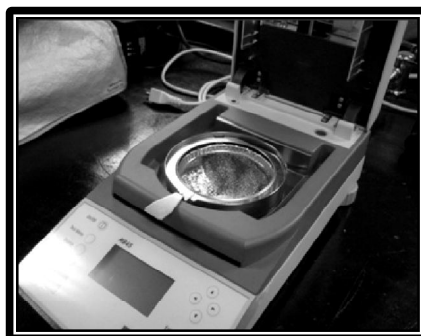


Figura 13. Analizador de humedad MB45 OHAUS®.

Compactabilidad

La prueba de compactación de las mezclas se llevó a cabo en el Texturómetro Texture Analyzer TA-XT2 (Stable Micro Systems, Inglaterra), se utilizó una celda de carga de 50 kg y un dispositivo de placa plana de 5 cm de diámetro.

Las condiciones de prueba fueron las siguientes:

- Velocidad de acercamiento: 2 mm/s
- Velocidad de prueba: 1mm/s
- Velocidad de retirada: 2 mm/s
- Distancia de compactación: 2 mm
- Fuerza de contacto: 5g

Un molde de acero inoxidable con una cavidad interior con forma de prisma cuadrangular (Figura 14a) se colocó sobre la base de prueba del texturómetro (Figura 14b); en dicho molde se depositó la cantidad total de cada mezcla y éstas fueron cubiertas por un punzón con forma de prisma cuadrangular (Figura 14c). Posteriormente, se llevó a cabo la prueba de compactación (Figura 14 d) con ayuda de una placa plana de 5 cm de diámetro. Se realizó la compresión de 2 mm midiendo la fuerza en función de la distancia. La prueba se realizó por triplicado para cada una de las muestras, bajo las mismas condiciones.

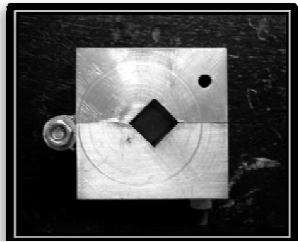


Figura 14 a. Vista superior del molde de acero inoxidable.



Figura 14 b. Colocación del molde en el texturómetro.

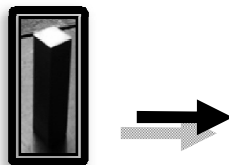


Figura 14 c. Punzón.

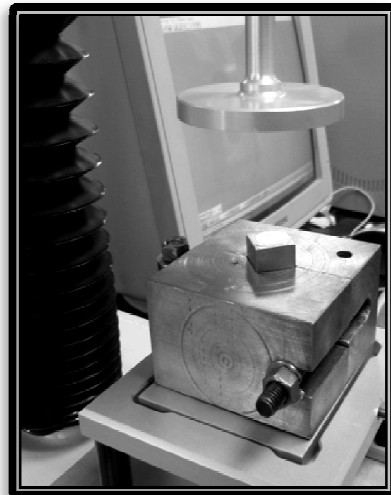




Figura 14 d. Prueba de compactación.

Por medio del software Texture Expert Exceed[®] se registraron y calcularon los parámetros correspondientes a: $F_{\text{máx.}}$ (N), pendiente “p” antes de llegar a la $F_{\text{máx.}}$ (N/s) y área bajo la curva (N.s) hasta la $F_{\text{máx.}}$; con fines de evaluación de la prueba, los parámetros mencionados anteriormente se expresaron de la siguiente manera: compactabilidad (N), resistencia a la compactación (N/s) y trabajo de compactación (N.s), respectivamente. El tipo de gráfico obtenido se presenta en la Figura 15.

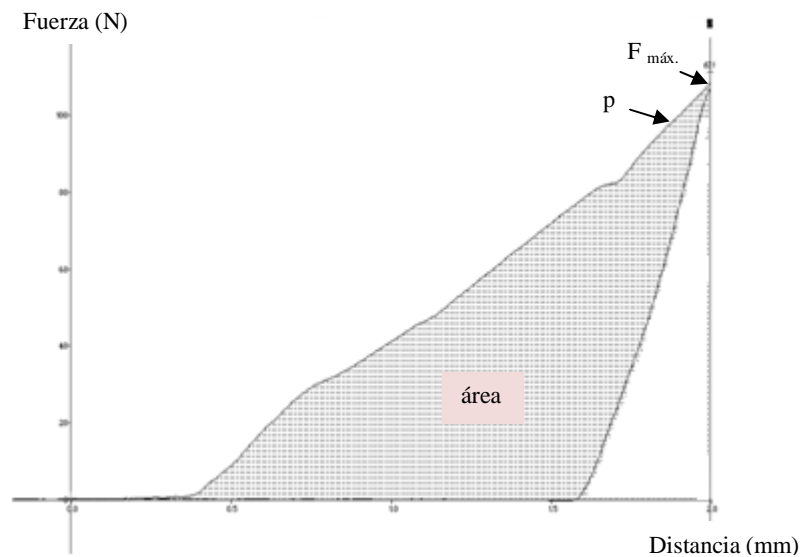


Figura 15. Curva modelo fuerza - distancia en prueba de compactabilidad.

2.3.6 Compactación de las mezclas para obtener los compactados de café soluble.

Para la elaboración de los compactados de café soluble y la evaluación de los mismos, se realizaron nuevas mezclas bajo las mismas condiciones descritas en el punto 2.3.4. Los compactados se obtuvieron con el equipo que se muestra en la Figura 16, el cual es una máquina de compactación que trabaja con aire a presión producido por un compresor. Sobre la base del equipo se colocó el molde de acero inoxidable descrito físicamente en la prueba de compactabilidad; cada mezcla se depositó dentro de la cavidad del molde y se cubrió por el punzón con forma de prisma cuadrangular, posteriormente fueron compactadas. Al conectar el compresor al interruptor, el aire a presión fluye a través de una manguera hacia el compactador cuya función es ejercer la fuerza sobre el brazo del equipo para que éste a su vez comprima las mezclas; la presión del aire se manipuló con una válvula reguladora y dependiendo de la presión requerida se fijó con la misma y corroboró en la carátula del manómetro del compactador. El tiempo de compactación se controló con un cronómetro que se activaba al tener la presión requerida. Cada mezcla fue compactada bajo las condiciones de tiempo y presión de compactación que se presentan en el Cuadro 1 (ver página 34).



Figura 16. Máquina de compactación para el desarrollo de compactados de café soluble.

Una vez terminado el proceso de compactación directa, los compactados se desmoldaron y colocaron en lotes de 20 sobre una malla de acero inoxidable, la cual se introdujo en una estufa de circulación de aire (ELISA®, México) a 50 °C por una hora (Figura 17). Previamente se observó que los compactados recién hechos son suaves, razón por la cual se secaron, con la finalidad de obtener compactados con mejores propiedades mecánicas por ser más duros al disminuir el contenido de humedad. Los compactados de café secos se sometieron a las pruebas que a continuación se describen.



Figura 17. Interior de la estufa de circulación de aire ELISA®.

2.3.7 Propiedades físicas y de solubilidad de los compactados de café soluble

Densidad

Se determinó por medio de la relación masa total (kg) / volumen del compactado (m^3). Los compactados se pesaron en una balanza analítica de laboratorio modelo Adventurer (OHAUS®, China) y la masa se reportó en kilogramos. Las dimensiones de L, l, a (longitud, largo y ancho, respectivamente), ver Figura 18, se midieron con un vernier digital (Mitutoyo®, Japón) y se calculó el V con la ecuación 2. La medición se realizó en cinco compactados para cada formulación, bajo las mismas condiciones.

$$V = L * l * a \dots\dots\dots \text{ecuación 2}$$

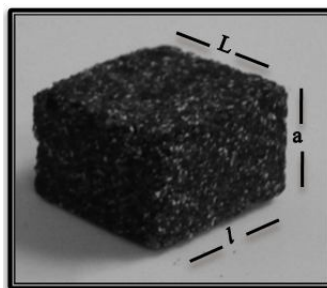


Figura 18. Dimensiones para el cálculo de volumen.

Color

Se utilizó el colorímetro CR300 (Minolta, Japón) de la Figura 19, con iluminante estándar *C* y observador patrón de 2°. El equipo fue calibrado con una placa blanca de porcelana.

El funcionamiento del colorímetro consiste básicamente en iluminar la muestra con luz blanca y calcular la cantidad de luz que refleja dicha muestra en una serie de intervalos de longitudes de onda. El estímulo luminoso, producto de la reflexión de la luz que ilumina en su superficie dirigida al observador, se divide en tres sensaciones: roja, verde y azul. Para cada longitud de onda a lo largo del espectro, se da lugar a los valores triestímulos *X*, *Y* y *Z*, con los cuales se han generado diferentes “espacios de color” y se calculan valores más concretos que determinan el color, los parámetros se muestran no como impresiones subjetivas sino en forma numérica precisa en una gran variedad de espacios de color, uno de los más populares es el CIE L^* , a^* , b^* . La L^* se refiere a la proporción de luz reflejada por un material que va desde una máxima hasta una mínima luminosidad, proporcionada por una escala de blancos y negros, respectivamente; “ a ” indica la tendencia hacia el color rojo-verde (rojo con valores positivos de “ a ” y verde con valores negativos, Figura 20) y “ b ” hacia el amarillo-azul (amarillo con valores positivos de “ b ” y azul con valores negativos, Figura 20), por ello, con la relación b/a , se puede definir la tendencia de dichos colores en un material. Se midieron los parámetros de color correspondientes al sistema L^* , a^* , b^* , en la cara uno y dos (Figura 21) de cada compactado de café. El parámetro h (tono) se calculó con la relación b/a (MacDougall, 2001). La prueba se realizó por quintuplicado para cada formulación compactada, bajo las mismas condiciones.

Cabe mencionar que en café soluble el color se evalúa o aprecia, pero no se considera un parámetro de calidad (NMX-F-139-SCFI-2004), para fines de la presente, el criterio de análisis de color se realizó para seleccionar un tono común en relación a la presentación de café soluble comercializado (predominando los tonos rojos), cuya importancia radica en que el consumidor se relacione con el tono del compactado por su grata apariencia a la vista.



Figura 19. Colorímetro Minolta CR300.

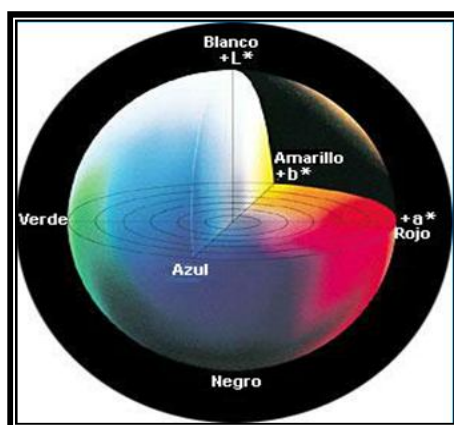


Figura 20. Espacio de color CIE L^* , a^* , b^* .

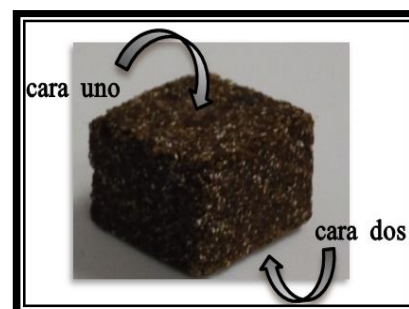


Figura 21. Caras de un compactado de café.

Dureza

Se efectuó una prueba de compresión sobre los compactados de café soluble en el Texturómetro Texture Analyzer TA-XT2 (Stable Micro Systems, Inglaterra), utilizando una celda de carga de 50 kg y un dispositivo de placa plana de 5 cm de diámetro.

Condiciones de prueba:

- Velocidad de acercamiento: 2 mm/s
- Velocidad de prueba: 1mm/s

- Velocidad de retirada: 2 mm/s
- Distancia de compactación: 1.3 mm
- Fuerza de contacto: 50 g

La prueba consistió en medir la fuerza a los 1.3 mm de distancia en compresión de cada uno de los compactados colocados sobre la base del texturómetro. La prueba se realizó en cinco compactados para cada formulación.

Por medio del software Texture Expert Exceed[®] se registraron y calcularon los parámetros correspondientes a: $F_{m\acute{a}x}$ (N), distancia hasta la $F_{m\acute{a}x}$ detectada (mm), pendiente “p” antes de llegar a la $F_{m\acute{a}x}$ (N/s) y área bajo la curva (N.s) hasta la $F_{m\acute{a}x}$; con fines de evaluación de la prueba los parámetros mencionados anteriormente se expresaron de la siguiente manera: dureza (N), fracturabilidad (mm), resistencia a la fractura (N/s) y trabajo de compresión (N.s), respectivamente. El tipo de gráfico obtenido se presenta en la Figura 22.

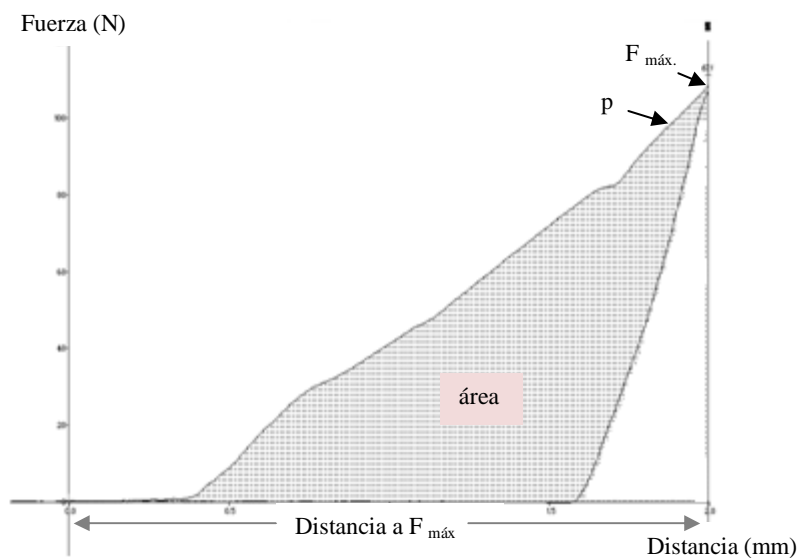


Figura 22. Curva modelo fuerza - distancia en prueba de compresión de compactados de café soluble.

Solubilidad

Se llevó a cabo con la finalidad de evaluar al fenómeno cualitativo del proceso de disolución, por lo que se estudió el tiempo que tardaron los compactados en disolverse para obtener una disolución de café en agua. La prueba se realizó simulando al movimiento manual al preparar una bebida de café, con una agitación mecánica por medio de una parrilla con agitación magnética.

La cantidad de café soluble en el desarrollo de los compactados fue de 1.5 g para cada formulación, dicha determinación fue en base a que una cucharadita equivale aproximadamente a 1.5 g de café soluble. Considerando dos cucharaditas para preparar una taza de café, se estableció que se necesitaban dos compactados para preparar 250 mL de la bebida (una taza).

La prueba de solubilidad se realizó para media taza de café por lo que se vertió 125 mL de agua purificada en un vaso de precipitados de 400 mL, representando el tamaño y forma de la base del vaso al de una taza común. Posteriormente se calentó en el horno de microondas por dos minutos llegando a una temperatura de $86\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, en seguida se colocó sobre una parrilla (CIMAREC®, Malasia), con una barra magnética de 5 cm de largo, se agregó un compactado de café y se inició la agitación mecánica a velocidad de rotación constante; la barra magnética cubrió el fondo del vaso al rotar sobre el mismo, simulando así una mejor agitación manual. Mediante pruebas preliminares se determinó un tiempo de disolución para cada formulación compactada, con dichos tiempos, se realizaron cinco repeticiones bajo las mismas condiciones para cada corrida experimental con la finalidad de corroborar que los compactados se disolvían completamente hasta formar una disolución de café, es decir, sin presencia de grumos. El acondicionamiento de la prueba se puede apreciar mejor en la Figura 23.

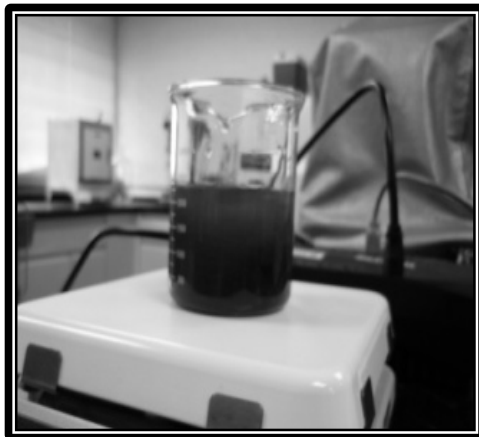


Figura 23. Prueba de disolución.

Para las propiedades físicas tanto de las mezclas como de los compactados se calculó la media (\bar{X} , ver Apéndice), desviación estándar (σ), y el coeficiente de variación (C.V., ver Cuadro 2), con la finalidad de estudiar la variabilidad de las propiedades respecto a la media de las mismas. Los coeficientes de variación se presentan en el Cuadro 2, de los cuales se puede observar que la variabilidad es baja tanto para la densidad global, distribución de tamaño de partícula y humedad de las mezclas, así como para la densidad y color (L y h) de los compactados, y por lo tanto los datos de cada corrida experimental para cada una de las pruebas mencionadas son confiables. Sin embargo se obtuvieron algunos coeficientes de variación altos, tanto en la compactabilidad, resistencia a la compactación y trabajo de compactación de las mezclas, así como en dureza, resistencia a la fractura, fracturabilidad y trabajo de compresión de los compactados; este comportamiento se debe a que las pruebas mecánicas son muy sensibles a la heterogeneidad de las muestras, los coeficientes de variación de más del 50% se registraron en las corridas con los niveles bajos y medios de sorbitol y presión de compactación.

Una vez evaluada la validez de las mediciones realizadas con ayuda de las medidas de dispersión ya citadas, se registraron las medias experimentales de cada prueba (\bar{X} , ver Apéndice) en el diseño Taguchi L27 (3**), con el objetivo de evaluar y conocer el factor con mayor efecto en las propiedades antes mencionadas.

Cuadro 2. Coeficientes de variación (%) de las propiedades físicas y solubilidad.

Coeficientes de variación (%) de las propiedades físicas de las mezclas							Coeficientes de variación (%) de las propiedades físicas y solubilidad de los compactados de café soluble							
Mezcla	ρ	θ p. (mm) 80% mezcla	Humedad	Compacta- bilidad	Resistencia	Trabajo de Compac- tación	ρ	Color (L)	Color (h)	Solu- bilidad	Dureza	Resisten- cia a la fractura	Fractura- bilidad	Trabajo de Compre- sión
Formulación 1	0.01	0.79	6.18	12.01	2.67	17.77	12.0	2.03	0.53	*	16.28	17.55	36.79	32.81
Formulación 2	0.12	2.13	3.40	9.05	18.92	11.03	2.04	4.66	1.13	*	15.47	22.76	10.40	15.09
Formulación 3	0.08	1.52	2.42	34.75	45.02	36.55	1.16	3.22	1.07	*	12.83	27.55	0.00	23.03
Formulación 4	0.15	4.26	0.52	12.31	13.91	14.39	1.28	4.39	1.16	*	12.44	57.62	9.71	10.43
Formulación 5	0.03	1.11	0.52	1.38	17.24	1.62	6.01	2.69	1.22	*	1.92	7.42	0.00	11.54
Formulación 6	0.06	0.23	12.52	22.42	35.74	7.33	0.15	3.11	0.95	*	18.56	38.73	1.34	44.41
Formulación 7	0.07	1.34	14.60	19.49	18.77	27.77	4.65	3.87	0.98	*	16.46	7.59	16.27	16.52
Formulación 8	0.02	0.73	9.48	1.21	7.60	9.89	0.08	3.48	1.32	*	12.73	0.00	5.34	11.56
Formulación 9	0.02	0.32	13.68	9.25	5.66	2.30	0.88	7.52	2.54	*	14.64	20.14	0.00	24.51
Formulación 10	0.03	1.44	1.52	15.63	13.01	21.30	1.14	1.13	0.42	*	16.50	15.04	11.85	7.96
Formulación 11	0.06	0.56	4.85	24.85	14.17	25.32	0.76	4.00	1.00	*	17.30	47.22	0.00	18.06
Formulación 12	0.54	2.20	0.21	18.55	1.76	16.39	0.53	2.36	1.36	*	23.08	4.49	18.16	25.34
Formulación 13	0.05	0.24	3.16	19.69	21.11	17.87	0.20	1.19	1.03	*	23.83	30.13	11.85	6.64
Formulación 14	0.03	0.24	2.79	6.08	33.82	0.37	0.34	2.78	1.33	*	19.89	30.81	8.33	21.30
Formulación 15	0.05	0.05	7.16	2.76	14.62	1.32	0.35	3.40	1.06	*	23.43	18.40	0.00	31.68
Formulación 16	0.36	0.01	2.19	13.70	39.32	2.02	0.35	1.96	0.75	*	40.49	46.64	20.75	43.56
Formulación 17	0.35	0.65	2.22	22.12	21.02	19.30	1.14	1.89	1.05	*	8.77	14.84	11.11	5.69
Formulación 18	0.26	0.24	8.27	6.17	29.75	0.55	0.57	2.16	1.59	*	12.45	12.70	0.00	16.50
Formulación 19	0.21	0.22	8.14	0.10	11.39	12.24	6.85	2.05	1.31	*	41.39	71.84	21.61	37.76
Formulación 20	0.04	0.88	2.09	3.50	12.91	10.92	0.51	1.98	0.84	*	21.05	9.16	0.00	26.82
Formulación 21	0.41	0.02	2.98	19.12	53.22	14.34	0.69	1.61	0.92	*	6.06	8.18	0.00	7.77
Formulación 22	0.13	0.10	3.87	27.89	16.80	28.63	0.89	2.17	0.70	*	17.73	83.86	7.28	15.80
Formulación 23	0.26	0.05	7.68	2.10	9.06	11.57	2.20	2.96	5.79	*	6.73	19.76	0.00	15.62
Formulación 24	0.19	0.23	5.29	31.70	37.85	33.46	1.25	3.30	1.61	*	5.95	29.46	0.00	17.92
Formulación 25	0.09	0.11	5.02	1.03	22.49	3.90	1.87	0.62	0.42	*	27.74	78.08	37.23	62.13
Formulación 26	0.10	0.09	2.69	6.34	15.43	5.06	0.24	1.54	0.58	*	2.48	23.97	0.00	1.50
Formulación 27	0.09	0.17	3.86	3.20	20.74	1.59	1.18	2.08	1.63	*	5.43	21.21	0.00	18.28

*Los tiempos para evaluar la solubilidad se obtuvieron mediante pruebas preliminares, de tal manera que se obtuvo un tiempo de disolución para cada corrida experimental que se evaluó por quintuplicado, consiguiendo así que el coeficiente de variación resultara de 0%.

CAPITULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los Cuadros 3 y 4 se muestran los valores promedios que obtuvo el análisis del diseño Taguchi L27 (3**) de las propiedades evaluadas en las mezclas y los compactados.

Cuadro 3. Valores promedios de las propiedades físicas de las mezclas.

ρ (kg/m ³)				θ p. (mm) 80% mezcla			Humedad (%)		
Nivel (+)	Tipo café	*D	**S	Tipo café	*D	**S	Tipo café	*D	**S
1	663	735.8	827.2	0.33	0.345	0.211	2.119	2.134	1.913
2	779.6	744.2	710.1	0.261	0.311	0.253	2.263	2.32	2.209
3	733.8	696.3	639	0.442	0.376	0.568	2.467	2.394	2.727
Mayor efecto	2	3	1	2	3	1	2	3	1

Compactabilidad (N)				Resistencia (N/s)			Trabajo de compactación (N.s)		
Nivel (+)	Tipo café	*D	**S	Tipo café	*D	**S	Tipo café	*D	**S
1	105.6	92.4	112.5	60.8	65.38	80.01	90.8	75.07	87.23
2	56.39	85.2	78.43	39.78	54.69	47.68	42.1	68.5	63.73
3	74.62	59.09	45.75	52.23	32.73	25.1	56.6	45.93	38.54
Mayor efecto	2	3	1	3	2	1	1	3	2

*Dextrosa; **Sorbitol; (+) concentración 1: baja, 2: media, 3: alta; el mayor efecto indica 1: primero, 2: segundo, 3: tercero; tipo de café 1: aglom., 2: liof., 3: atom.

Cuadro 4. Valores promedios de las propiedades físicas y solubilidad de los compactados de café.

ρ (kg/m³)					Color (L)					Color (h)					Solubilidad (s)					
Nivel (*)	Tipo café	*D	**S	***P	****t	Tipo café	*D	**S	***P	****t	Tipo café	*D	**S	***P	****t	Tipo café	*D	**S	***P	****t
1	825.6	970	892.2	847.8	920	34.41	36.34	39.71	38.07	39.36	1.562	1.938	2.073	1.982	1.9	6.889	9	5	7.222	9.55
2	1068	954.4	951.1	947.8	940	43.46	39.1	38.66	38.97	39.17	2.571	1.894	1.941	1.929	1.872	9.778	8.444	7.55	9.667	9.33
3	935.6	905.6	986.7	1034	970	37.92	40.35	37.42	38.75	37.25	1.653	1.954	1.772	1.876	2.014	10.77	10	14.88	10.55	8.55
Mayor efecto	1	4	3	2	5	1	2	3	5	4	1	5	2	4	3	2	4	1	3	5
Dureza (N)					Resistencia a la fractura (N/s)					Fracturabilidad (mm)					Trabajo de compresión (N.s)					
Nivel (*)	Tipo café	*D	**S	***P	****t	Tipo café	*D	**S	***P	****t	Tipo café	*D	**S	***P	****t	Tipo café	*D	**S	***P	****t
1	176.0	175.0	44.47	148.6	209.1	49.04	66.31	11.82	42.19	70.67	1.036	1.033	0.598	0.952	1.027	86.69	90.33	13.76	77.98	111.7
2	168.3	201.5	218.7	195.4	176.6	49.22	54.20	78.73	46.84	47.87	0.991	1.044	1.187	1.003	1.02	86.76	107.4	118.8	98.73	95.76
3	227.4	195.2	308.6	227.7	186.0	97.18	74.93	104.9	106.4	76.91	1.042	0.992	1.283	1.114	1.022	125.7	101.4	166.5	122.4	91.73
Mayor efecto	3	5	1	2	4	3	5	1	2	4	4	3	1	2	5	3	5	1	2	4

*Dextrosa, **Sorbitol, ***Presión, ****tiempo; (*) concentración o condición de proceso 1: baja, 2: media, 3: alta; el mayor efecto indica 1: primero, 2: segundo, 3: tercero, 4: cuarto, 5: quinto; tipo de café 1: aglom., 2: liof., 3: atom.

3.1 Caracterización de las mezclas para desarrollar compactados de café soluble

En el Cuadro 5 se registró el análisis de varianza del diseño Taguchi, efectuado con un 95% de confianza y un nivel de significancia (α) del 0.05; se reportó para cada propiedad de las mezclas, los factores que tuvieron influencia, el % de la misma y el valor de la probabilidad (P). Se observa que el sorbitol y la interacción café-sorbitol tuvieron el mayor porcentaje de influencia sobre las propiedades físicas de las mezclas; el tipo de café soluble no tuvo efecto significativo sobre la resistencia; la interacción tipo de café-sorbitol no tuvo efecto significativo sobre la densidad global y la humedad. Asimismo se observa que la dextrosa anhidra no tuvo efecto significativo sobre la distribución de tamaño de partícula, compactabilidad, trabajo de compactación y densidad global, sólo en la resistencia y humedad.

Cuadro 5. *Análisis de varianza de las mezclas, porcentaje de influencia de los factores de variación.*

Variable	θ p. 80% mezcla (mm)		Compactabilidad (N)		Resistencia (N/s)		Trabajo de compactación (N.s)		ρ global (kg/m ³)		Humedad (%)	
	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P
*S	52.87	0	27.14	0.009	34.45	0.001	19.66	0.019	34.32	0.007	67.16	0
**D		n.s		n.s	12.53	0.012		n.s		n.s	7.10	0.033
Café	11.56	0.024	15.12	0.039		n.s	20.74	0.017	13.10	0.047	12.09	0.008
Int. café*S	22.21	0.017	30.12	0.026	22.30	0.01	31.39	0.021		n.s		n.s
E. Residual	7.57		12.16		6.26		0.12		13.61		5.26	

*S: Sorbitol; **D: Dextrosa; n.s: no significativo, con $P < \alpha$, el factor tiene efecto significativo, $\alpha=0.05$

Para el análisis de resultados se presentó en gráficos de barras (valores del Cuadro 3, ver página 48), solamente los factores que tuvieron efecto significativo y el mayor porcentaje de influencia con base en el análisis taguchi (Cuadro 5).

3.1.1 Densidad global de las mezclas. Bajo las concentraciones de los coadyuvantes determinadas y evaluadas en el presente proyecto, se puede observar en la Figura 24 que el sorbitol fue el factor que tuvo mayor efecto (34.32%); a mayor concentración se obtuvo la menor densidad de las mezclas, esto se debió a su efecto diluyente que aumenta el volumen de los polvos y favorece la formación de aglomerados (Voigt, 1982), por lo que una mayor cantidad de sorbitol se reflejó en un aumento del volumen y por lo tanto en un decremento de la densidad de las mezclas.

El tipo de café siguió en influencia al sorbitol con 13.10%. En el Cuadro 6 se muestran las propiedades de los cafés solos. En la Figura 24, se sigue observando la influencia del sorbitol, ya que solos, el café más denso es el atomizado (molido) por tener un menor tamaño de partícula al estar molido, ocupando un menor volumen, y el menos denso es el liofilizado ya que presenta un gránulo de mayor tamaño ocupando así más volumen (Cuadro 6). Sin embargo el comportamiento se invierte al estar en mezcla con el sorbitol, ya que éste le brinda una menor densidad al atomizado (molido) en comparación con el liofilizado; lo que indica que, al ser molido el café atomizado, queda constituido por una mayor cantidad de pequeñas partículas, propiciando así que la capa de sorbitol formada entre ellas (Matthew et al., 1996) de lugar a una mayor cantidad de aglomerados que ocupan un mayor volumen. Por otro lado, en el Cuadro 6 se muestra que la humedad del café liofilizado solo, es menor en comparación a los demás, por lo que el sorbitol como agente aglutinante tiende más a penetrar y humectar cada gránulo (Remington, 2003), en vez de formar la capa entre los mismos, manteniendo así un volumen bajo en comparación a las otras mezclas. Las mezclas obtenidas con el café aglomerado tuvieron la menor densidad, ya que los gránulos contienen más humedad que los del liofilizado, y por lo tanto los gránulos de café aglomerado no tienden a absorber el sorbitol permitiéndole formar la capa entre ellos, ésto, aunado a su mayor tamaño en comparación a los del atomizado (molido), propició un mayor volumen y por tanto una menor densidad.

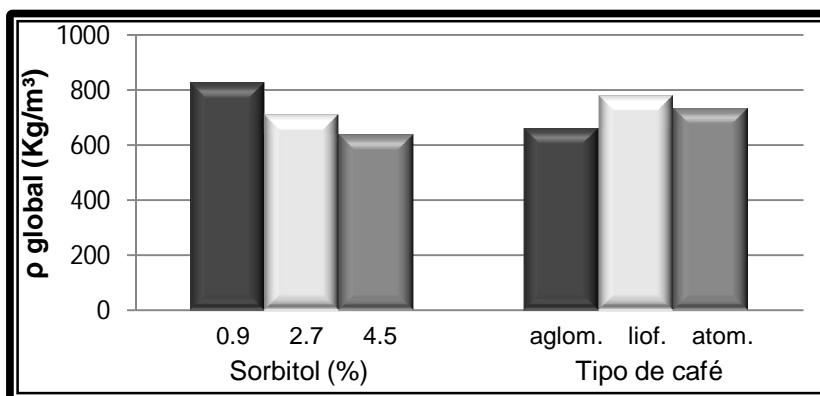


Figura 24. Efecto del sorbitol y del tipo de café soluble sobre la densidad global de las mezclas.

Cuadro 6. Densidades globales, humedades y distribución de tamaño de partícula experimentales de los tipos de café solos.

Tipo de café soluble	ρ (kg/m ³)	Humedad (%)	% de café soluble que pasa por malla 80
Liofilizado	360	4.74	20
Aglomerado	500	4.96	42
Atomizado (molido)	680	5.44	68

3.1.2 Distribución de tamaño de partícula de las mezclas. La Figura 25 muestra que el mayor efecto (52.87%) se debió al sorbitol, se observó que a mayor concentración formó aglomerados en la mezcla de mayor tamaño. Al disminuir la concentración de sorbitol decreció el diámetro promedio hasta el cual se retuvo el 80% de las mezclas. La aglomeración de los gránulos a mayor concentración de sorbitol, se debió al efecto aglutinante de dicho coadyuvante, brindándole una mayor cohesividad a las partículas de la mezcla por medio de la formación de fuerzas intermoleculares de Van der Waals, lo cual, se reflejó en la obtención de un mayor diámetro promedio de las mismas (Remington, 2003).

Únicamente un 32% del 100% del café atomizado (molido) solo, se retuvo en la malla de menor diámetro (0.177 mm), por lo que fue el tipo de café con el menor diámetro promedio (Cuadro 6), sin embargo, los gránulos al contener mayor humedad solos y al mezclarse con el sorbitol tienden más a aglomerarse, debido a la cohesividad impartida por el aglutinante, por lo que las mezclas con este tipo de café fueron las que tuvieron mayor diámetro promedio hasta el cual se retuvo el 80% de las mismas.

El café aglomerado tiene menor humedad que el atomizado (molido), por lo que las fuerzas intermoleculares con las moléculas del sorbitol (Voigt, 1982), fueron menores para formar las fuerzas cohesivas y con ellas la aglomeración de los gránulos, provocando con ello, un menor diámetro promedio de las mezclas en comparación a las mezclas con el café atomizado (molido).

Al penetrar el sorbitol en las partículas del liofilizado, no logra humedecerlas completamente, por el menor contenido de agua de las partículas, siendo contraproducente al efecto aglutinante y a su vez a la aglomeración de los polvos; es por ello, que el 80% de la mezcla con liofilizados pasó por los tamices con mayor facilidad hasta un diámetro promedio más pequeño.

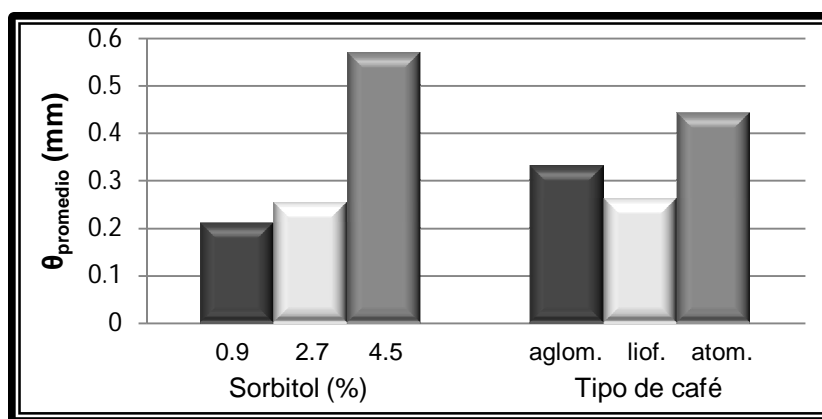


Figura 25. Efecto del sorbitol y del tipo de café soluble sobre el θ_{promedio} .

3.1.3 Contenido de Humedad. En la Figura 26, se muestra que el mayor efecto fue debido al sorbitol (67.16%). Se observa que al incrementar la cantidad de sorbitol, las mezclas obtienen un mayor contenido de humedad, por sus propiedades aglutinantes, lubricantes y humidificantes (Voigt, 1982). Asimismo, se observa que la dextrosa anhidra (con 7.10% de influencia) como aglutinante, mejora su capacidad de humectación a una mayor concentración.

Con respecto a los tipos de café, tuvieron 12.09% de influencia. Observamos que el atomizado (molido) al tener mayor humedad por sí solo, ésta aumenta con el sorbitol. En el caso del liofilizado, al ser de menor humedad, se esperaba que tuviera menor humedad en mezcla en comparación con el aglomerado; sin embargo se obtuvo lo contrario, la razón pudo haber sido que el sorbitol agregado al café aglomerado endureció un poco a los gránulos de la mezcla (Remington, 2003), haciendo que fuera más difícil la eliminación del contenido de humedad durante la prueba.

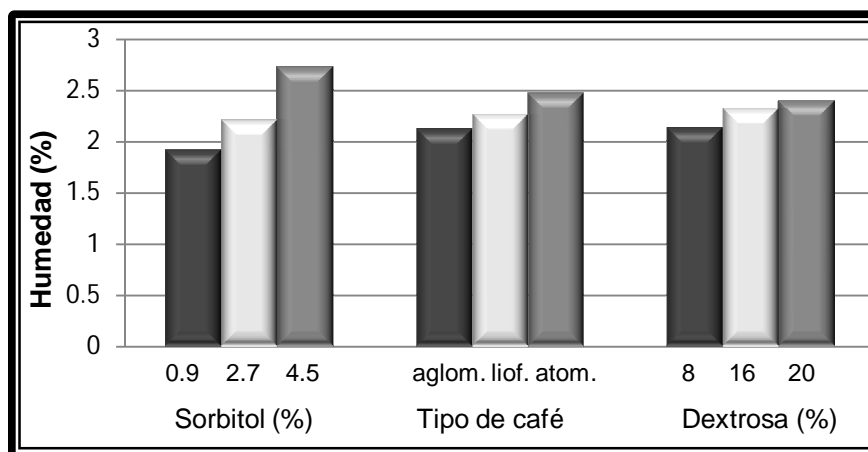


Figura 26. Efecto de los coadyuvantes de compresión y del tipo de café soluble sobre la humedad de las mezclas.

3.1.4 Compactabilidad. El sorbitol fue el factor con mayor influencia (27.14%) sobre la compactabilidad de las mezclas (Figura 27); con la mayor cantidad de sorbitol se obtuvieron mezclas más compresibles, requiriendo de una menor fuerza de compactación, ya que como diluyente posee buena capacidad de compresibilidad (Remington, 2003). Además, debido al carácter polar del sorbitol y de los gránulos con los que se encuentra en mezcla, se presentan fuerzas intermoleculares por medio de fuerzas de Van der Waals (Ruiz, 2010; Voigt, 1982), impartiendo cohesividad a las mezclas, la cual, aumenta durante la compresión, y con ello se favorece la compactabilidad, cumpliéndose así la funcionalidad aglutinante del sorbitol. Asimismo el sorbitol, desempeñó favorablemente su efecto lubricante al formar la capa que recubre a los gránulos individuales, brindando una baja resistencia a la compactación (Sameer et al., 2009).

El tipo de café tuvo un 15.12% de influencia en la compactabilidad. El mayor tamaño de partícula de las mezclas con el café atomizado (molido), dio lugar a una mayor compresibilidad al requerir de una menor fuerza para la compactación (Yan y Barbosa-Cánovas, 1997), en comparación con las mezclas de café aglomerado. Sin embargo, la compactabilidad no sigue la misma tendencia con las mezclas de café liofilizado, ya que éstas, a pesar de tener un menor tamaño de partícula, resultaron ser más compresibles en comparación a las mezclas con café atomizado (molido); la mayor compresibilidad de las mezclas con café liofilizado se le atribuye al bajo contenido de humedad, que propicia la fragilidad de los gránulos contribuyendo así a una mayor compresibilidad (Yan y Barbosa-Cánovas, 1997). Asimismo, la compresibilidad de las mezclas con café aglomerado es menor en comparación a las mezclas con liofilizado, debido a su mayor y menor contenido de humedad, respectivamente, dicha comparación se basa en las humedades experimentales de los cafés solos (ver página 52), ya que el resultado de contenido de humedad de las mezclas con café aglomerado no resulta razonable.

De la Figura 27, podemos generalizar que las mezclas más compresibles se obtuvieron con el 4.5% de sorbitol debido a la mayor humedad proporcionada por el coadyuvante, secundadas por las mezclas con café liofilizado, cuya característica radica en la fragilidad de los gránulos por efecto de una menor humedad (Yan y Barbosa-Cánovas,

1997), y en un tercer término las mezclas con café atomizado (molido) debido al mayor tamaño de partícula de las mismas.

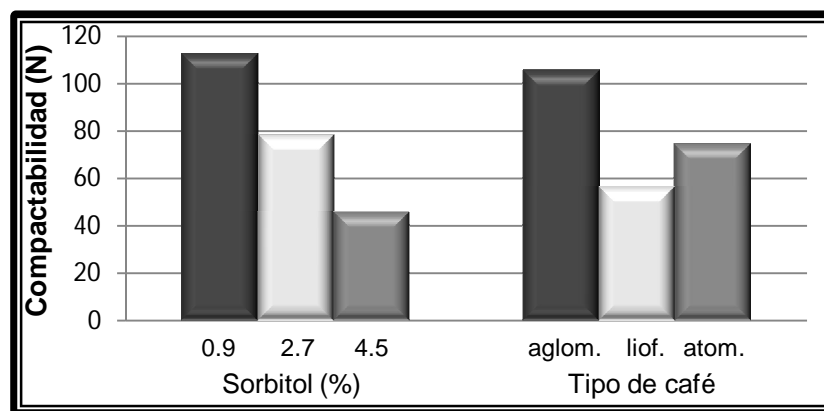


Figura 27. Efecto del sorbitol y del tipo de café soluble sobre la compactabilidad de las mezclas.

En la Figura 28 se muestran curvas de compactación de las mezclas con la mayor y menor fuerza de compactabilidad. La formulación cuatro (con 0.9% de sorbitol y café aglomerado) resultó ser la menos compresible por ser una de las mezclas con la menor concentración de sorbitol, la fuerza para compactarla hasta los 2 mm de distancia de compactación fue de 209.71 N (ver Apéndice). Por otro lado, la mezcla de la formulación seis (con 4.5% de sorbitol y café aglomerado) se compactó hasta los 2 mm con 12.09 N (ver Apéndice), siendo una de las mezclas con la mayor concentración de sorbitol y por lo tanto más compresible. Tal comportamiento, lo podemos corroborar con la pendiente de las curvas, ya que entre más grande sea, mayor resistencia ponen a la compactación y por lo tanto son menos compresibles; la resistencia (valor de la pendiente “p”) de la formulación cuatro fue de 122.74 N/s, y la seis de 10.88 N/s (ver Apéndice).

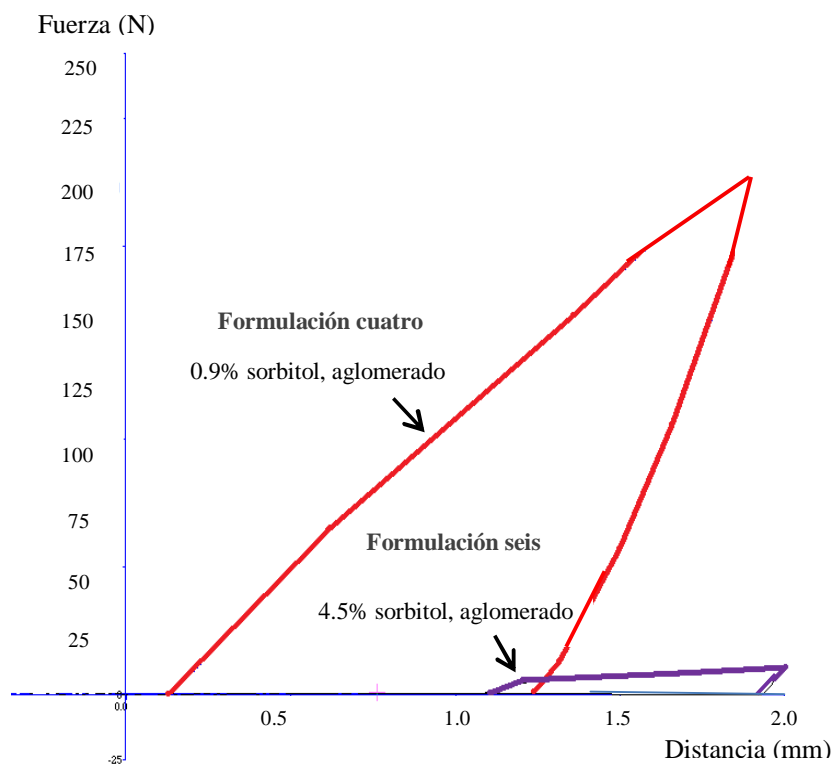


Figura 28. Curvas de compactación de las mezclas con la mayor y menor fuerza de compactabilidad.

Cabe mencionar que las formulaciones que secundaron a la mayor compactabilidad, fueron la formulación 21 y 27 con la mayor concentración de sorbitol (4.5%) y café atomizado, requiriendo de 20.29 N y 23.17 N, respectivamente (ver Apéndice); corroborando así la contribución de la humedad a las fuerzas intermoleculares para proporcionar mezclas de mayor compresibilidad.

3.1.5 Resistencia a la compactación. En la Figura 29 se observa que el sorbitol fue el factor que más influyó (34.45%), mostrando la misma tendencia que para la compactabilidad, es decir, al incrementarse la concentración de sorbitol, disminuye la resistencia a la compactación y la fuerza para compactar. La dextrosa anhidra tuvo un 12.53% de influencia; también se tiene que al aumentar la concentración hasta un 20%, aumenta la compresibilidad al impartir una menor resistencia a la compactación debido a su función diluyente (Remington, 2003); asimismo contribuyó dando cohesividad a las partículas por su función aglutinante, y por tanto una menor resistencia.

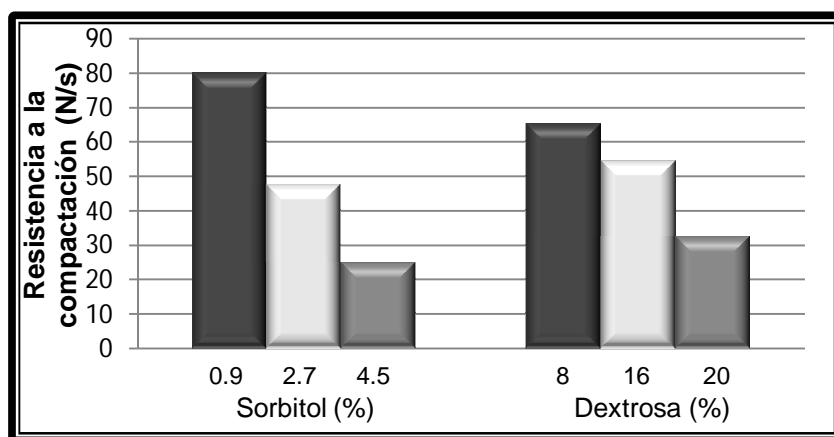


Figura 29. Efecto de los coadyuvantes de compresión sobre la resistencia de las mezclas.

3.1.6 Trabajo de compactación. El mayor efecto fue debido al tipo de café (Figura 30) con 20.74% de influencia, sin embargo, el comportamiento es el mismo que en el caso de las Figuras 27 y 29; indicando que las mezclas que son más compactables (menor fuerza de compactación) requieren de un menor trabajo de compactación.

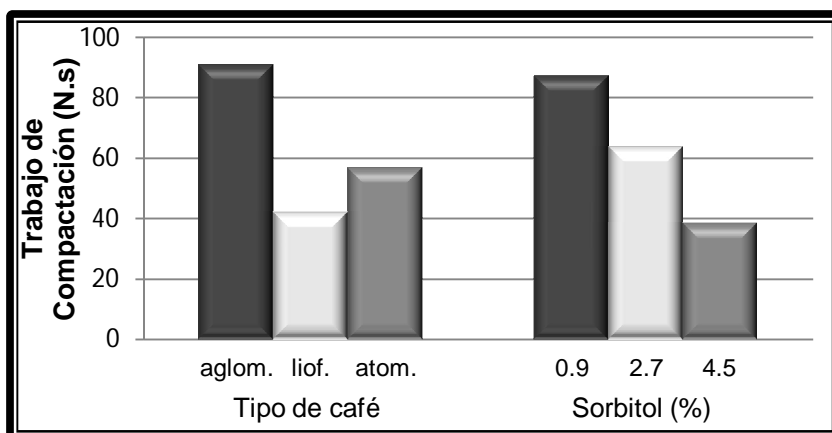


Figura 30. Efecto del tipo de café soluble y del sorbitol sobre el trabajo de compactación de las mezclas.

3.2 Propiedades físicas y de solubilidad de los compactados de café soluble

En el Cuadro 7 se registró el análisis de varianza del diseño Taguchi, efectuado con un 95% de confianza y un nivel de significancia (α) del 0.05; se reportó para cada propiedad de los compactados, los factores que tuvieron influencia, el % de la misma y el valor de la probabilidad (P). Se observa que la concentración de sorbitol fue el factor que tuvo mayor influencia sobre las propiedades mecánicas y solubilidad de los compactados; el tipo de café tuvo la mayor influencia sobre el color, e influyó en menor grado sobre la densidad, dureza y trabajo de compresión; la presión de compactación influyó sobre la dureza, fracturabilidad, trabajo de compresión y densidad; la dextrosa anhidra sólo tuvo efecto significativo sobre la luminosidad; la interacción café-sorbitol influyó sobre la dureza, trabajo de compresión y tono; y la interacción café-dextrosa sobre la densidad.

Cuadro 7. Análisis de varianza de los compactados de café soluble, porcentaje de influencia de los factores de variación.

Variable	Dureza (N)		Fracturabilidad (mm)		Resistencia a la fractura (N/s)		Trabajo de compresión (N.s)		ρ (kg/m ³)		Solubilidad (s)		Color (L)		Color (h)	
	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P	% Inf.	P
*S	79.91	0	87.78	0	35.37	0.035	76.67	0		n.s	61.33	0.009		n.s	5.98	0.008
**D		n.s		n.s		n.s		n.s		n.s		n.s	14.32	0.005		n.s
Café solb.	4.57	0.01		n.s		n.s	6.37	0.01	24.13	0.01		n.s	70.85	0	81.77	0
t (min)		n.s		n.s		n.s		n.s		n.s		n.s		n.s		n.s
P (kg/cm ²)	7.02	0.009	4.39	0.02		n.s	6.22	0.01	14.18	0.03		n.s		n.s		n.s
Int. café*S	4.20	0.05		n.s		n.s	5.29	0.04		n.s		n.s		n.s	7.14	0.01
Int. café*D		n.s		n.s		n.s		n.s	27.69	0.03		n.s		n.s		n.s
E. Res.	0.71		0.90		8.16		0.77		3.39		6.40		1.08		0.59	

*S: Sorbitol; **D: Dextrosa; n.s: no significativo, con $P < \alpha$, el factor tiene efecto significativo, $\alpha=0.05$

Para el análisis de resultados se presentó en gráficos de barras (valores del Cuadro 4, ver página 49), solamente los factores que tuvieron efecto significativo y el mayor porcentaje de influencia con base en el análisis Taguchi (Cuadro 7).

3.2.1 Densidad. Se obtuvieron compactados de 3.23 cm³ hasta 5.98 cm³. El factor con mayor influencia sobre la densidad de los compactados de café (Figura 31), fue el tipo de café con un 24.13%; los compactados más densos (menor volumen) se obtuvieron con el café liofilizado, ya que sus mezclas tuvieron mayor compresibilidad (Figura 27), y por lo tanto se obtuvo una mayor densidad (Figura 31) al comprimirlas con el compactador de la Figura 16. Asimismo, los compactados desarrollados con café aglomerado, al ser sus mezclas menos compresibles (Figura 27), resultaron tener una menor densidad (Figura 31).

La presión siguió al café en influencia sobre la densidad con 14.18%. La compactación incrementa la densidad de los materiales por efecto de la presión

mecánica (Mani, et al., 2006), por lo que el volumen disminuye conforme la presión de compactación aumenta (Figura 31).

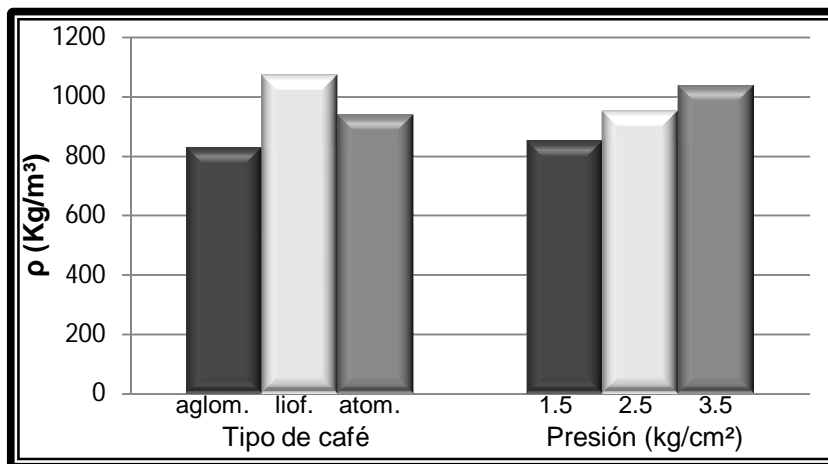


Figura 31. Efecto del tipo de café soluble y de la presión de compactación sobre la densidad de los compactados de café soluble.

3.2.2 Color. En la Figura 32 se observa que el tipo de café tuvo el mayor efecto, siendo los compactados con café liofilizado los de mayor luminosidad. La diferencia en luminosidad se puede deber a que los compactados con café liofilizado son menos oscuros que con café aglomerado y/o atomizado (molido).

La mayor cantidad de dextrosa le proporcionó a los compactados mayor luminosidad, debido a la percepción de puntos blancos, ya que las partículas de la dextrosa son cristalinas blancas (Remington, 2003). Las condiciones de compactación y el sorbitol no tuvieron efecto significativo (Cuadro 7).

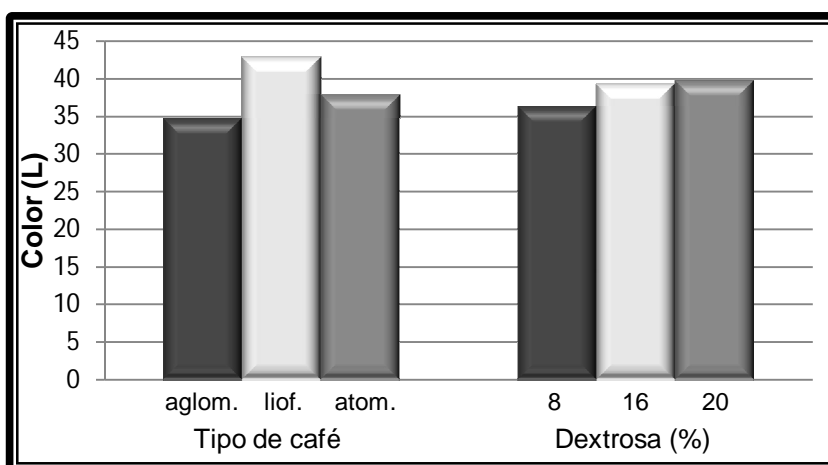


Figura 32. Efecto del tipo de café soluble y de la dextrosa sobre el color (L) de los compactados de café soluble.

El tono de los compactados expresado por el parámetro h, que describe la relación b/a (amarillo/rojo), se muestra en la Figura 33, en la que se presenta la mayor influencia por parte del tipo de café (81.77%); el tono de los compactados con café liofilizado tiende a los amarillos por tener una h más alta, mientras que los obtenidos con café aglomerado y atomizado (molido) tienden más a los rojos por tener una h más baja. A mayor concentración de sorbitol disminuyó el tono, provocando un oscurecimiento que tendió a los rojos. La dextrosa y las condiciones de compactación no tuvieron efecto significativo sobre el tono.

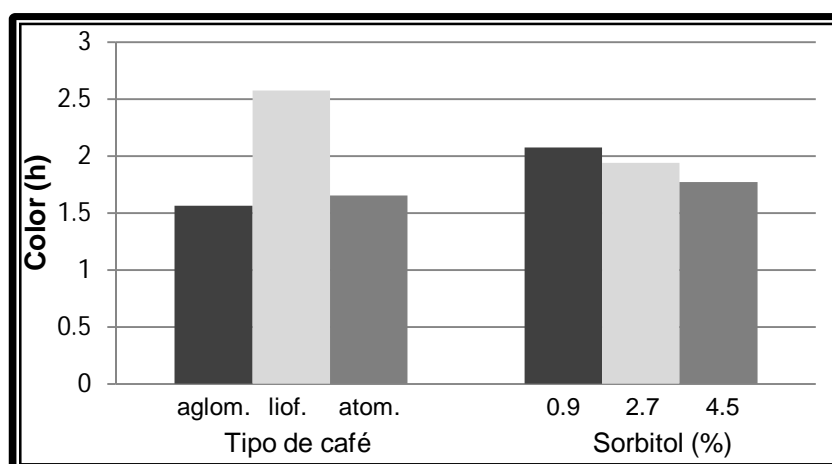


Figura 33. Efecto del tipo de café soluble y del sorbitol sobre el color (h) de los compactados de café soluble.

Con base en que los compactados de café presentaron tanto tonalidades amarillas y rojas, así como diferente luminosidad, la importancia de la evaluación de color radica en seleccionar compactados con parámetros de color agradables a la vista, pero que además y en conjunto a las otras propiedades evaluadas, sean compactados con propiedades mecánicas que permitan su fácil manejo y una adecuada solubilidad.

3.2.3 Dureza. En la Figura 34 se muestra que el mayor efecto fue debido al sorbitol (con 79.91% de influencia), a una mayor concentración se obtuvieron los compactados más duros (identificados por la Fza_{max}), lo cual se debió a su efecto aglutinante al proporcionarles cohesividad, y con ello, mayor fuerza intermolecular (Voigt, 1982). La consolidación aumentó debido a la cohesión entre las partículas, acorde a lo mencionado por Guan y Zhang (2009), es decir, la fuerza mecánica del material aumenta a consecuencia de las interacciones partícula-partícula, resumidas como fuerzas de Van der Waals, consiguiendo así compactados más duros. Por otro lado, la capacidad de compresibilidad que caracteriza al sorbitol como diluyente, promueve la mayor interacción partícula-partícula y por tanto la cohesión entre las mismas.

La presión de compactación fue el factor que le siguió en influencia al sorbitol (con 7.02% de influencia), conforme se aumentó la presión de compactación incrementó la dureza, lo que está de acuerdo con Guan y Zhang (2009), quienes mencionan que a mayor presión de compactación incrementa la cohesión de las partículas y por lo tanto aumenta la dureza de los compactados.

El tipo de café tuvo un 4.57% de influencia en la dureza. Aunque las mezclas más compactables fueron con el café liofilizado (Figura 27), sus compactados carecieron de propiedades cohesivas por lo que su dureza fue baja (Figura 34). Los compactados más duros fueron con el café atomizado (Figura 34), debido a la mayor fuerza cohesiva entre las partículas de los gránulos del atomizado, efecto atribuido a la mayor humedad de las mezclas. En comparación a los compactados con café atomizado, los de café aglomerado resultaron menos duros, ya que los gránulos de este tipo de café poseen como característica menor resistencia mecánica, al ser expuestos a impactos mecánicos o a vibración durante el procesamiento o transporte (Alvarado y Aguilera, 2001).

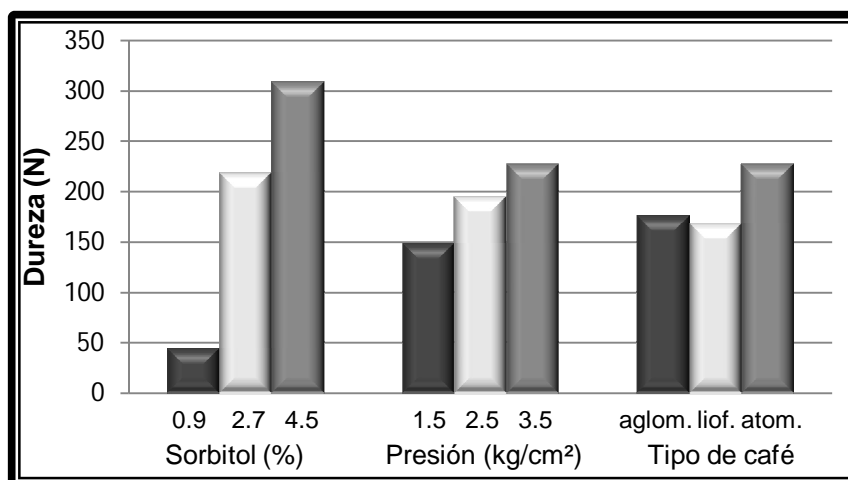


Figura 34. Efecto del sorbitol, presión de compactación y del tipo de café soluble sobre la dureza de los compactados de café soluble.

Para la prueba mecánica, se estableció que el equipo comprimiera los compactados 1.3 mm (distancia máxima propuesta), pero se observó que en algunos compactados, la fuerza máxima se obtenía a una distancia menor de 1.3 mm, lo que indicaba la fractura de los mismos; la distancia a la que se fracturan se denomina fracturabilidad, una mayor distancia implica un compactado menos fracturable.

En la Figura 35 se muestran las curvas obtenidas para los compactados con mayor y menor dureza. Con la formulación 24, se obtuvieron los compactados más duros, por ser una de las mezclas con la mayor concentración de sorbitol (4.5%) y compactada con la mayor presión (3.5 kg/cm²) (Cuadro 1, ver página 34), la fuerza máxima que soportaron hasta los 1.3 mm de compactación fue de 390.11 N (ver Apéndice), sin llegar a la ruptura. Los compactados menos duros, fueron con la formulación 22, siendo una de las mezclas con la menor concentración de sorbitol (0.9%) y compactada con la menor presión (1.5 kg/cm²) (Cuadro 1, ver página 34); la fuerza máxima detectada y a la cual se rompió el compactado fue de 6.53 N a los 0.40 mm de compactación (ver Apéndice).

La resistencia a la fractura (valor de la pendiente “p”) de los compactados desarrollados con la formulación 24 fue de 136.43 N/s, y de 5.49 N/s para la formulación 22 (ver Apéndice); por lo que, los compactados con mayor resistencia a la fractura y por

tanto los más duros, fueron los elaborados con la formulación 24. La influencia de la concentración del sorbitol sobre el café atomizado (molido) de ambas formulaciones, es notoria, favoreciendo a las fuerzas intermoleculares con 4.5% de sorbitol para producir compactados firmes y resistentes; efecto contrario al emplear 0.9% de sorbitol.

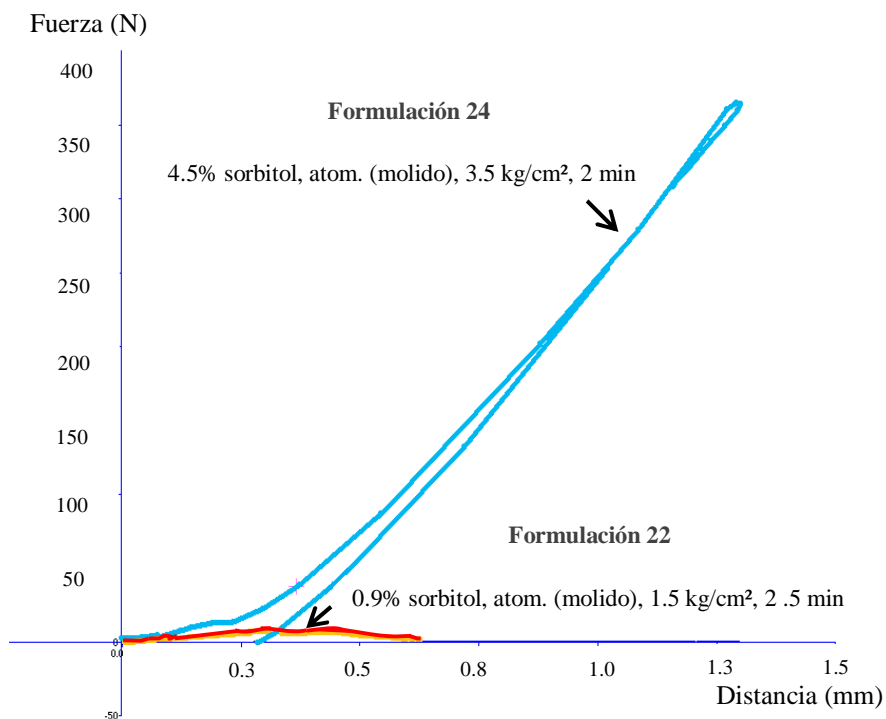


Figura 35. Curvas de compresión obtenidas para los compactados con mayor y menor dureza.

3.2.4 Resistencia a la fractura, fracturabilidad y trabajo de compresión. El sorbitol tuvo un 35.37% de influencia en la resistencia a la fractura. En la Figura 36 se observa que se necesita una mayor fuerza para fracturar a los de mayor concentración de sorbitol, por lo que éstos tienen una mayor firmeza y resistencia (Figura 36).

El sorbitol y la presión fueron los factores que más influenciaron en la fracturabilidad (87.78 y 4.39 %, respectivamente). Al incrementarse la concentración de sorbitol y la presión, aumentó la distancia a la que se fracturaban los compactados (Figura 37). La tendencia del comportamiento permanece igual para la presión y tipo de café, es decir los compactados más duros, alcanzaron la $F_{za.max}$ a mayor distancia y por tanto

tienen mayor resistencia, además de un mayor trabajo de compresión (Figura 38). La dextrosa y el tiempo no influyeron significativamente (Cuadro 7).

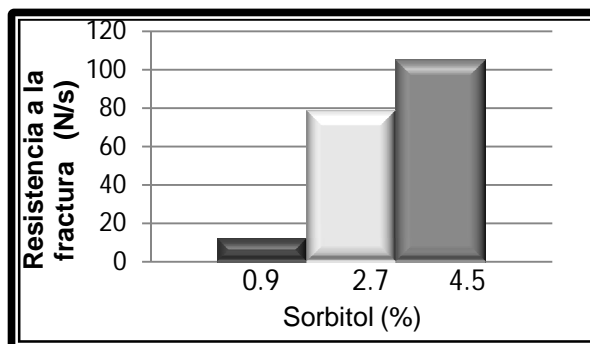


Figura 36. Efecto del sorbitol sobre la resistencia a la fractura de los compactados de café soluble.

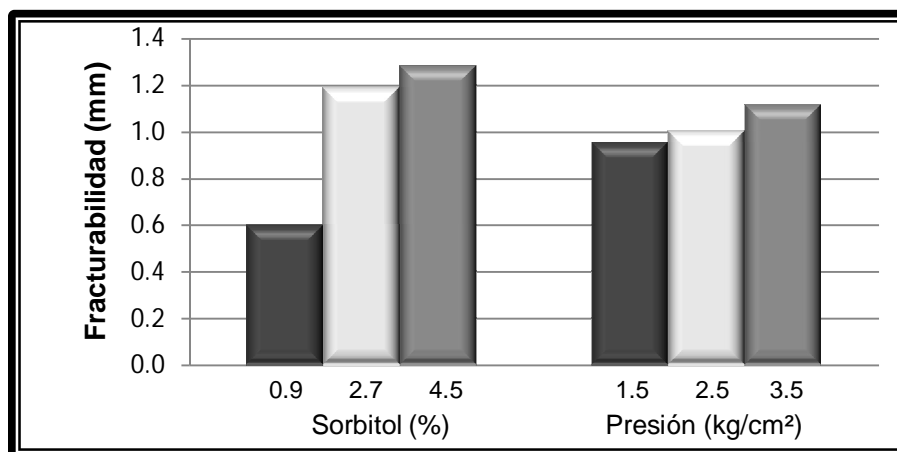


Figura 37. Efecto del sorbitol y de la presión de compactación sobre la fracturabilidad de los compactados de café soluble.

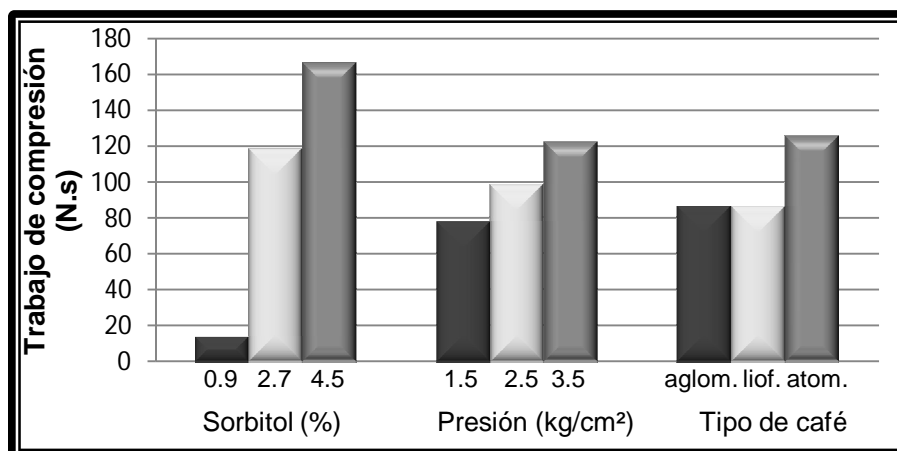


Figura 38. Efecto del sorbitol, presión de compactación y del tipo de café soluble sobre el trabajo de compresión de los compactados de café soluble.

3.2.5 Solubilidad. El mayor efecto sobre la solubilidad fue debido al sorbitol (Figura 39), con 61.33% de influencia. El máximo tiempo promedio de disolución (14.88 segundos) se obtuvo con la concentración más alta de sorbitol. Pudiendo generalizar, que la menor concentración de sorbitol como diluyente y desintegrante, imparte a los compactados propiedades disgregantes satisfactorias (Voigt, 1982); y que su empleo como aglutinante a mayores concentraciones produce compactados duros, reduciendo su desintegración.

La desintegración de los compactados se debe a un aumento en la velocidad de humectación, por lo que al emplear la menor concentración de sorbitol, la humectación fue más rápida, ya que se previno el efecto impermeabilizante que el coadyuvante posee como lubricante, además de producir compactados menos duros, evitando así una escasa desintegración o una disolución más lenta de los mismos (Remington, 2003; Voigt, 1982). Sin embargo, los compactados más duros producidos con la mayor concentración de sorbitol, se desintegraron en un tiempo no mayor a los 15 segundos; por lo que se puede concluir que es mejor el empleo del 4.5% del coadyuvante, ya que se obtienen compactados firmes y con un tiempo de disolución admisible, en comparación al tiempo máximo aceptable (30 segundos) de desintegración para los comprimidos vegetales hidrofílicos que se solubilizan en agua (Rodríguez, et al., 2003).

El motivo por el que el sorbitol proporciona tiempos cómodos para la desintegración de los compactados, es su carácter polar, por tener grupos hidroxilos, y al interaccionar con el agua, la hidrosolubilidad de los compactados se favorece. Además, durante el proceso de disolución, y bajo el correspondiente consumo de energía, se debilitan las fuerzas intermoleculares, y finalmente, se desligan totalmente, de forma que, en el caso ideal, los elementos quedan aislados unos de otros en el medio solvente (Voigt, 1982); en la presente, la energía consumida se refiere a la proporcionada por agitación mecánica y temperatura del medio solvente ($86\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$), la cual debió sobrepasar la energía de enlace, de manera que en general, favoreció los tiempos de disolución.

Ningún otro factor de variación tuvo efecto significativo sobre la solubilidad de los compactados (Cuadro 7).

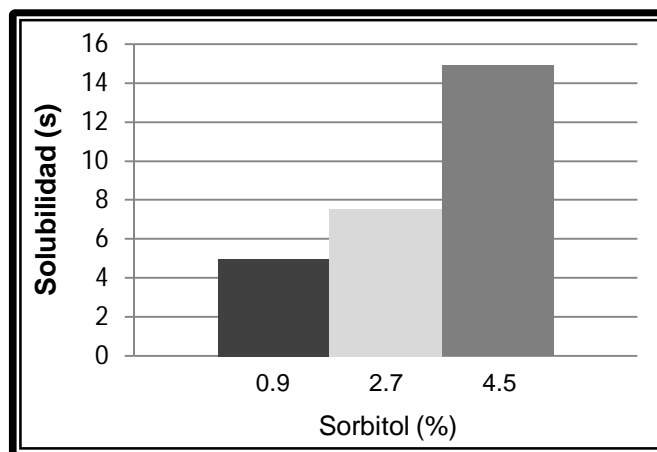


Figura 39. Efecto del sorbitol sobre la solubilidad de los compactados de café soluble.

3.3 Relaciones entre las propiedades físicas de las mezclas y de los compactados

En base a los factores de variación con mayor influencia, sorbitol y tipo de café, sobre la mayoría de los parámetros, de acuerdo al Análisis de Varianza del Cuadro 5 y 7 (ver página 50 y 60, respectivamente), se llevaron a cabo las siguientes relaciones.

En la Figura 40 podemos apreciar mejor la funcionalidad del sorbitol como diluyente, por proporcionarles volumen a las mezclas y con ello una menor densidad, y como aglutinante por brindarle cohesividad a las partículas de las mezclas; se tiene que a una mayor concentración, la fuerza cohesiva entre las partículas incrementa debido a las fuerzas intermoleculares formadas entre los grupos polares del sorbitol y la polaridad de las partículas con que interacciona. De las mezclas más compresibles, se obtuvieron los compactados más duros, esto es debido a que la fuerza cohesiva incrementa a medida que el material se compacta (Guan, 2009) y debido a que son mezclas más compresibles, se lleva a cabo una compactación más fuerte del material. Si se comparan las Figuras 40 y 42 se observa que con la compactación, la densidad global con la mayor concentración de sorbitol, incrementó de 639 kg/m^3 en las mezclas a 986.7 kg/m^3 en los compactados (Guan, 2009), es decir, con un mayor volumen en las mezclas (Figura 40), por la mayor cantidad de sorbitol, al ser compactadas, incrementa la fuerza de cohesión, resultando un compactado con una mayor densidad y por tanto con un menor volumen (Figura 42). En

cambio con la menor concentración de sorbitol, las mezclas tuvieron 827.2 kg/m^3 (Figura 40), y con la compactación solamente aumentó a 892.2 kg/m^3 (Figura 42).

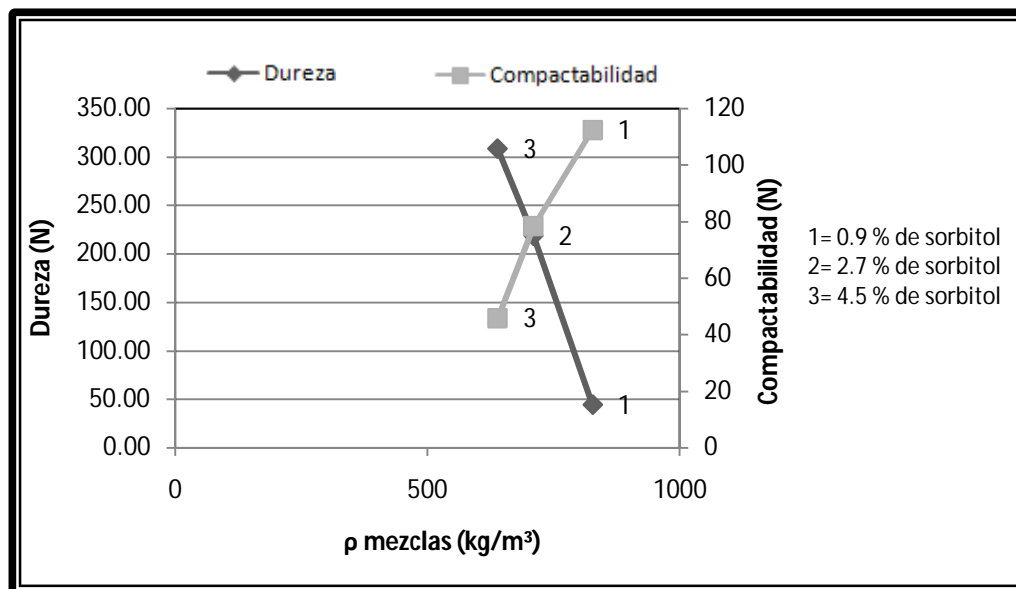


Figura 40. Efecto del sorbitol sobre la dureza de los compactados, densidad global y compactabilidad de las mezclas.

Las mezclas con el café atomizado (molido) fueron más compactables (Figura 41), y por lo tanto se obtuvieron compactados más duros en comparación a las mezclas con café aglomerado, lo cual es debido a una mejor humectación del sorbitol sobre las partículas del café atomizado, al estar molido y al tener mayor contenido de humedad. Caso contrario a lo que ocurrió con el liofilizado, ya que los de liofilizado fueron más compactables al tener un menor volumen de mezcla por compactar y mayor fragilidad en sus gránulos, sin embargo, por la falta de fuerzas intermoleculares, al tener menor cantidad de humedad, las fuerzas cohesivas disminuyeron y con ello la resistencia y dureza de los compactados.

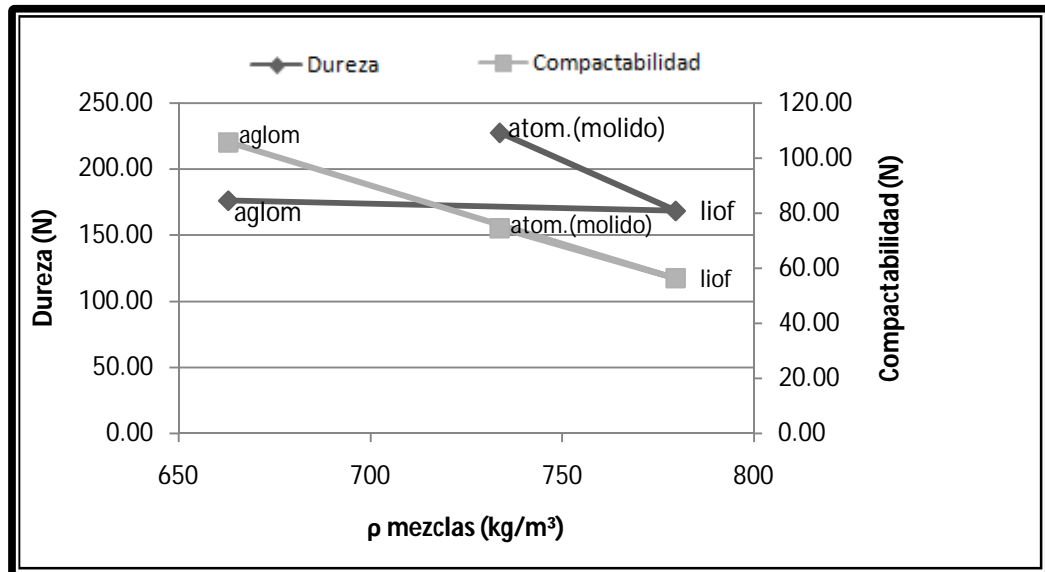


Figura 41. Efecto del tipo de café sobre la dureza de los compactados, densidad global y compactabilidad de las mezclas.

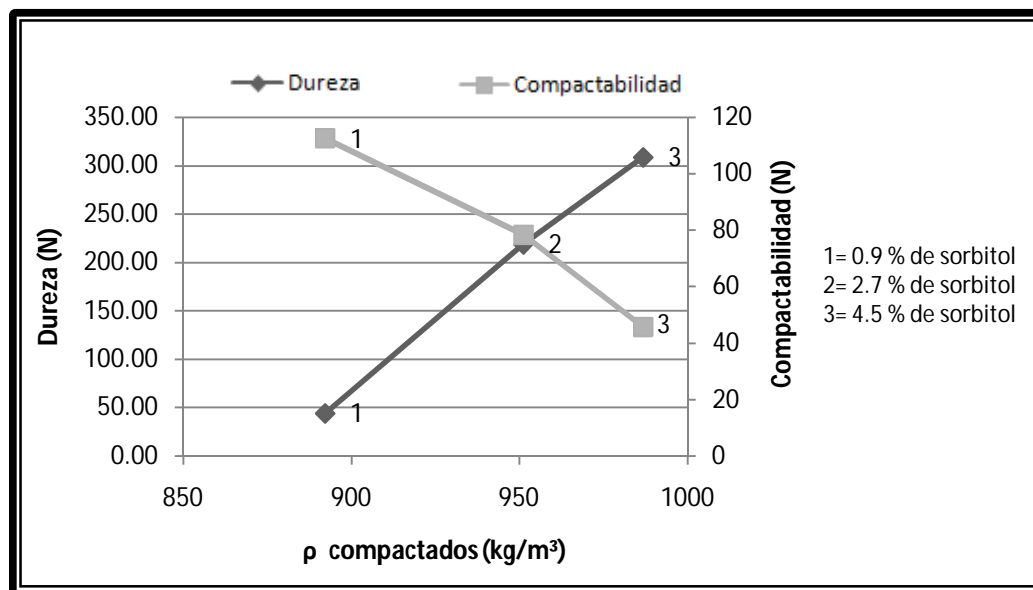


Figura 42. Efecto del sorbitol sobre la compactabilidad de las mezclas, dureza y densidad de los compactados.

En la Figura 43, se observa que el menor tamaño de partícula de las mezclas se obtuvo con la menor cantidad de sorbitol, secundando a la formación de pocos aglomerados, a consecuencia de una menor humectación de las partículas. Asimismo, a menor tamaño de partícula disminuye la compactabilidad, debido a que las partículas permanecen casi intactas durante la compactación al poseer un tamaño inferior (Alderborn, 1996), requiriendo con ello una mayor fuerza para ser compactadas; a su vez, al ser mezclas menos compresibles por su tamaño de partícula, y aunado a la limitada cohesividad proporcionada por el coadyuvante, propician mínimas fuerzas intermoleculares, y con ello, se generan compactados que carecen de firmeza y resistencia.

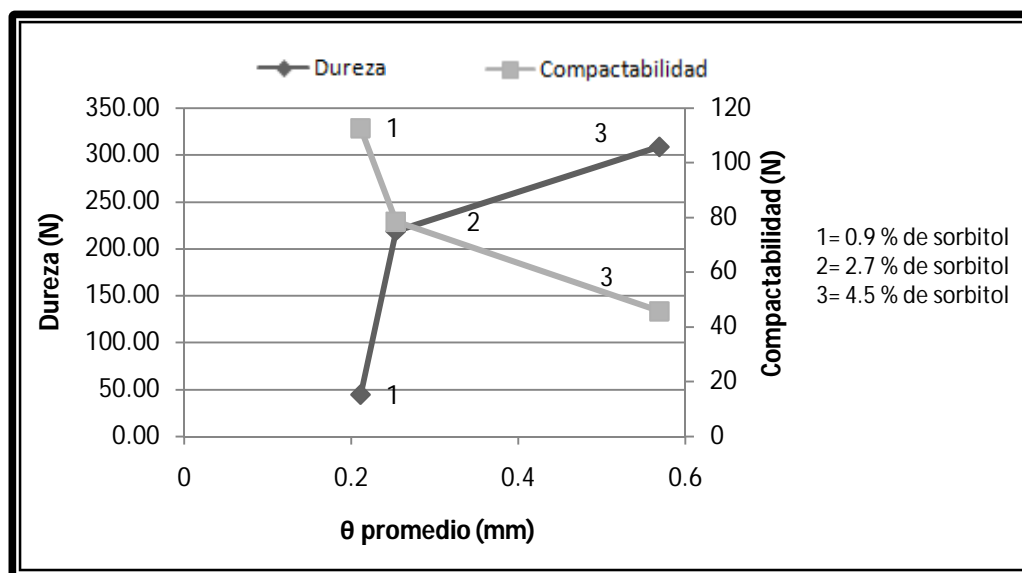


Figura 43. Efecto del sorbitol sobre la dureza de los compactados, θ_{promedio} y compactabilidad de las mezclas.

En la Figura 44 se observa que con el menor tamaño de partícula de las mezclas con café aglomerado, se requiere de mayor fuerza para la compactación, obteniéndose a su vez compactados menos duros, en comparación a las mezclas con café atomizado (molido), con las cuales, se obtuvieron los compactados más duros aunque no fueron las más compresibles en comparación con las de liofilizado. Al tener menor contenido de humedad, las mezclas de liofilizado son frágiles por lo que resultan ser más compresibles, sin embargo, los compactados producidos fueron los de menor firmeza, debido a las pocas fuerzas intermoleculares que se presentan en las mezclas con este tipo de café en comparación con las de café atomizado (molido), que por ser éstas últimas de mayor humedad, forman más fuerzas intermoleculares entre las partículas polares del agua residual contenida en su humedad y el sorbitol.

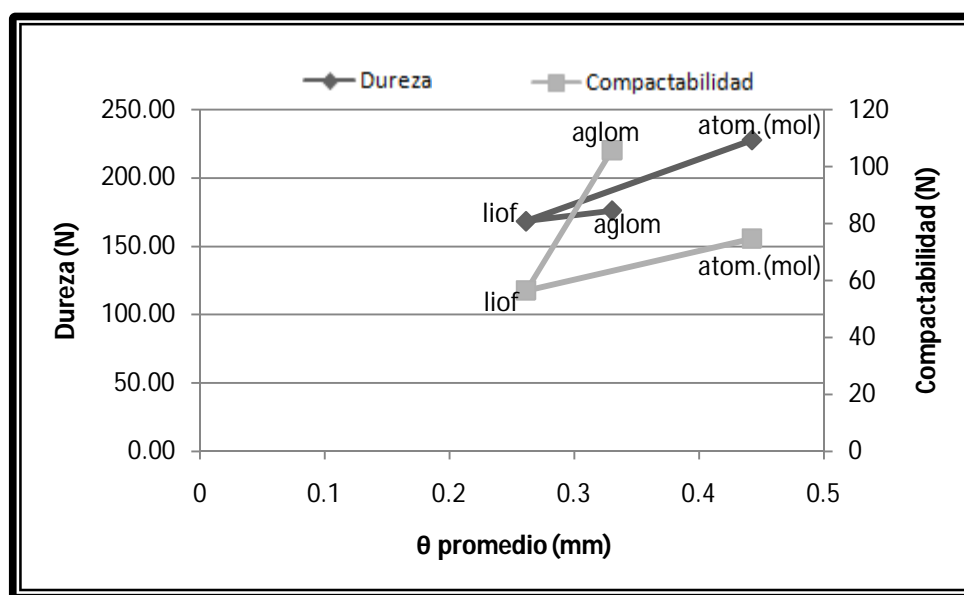


Figura 44. Efecto del tipo de café sobre la dureza de los compactados, θ_{promedio} y compactabilidad de las mezclas.

La solubilidad de los compactados, se vio afectada perjudicialmente al aumentar la concentración de sorbitol y a mayor contenido de humedad de los cafés (Figura 45); a pesar de que los mayores vestigios de humedad en los comprimidos debe acelerar la desintegración de los mismos (Voigt, 1982), dicha humedad, favorece al efecto del sorbitol como aglutinante, y con ello, a las fuerzas intermoleculares formando compactados duros, lo cual, reduce la desintegración de los mismos (Remington, 2003). Sin embargo, el tiempo máximo para la disolución fue de 14.88 segundos, por lo que se considera que el efecto del 4.5% de sorbitol como diluyente, desintegrante y humidificante, para coadyuvar a la desintegración de los compactados, resulta factible para la práctica cotidiana del preparado de una bebida instantánea; máxime, al compararlo con los 30 segundos, aceptables para la desintegración de comprimidos de carácter hidrófilo (Rodríguez, et al., 2003)

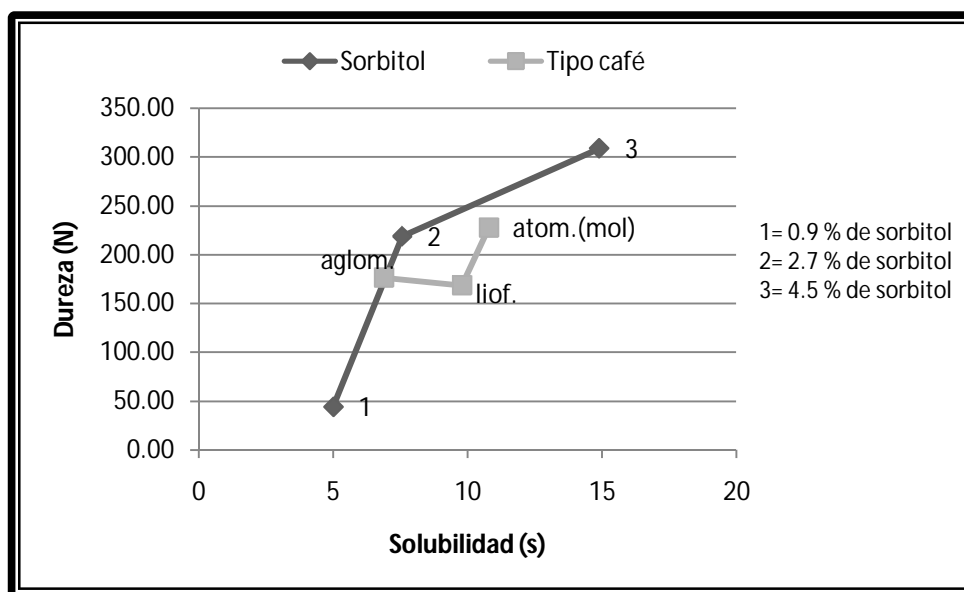


Figura 45. Efecto del sorbitol y tipo café sobre la dureza y solubilidad de los compactados.

CONCLUSIONES

- Conclusiones generales

En base a los resultados experimentales, y al análisis Taguchi L27 (3**) que permitió evaluar el efecto de los coadyuvantes y el tipo de café sobre las propiedades de las mezclas y los compactados, se concluye que para producir y garantizar compactados con alta resistencia mecánica para su manejo y una solubilidad característica para preparar una bebida instantánea, el empleo del 4.5% de jarabe de sorbitol ofrece los mejores resultados; asimismo, por el efecto que tiene el sorbitol sobre los gránulos de café, el de mejores propiedades físicas para el desarrollo de los compactados es el café atomizado (molido).

Es así, que la formulación 24 con café atomizado molido, la mayor concentración de sorbitol (4.5%) y la mayor presión de compactación (3.5 kg/cm²), se considera como la mejor formulación para producir los compactados, siendo una de las mezclas con el mayor diámetro promedio y humedad por lo que favoreció la compactabilidad de su mezcla, no fue una de las más compresibles ya que se requirieron de 72.19 N para su compactación (ver Apéndice), aunque tampoco fue una de las menos compresibles en comparación a la que requirió de 209.71 N (formulación 4, ver Apéndice); por otro lado, la mayor humedad proporcionada por el sorbitol y el tipo de café hace que las mezclas sean más cohesivas (Mani, et al., 2006), por lo que se favorece la formación de las fuerzas de Van der Waals correspondientes a puentes de hidrogeno, fuerzas directrices y de London (Ruiz, 2010; Voigt, 1982), entre los grupos hidroxilo del sorbitol y las moléculas de carácter polar que conforman al café, como la glucosa, cafeína, fructosa y xilosa (ver Tabla 2); las fuerzas intermoleculares aumentan durante el proceso de compactación debido a la interacción entre las partículas y a la presión de compactación aplicada (Mani, et al., 2006), propiciando que la cohesión incremente y con ello la fuerza mecánica del material,

obteniendo compactados con mayor dureza (390.11 N, formulación 24, ver Apéndice) y resistencia a la fractura (136.43 N/s, formulación 24, ver Apéndice). El tiempo de compactación no tuvo efecto significativo sobre ninguna propiedad, sin embargo, se obtuvo que a un menor tiempo de compactación, se obtienen compactados más firmes, lo que resulta una ventaja en la elaboración de los mismos.

Con base en que los compactados con bajo contenido de humedad, alrededor del 8%, y alta densidad, más de 600 kg/m^3 , son eficientes para su almacenamiento y transporte (Mani, et al., 2006), se estima que los compactados con las condiciones de la formulación 24 de 1015 kg/m^3 de densidad (con volumen de 5.09 cm^3) y 2.72% de humedad (ver Apéndice), además de tener la mayor resistencia mecánica, cumplen con las características para tal fin. Asimismo, al contener en la formulación 24 café atomizado molido y la mayor concentración de sorbitol (4.5%), se obtuvieron compactados con tendencia a los rojos, color considerado para la identificación consumidor-producto (compactado de café soluble) por su apariencia agradable a la vista.

Respecto al fenómeno del proceso de disolución, manejado en la presente como solubilidad, se considera que el tiempo de disolución de 15 segundos para la formulación 24 (ver Apéndice), resulta práctico y admisible para la preparación de la bebida instantánea, en comparación al tiempo máximo aceptable (30 segundos) de desintegración para los comprimidos de carácter hidrófilo.

Finalmente, para la presentación del café soluble en forma de compactados, se considera que con la formulación 24, se obtiene un equilibrio entre resistencia mecánica y desintegración.

- Conclusiones particulares

En relación al objetivo 1 y 2, el sorbitol tuvo el mayor efecto sobre las propiedades físicas de las mezclas así como en las propiedades físicas y de solubilidad de los compactados, obteniendo que la mayor concentración de sorbitol (4.5%) desempeñó una mejor funcionalidad como diluyente, aglutinante, lubricante y humidificante. El sorbitol como diluyente posee buena capacidad de compactabilidad, además otorga un mayor volumen en las mezclas propiciando una mejor compactación, y aunado a su efecto aglutinante que genera mayor tamaño de partícula, se obtuvieron mezclas de mayor compresibilidad y de menor resistencia a la compactación, y con ello, compactados con menor volumen y de mayor firmeza debido a las fuerzas intermoleculares de Van der Waals formadas con la contribución del aglutinante. El sorbitol como lubricante forma una capa que recubre a los gránulos individuales, ocasionando una baja resistencia a la compactación (Sameer et al., 2009), y por lo tanto mezclas con mayor compresibilidad; por otro lado, su efecto lubricante, aglutinante y humidificante proporciona mezclas con mayor contenido de humedad que favorece a la compactabilidad de las mismas, debido a las fuerzas intermoleculares que se suscitan, teniendo así un efecto directo en la obtención de compactados con mayor fuerza mecánica, resistencia a la fractura y menor fracturabilidad. La mayor concentración del coadyuvante aportó oscurecimiento a los compactados, tendiendo a un tono rojo, lo cual proporcionó una aceptable apariencia en relación al color que predomina en el café soluble comercializado.

Respecto al tipo de café, se obtuvo que la densidad de las mezclas con los tres tipos de café aumentó al elaborar los compactados, consiguiendo así un menor volumen de los mismos. La fragilidad de las mezclas con café liofilizado debida a su menor humedad, propició una mayor compresibilidad y menor volumen de los compactados, no obstante, los compactados más duros y con mayor resistencia a la fractura fueron obtenidos con las mezclas de café atomizado (molido), caracterizadas por su mayor contenido de humedad que contribuye con la formación de las fuerzas intermoleculares; además, por tener mayor tamaño de partícula y humedad, su valor de compactabilidad sólo difirió de la más

compactable por 8.20 N. Los compactados con café atomizado son más oscuros que con liofilizado, por lo que tuvieron una menor luminosidad y con ello una mejor apariencia.

La funcionalidad de la dextrosa anhidra como aglutinante fue proveer de humedad a las mezclas, contribuyendo con las fuerzas intermoleculares e influyendo en una mayor compactabilidad, su capacidad de humectación mejoró a una mayor concentración, además, al ser cristalina blanca aumentó la luminosidad de los compactados.

La mayor concentración de sorbitol generó compactados más duros pero con menor capacidad de desintegración, ya que aumentó su tiempo de disolución. Aún cuando el tipo de café no tuvo efecto significativo en la solubilidad y su porcentaje de influencia fue bajo (9.49%), es importante tener en cuenta que los compactados de café atomizado (molido) tardaron más en solubilizarse debido a su mayor dureza.

En el caso del objetivo 3, la presión de compactación incrementó la densidad, la dureza, el trabajo de compresión y disminuyó la fracturabilidad de los compactados, sin embargo, no favoreció la solubilización, por ser uno de los factores capaces de prolongar el tiempo de disolución. El tiempo de compactación no tuvo efecto significativo sobre ninguna propiedad.

RECOMENDACIONES

Para el proceso de disolución, se recomienda realizar un filtrado de las disoluciones con la finalidad de identificar partículas en exceso ó clasificarlas como limpias por su escaso contenido de sedimentos, según lo indica el estándar para leche deshidratada aplicado en la norma: NMX-F-139-SCFI-2004.

Se recomienda reducir los tiempos de compactación para la elaboración de los compactados, con la finalidad de analizar el efecto y conocer si es posible obtener compactados igual de firmes pero en un menor tiempo de producción.

Por otro lado, si se prefieren compactados con un tono café claro (amarillento) en lugar de obscuro rojizo como en el caso del café atomizado molido (Figura 34), se recomienda moler el café liofilizado con el mini procesador de alimentos bajo las mismas condiciones que el atomizado, para así, evaluar el efecto obtenido sobre las propiedades mecánicas de los compactados pero con un tono peculiar.

Es aconsejable evaluar las propiedades físicas de los compactados posterior a un almacenamiento, bajo condiciones predeterminadas, con el objetivo de analizar el efecto de los coadyuvantes y del tipo de café sobre sus propiedades mecánicas, color y solubilidad. Cabe mencionar que es de suma importancia considerar las condiciones de envasado; se recomienda la envoltura individual de los compactados con películas plásticas que les brinden protección contra la humedad y eviten erosión de los compactados por efecto de la fricción. Se deben considerar cajas de cartón de diferentes presentaciones así como la resistencia para el estibado durante el manejo y almacenamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alvarado, J. D., Aguilera, J. M., 2001. *Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos*. Acribia. España.
- Bacher, C., Olsen, P.M., Bertelsen, P., Sonnergaard, J.M., 2008. Compressibility and compactibility of granules produced by wet and dry granulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 358, 69-74.
- Barbosa-Cánovas, G. V., Malavé-López, J., Peleg, M., 1987. Density and compressibility of selected food powders mixtures. *Journal of Food Process Engineering*, 10, 1-9.
- Barletta, B., Knight, K., Barbosa, C., 1993. Attrition in agglomerated coffee. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 33 (1), 43-58.
- Benjumea, R., Correa, I., 2001. Edulcorantes. *Hacia la Promoción de la Salud*, 6, 1-15.
- Bond, F. C., 1952. The third theory of comminution. *Transactions of AIME Mining Engineering*, 193, 484-494.
- Café de Colombia. Consultado en línea el 2 de julio de 2010 en <http://www.cafedecolombia.com>
- Cakebread, S., 1981. *Dulces elaborados con azúcar y chocolate*. Acribia. España.
- Cerezo MR., 2010. Consultado en línea el 17 de junio de 2010 en <http://www.cerezo.com.mx/historia.html>
- Colón, H., 2010. Fuerzas intermoleculares de líquidos y sólidos. Consultado en línea el 12 de julio de 2010 en http://bc.inter.edu/LinkClick.aspx?link=RE%2FH%C3%A9ctor+Col%C3%B3n%2FQUIM+2212+Qu%C3%ADmica+Inorg%C3%A1nica%2FQuimicaGeneral_II_Cap_11a.pdf&tabid=733&mid=1375, 2010.
- Compañía de Elaborados de Café El Café C.A., 2009. Publicado en el 2008. Consultado en línea el 15 de septiembre de 2009 en <http://www.cafeelcafe.com/es/html/page16.php>
- Coronel, M., 2010. Estudio del café especial ecuatoriano. Ecuador. 65 p.p. Proyecto de Máster para optar el título de Máster Internacional en Nutrición y Dietética. Fundación Universitaria Iberoamericana.
- FOOD-INFO, 2010. Consultado en línea el 16 de junio de 2010 en <http://www.food-info.net/es/products/sugar/types.htm>

- Golomanía, 2010. Consultado en línea el 15 de junio de 2010 en <http://golomania.com/index.php>.
- Guan, W. y Zhang, Q., 2009. The effect of moisture content and compaction on the strength and arch formation of wheat flour in a model bin. *Journal of Food Engineering*, 94, 227-232.
- Hegenbart, S., 2010. Formulating dry mixes for instant success. Consultado en línea el 5 de enero de 2010 en www.foodproductdesign.com/articles/1995/07/mastering-the-morning-creating-breakfast-cereals.aspx
- Johansson, B., Alderborn, G., 2001. The effect of shape and porosity on the compression behaviour and tablet forming ability of granular materials formed from microcrystalline cellulose. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 52, 347–357.
- Kellogg's®, 2010. Consultado en línea el 20 de junio de 2010 en <http://www.kelloggs.es/nutricion/abcnutricion/capitulo7.html>
- Lachman, L., Lieberman, H. A., Kanig, J. L., 1986. *The Theory and Practice of Industrial Pharmacy*. 3rd ed. Philadelphia. Estados Unidos de America, 66–86.
- Lannes, S. C. S., Medeiros, M. L., 2003. Processamento de achocolatado de cupuacu por spray-dryer. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 39, 115–123.
- López, J., 2009. Café liofilizado. Consejo Cafetalero Nacional, 3, 18-19.
- MacDougall, D. B., 2001. *Principles of Color Measurement of Foods*. In: *Instrumentation and Sensors for the Food Industry*. Inglaterra: Woodhead Publishing Limited, 103-130.
- Mandujano, E., González, F., Rodríguez, L., Núñez, J., 2010. Máquina tablladora de chocolate (20 tablillas / minuto). Consultado en línea el 15 de junio de 2010 en expodime.cucei.udg.mx/sep2005/memorias/tablladora.pdf
- Mani,S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S., 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30, 648–654.
- Matthew, J., Mollan J., Metin C., 1996. The effects of lubrication on the compaction and post-compaction properties of directly compressible maltodextrins. *International Journal of Pharmaceutics*, 144, 1-9.
- Merchán, G., Araujo, S., Salazar C., 2009. Proyecto de inversión para la elaboración y comercialización en la ciudad de Guayaquil de café hecho en base de habas. Proyecto de grado para optar el título de Economista con Mención en Gestión Empresarial, Especialización Finanzas. Facultad de Economía y Negocios. Guayaquil – Ecuador. 131 p.p.
- Mullier, M. A., Seville, J. P. K., Adams, M. J., 1991. The effects of agglomerate force on attrition during processing. *Powder Technology*, 65, 321-333.

- NMX-F-139-SCFI-2004: Café puro soluble, sin descafeinar o descafeinado- especificaciones y métodos de prueba.
- Prieto, Y., 2002. Caracterización física de café semitostado. Colombia. 189 p.p. Proyecto de grado para optar el título de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería Química.
- Ramírez, J., 2006. Liofilización de alimentos. Revisión de la Ciencia, Tecnología e Ingeniería de los Alimentos, 6 (2), 1-36.
- Remington, G., 2003. *Farmacología*. 20th ed. México: Médica Panamericana.
- Rodríguez, M., Pérez, M., Quesada, A., 2003. Metodología para el desarrollo tecnológico de un comprimido de polvo vegetal. Estudio de un caso. Tecnología Química, 23 (3), 12-20.
- Ruiz, E., 2010. Fuerzas intermoleculares. Consultado en línea el 12 de julio de 2010 en http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/capitulo5.2_4022.pdf
- Sameer, G., Yi-Ying, Y., Ajay, K., 2009. Effects of disintegration-promoting agent, lubricants and moisture treatment on optimized fast disintegrating tablets. *International Journal of Pharmaceutics*, 365, 4-11.
- Tamagni, P., Hepfer, F., Kremers, H., 2010. Procedimiento de producción de cubos de caldo. Consultado en línea el 15 de junio de 2010 en http://www.espatentes.com/pdf/2270566_t3.pdf
- Voigt, R., 1982. *Tratado de tecnología farmacéutica*. España: Acribia.
- Wong, E., 2010. Procedimiento de secado de una solución de sacarosa, producto obtenido y su utilización. Consultado en línea el 16 de junio de 2010 en www.espatentes.com/pdf/2278951_t3.pdf
- Yan, H., y Barbosa-Cánovas, G.V., 1997. Compression characteristics of agglomerated food powders: Effect of agglomerate size and water activity. *Food Science and Technology International*, 3, 351-359.

APÉNDICE. Medias experimentales (\bar{X}) de las propiedades físicas y solubilidad.

Medias experimentales (\bar{X}) de las propiedades físicas de las mezclas							Medias experimentales (\bar{X}) de las propiedades físicas y solubilidad de los compactados de café soluble							
Mezcla	ρ (kg/m ³)	θ p. (mm) 80% mezcla	Humedad (%)	Compacta- bilidad (N)	Resis- tencia (N/s)	Trabajo de Compac- tación (N.s)	ρ (kg/m ³)	Color (L)	Color (h)	Solu- bilidad (s)	Dureza (N)	Resisten- cia a la fractura (N/s)	Fractura- bilidad (mm)	Trabajo de Compresión (N.s)
Formulación 1	810	0.18	1.78	205.79	151.77	164.68	214.06	103.4	1.72	3	11.92	2.40	0.47	2.80
Formulación 2	650	0.25	1.96	136.18	83.06	127.14	877.97	32.52	1.56	6	194.38	24.15	1.11	104.77
Formulación 3	590	0.42	2.30	66.76	42.43	58.89	970.99	30.72	1.57	12	267.59	119.05	1.30	131.15
Formulación 4	780	0.18	1.93	209.71	122.74	194.44	870.90	36.40	1.62	5	49.06	11.64	0.72	18.57
Formulación 5	680	0.25	2.22	113.46	24.50	96.23	930.31	34.41	1.61	6	267.13	167.04	1.30	143.66
Formulación 6	570	0.42	2.67	12.09	10.88	5.77	854.35	34.89	1.44	6	274.52	34.59	1.29	141.32
Formulación 7	720	0.18	1.68	130.26	94.54	105.93	887.66	35.10	1.58	3	79.21	26.22	0.74	26.71
Formulación 8	590	0.25	1.94	57.36	5.31	46.75	894.23	35.38	1.53	8	155.83	9.09	1.10	76.60
Formulación 9	550	0.84	2.59	19.50	11.95	17.40	901.16	35.83	1.51	13	284.68	47.25	1.30	134.67
Formulación 10	680	0.25	1.66	61.00	40.28	46.57	1271.01	43.30	2.57	5	51.49	14.10	0.62	13.69
Formulación 11	770	0.25	1.83	62.50	58.45	45.45	1314.85	42.77	2.53	9	239.21	137.23	1.30	135.34
Formulación 12	740	0.42	2.81	84.02	47.93	69.77	1278.01	42.88	2.57	8	191.86	14.11	1.16	112.82
Formulación 13	780	0.25	1.86	37.99	42.43	26.19	1296.83	44.66	2.62	5	89.48	3.67	0.75	31.50
Formulación 14	770	0.25	2.29	58.03	52.47	41.34	833.06	42.81	2.54	7	123.35	16.57	1.04	64.66
Formulación 15	780	0.25	2.48	66.32	17.33	56.37	945.26	39.94	2.48	17	310.71	52.68	1.30	146.58
Formulación 16	840	0.25	2.09	31.69	49.01	19.81	797.42	45.41	2.61	7	9.84	2.31	0.51	2.81
Formulación 17	860	0.18	2.38	58.59	17.69	39.92	905.05	44.95	2.79	8	128.46	12.51	0.94	62.96
Formulación 18	750	0.25	2.97	47.40	32.40	33.46	971.38	44.40	2.63	22	370.76	189.79	1.30	210.44
Formulación 19	990	0.25	1.86	65.99	46.02	43.37	901.98	35.99	1.92	9	24.45	7.57	0.74	6.81
Formulación 20	830	0.25	2.26	129.05	107.35	100.15	903.11	32.31	1.69	8	235.27	111.54	1.30	106.51
Formulación 21	530	0.84	2.75	20.29	11.12	19.60	1009.61	32.17	1.20	21	359.17	166.64	1.30	199.04
Formulación 22	830	0.18	2.34	133.99	120.74	87.93	930.92	37.95	2.06	3	6.53	5.49	0.40	1.59
Formulación 23	730	0.18	2.37	63.03	67.18	47.73	877.44	41.42	1.56	7	303.07	59.69	1.30	188.97
Formulación 24	730	0.84	2.72	72.19	33.95	60.51	1014.77	39.38	1.14	15	390.11	136.43	1.30	230.35
Formulación 25	970	0.18	2.02	136.20	52.60	96.17	856.08	44.16	1.93	5	78.21	32.91	0.44	19.37
Formulación 26	470	0.42	2.63	27.68	13.15	28.82	987.00	41.33	1.60	9	321.92	170.77	1.30	186.43
Formulación 27	480	0.84	3.25	23.17	17.93	25.09	940.79	36.61	1.47	15	328.36	183.60	1.30	192.71

GLOSARIO

Atrición: Formación de polvo finamente dividido, se asocia con problemas de ambiente, degradación de la calidad del producto y cambios en el comportamiento de flujo, además afecta negativamente la apariencia final del producto, reduce la dispersibilidad y capacidad de mojado del mismo.

Beneficio: Transformación de la cereza del café madura a café verde por medio de una serie de operaciones.

Café pergamino: Grano de café secado en el beneficio y cubierto por el endocarpio (pergamino).

Café soluble: Sólidos obtenidos del extracto líquido del café puro tostado, usualmente por percolación, que posteriormente se deshidratan para obtener el polvo que contiene los principios solubles, sápidos y aromáticos del café.

Café verde: Es la obtención de la almendra, resultado de someter la cereza de café madura al beneficio y la trilla.

Coadyuvantes de compactación: Aditivos que proporcionan propiedades especiales adecuadas para mejorar las cualidades de los comprimidos.

Color: Atributo más importante de la apariencia de un producto alimenticio, percibido sensorialmente en respuesta a la estimulación del ojo y de sus mecanismos nerviosos, por la energía luminosa de ciertas longitudes de onda.

Compactación: Se refiere a la compresión y consolidación de un sistema de dos o más fases sólido-gas debido a la fuerza aplicada.

Compactabilidad: Indica la compresibilidad de las mezclas y se refiere a la fuerza requerida para compactarlas hasta una distancia determinada, entre mayor sea su valor, son menos compresibles.

Compresión directa: La aplicación universal, consiste en emplear coadyuvantes de compactación a los componentes, mezclar y comprimir.

Compactado: Producto obtenido por compactación de sus ingredientes previamente reducidos a gránulos o polvo.

Concentración del extracto de café: Proceso industrial utilizado para reducir desde un 55% hasta un 90% de agua en el extracto de café; típicamente se realiza con la evaporación al vacío para que el agua se evapore a unos 45 °C por medio de intercambiadores de calor que calientan el café el menor tiempo posible y de manera homogénea.

Crio-concentración del extracto de café: Proceso para enfriar el extracto de café, a una temperatura por debajo de 0 °C, donde los cristales de hielo de agua pura se separan, mediante filtros especiales, del café que aún permanece en estado líquido.

Criterio de terminación A60: En la prueba de determinación de humedad en el analizador de humedad MB45 (OHAUS®, Suiza), el criterio de terminación A60 se refiere a la pérdida de peso menor a 1 mg durante 60 segundos, con lo que el dispositivo considera que la desecación ha concluido y pone fin automático al proceso de medición.

Densidad global: El término es empleado para determinar la densidad de los polvos, se refiere a la masa de partículas que ocupan una unidad de volumen determinada.

Dureza: Es la fuerza necesaria para lograr una deformación dada.

Fracturabilidad: Determina la distancia a la que ocurre una fractura, entre menor sea su valor, más frágil es el compactado.

Fuerzas intermoleculares: Fuerzas de atracción entre las partículas participantes que mantienen unido a un líquido o un sólido.

Granulación húmeda: Consiste en someter a las partículas de las mezclas a una serie de operaciones, para obtener requerimientos físicos convenientes para la obtención de buenos compactados.

Granulación seca: Serie de operaciones aplicadas a los componentes de las mezclas cuando son sensibles a la humedad, incapaces de soportar temperaturas elevadas durante el secado, o cuando poseen propiedades inherentes aglutinantes o cohesivas.

Lentificadores de la disgregación: Coadyuvantes de compactación cuya funcionalidad es disminuir la ruptura o desintegración de un compactado.

Resistencia a la fractura: Se refiere a la resistencia que opone un compactado a la fractura y se mide por la pendiente de la curva fuerza-distancia previa a la ruptura.

Resistencia a la compactación: Relacionada directamente con la compactabilidad, indica la oposición a la fuerza aplicada para compactar las mezclas hasta una distancia determinada, entre menor sea su valor, oponen menor resistencia.

Solubilidad: Es la capacidad de una sustancia para disolverse en otra.

Trabajo de compactación: Se refiere al área bajo la curva fuerza-distancia durante la compresión de las mezclas hasta la distancia que se haya determinado para realizar la prueba.

Trabajo de compresión: Es al área bajo la curva fuerza-distancia durante la compresión del compactado hasta la distancia que se haya determinado para realizar la prueba.

Trilla: Procedimiento mecánico de fricción y presión para retirar el endocarpio del café pergamino y obtener café verde.