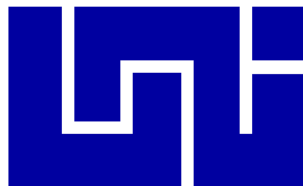


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FLUIDODINÁMICO DE CUATRO GRANOS  
BÁSICOS EN DOS MODELOS DE SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

**Br. Leví Alfonso Vílchez Herdocia**

**Br. Jorge Iván Corea Juárez**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

TUTOR:

**MPhil Ing. Rodolfo Espinoza M.**

Managua, Nicaragua, Mayo de 2020

## RESUMEN

En este trabajo se estudió el comportamiento fluidodinámico de cuatro granos básicos tomando como criterio los de mayor producción en el país (sorgo, frijol, arroz y maíz), en dos secadores, uno de lecho fluidizado y otro de lecho de chorro. Con el propósito de proponer una mejor alternativa al secado tradicional en Nicaragua. Los experimentos fueron realizados en una columna de plexiglás a la cual se le adaptaron dos bases diferentes, una para cada secador, conectadas a un ventilador. Este estudio fluidodinámico es un primer avance en cuanto a la determinación de las propiedades de los granos más consumidos en el país.

Previo a los experimentos en la torre, se calcularon las propiedades físicas de los granos para varias humedades, comenzando por la humedad máxima permitida para secado con aire hasta la humedad de almacenamiento en silos. Primero se midieron las dimensiones de los granos utilizando un programa llamado Grainscan y para la última dimensión se utilizó un calibre Vernier. Con estos resultados se calcularon el diámetro promedio y la esfericidad de cada tipo de grano. Finalmente se calculó la densidad aparente de los granos aplicando el método de desplazamiento de líquidos utilizando un instrumento de construcción propia basado en la literatura disponible. Con los resultados obtenidos de diámetro promedio, esfericidad y densidad de los granos se logró comprobar que la variación de la humedad presente en estos no influye apreciablemente en la variación de sus propiedades. También se calculó la porosidad del lecho empacado, procedimiento similar al cálculo de la densidad aparente del grano.

Se realizaron experimentos de fluidización en ambos equipos. En el caso de los experimentos con el lecho fluidizado solo se logró observar un leve burbujeo para el sorgo y una leve expansión del lecho para el arroz, con los demás granos el lecho permaneció inmóvil, lo cual indica que se requiere mayor potencia del ventilador para alcanzar la fluidización. Con los datos obtenidos en los experimentos se crearon las gráficas de caída de presión contra velocidad superficial del aire para el secador de lecho fluidizado.

Por su parte, los experimentos con el lecho de chorro arrojaron mejores resultados, para todos los granos se logró observar un buen desarrollo del lecho y formación de la fuente para todos los granos a diferentes velocidades de operación. Con los datos obtenidos en estos experimentos se crearon las gráficas de caída de presión contra velocidad superficial del aire para el secador de lecho de chorro.

Finalmente, ya que solo para el maíz se conocían todas sus propiedades, además de que mostró buena calidad de fluidización en el lecho de chorro, se procedió a realizar una simulación de su secado disminuyendo su humedad en base seca desde 33% hasta 17%, utilizando aire a 40 °C, para lo cual requirió un tiempo correspondiente a 3 horas y 23 minutos. Adicionalmente se calcularon la humedad del aire en el sistema, temperatura de la partícula y temperatura del sistema en un período de tiempo dado. Finalmente se recomienda la construcción de secadores de lecho de chorro como una alternativa al secado tradicional en Nicaragua.

---

## **Opinión del Catedrático Guía**

El presente trabajo monográfico ha sido desarrollado por el Br. Jorge Iván Corea Juárez y el Br. Leví Alfonso Vílchez Herdocia en las instalaciones de la Universidad Nacional de Ingeniería. En este trabajo, el Br. Corea y el Br. Vílchez determinaron las propiedades físicas de los cuatro granos básicos más consumidos en el país, siendo este un primer paso para construir una base de datos sobre granos a nivel nacional. Además, los tesisistas diseñaron y construyeron dos columnas, una de lecho fluidizado y la otra de lecho de chorro, en las cuales estudiaron el comportamiento fluidodinámico de los cuatro granos mencionados anteriormente. Adicionalmente, los tesisistas realizaron la simulación del secado de uno de los granos en un secador de lecho de chorro.

Para lograr lo anteriormente mencionado, el Br. Corea y el Br. Vílchez aplicaron diversos conocimientos de Ingeniería Química, adquiridos a través de diferentes asignaturas de la disciplina, básicas, básicas específicas y de formación profesional. Algunos de esos conocimientos incluyen la aplicación del método científico, métodos estadísticos y de diseños de experimentos, diseño de equipos, balances de materia y energía, transferencia de masa y de calor, entre otros.

Las operaciones de secado convencional utilizado en el país, incurren muchas veces en pérdida y daño de los granos, además, requieren largos períodos de tiempo de secado debido a la alta humedad relativa local. Como futuros Ingenieros Químicos, el bachiller Corea y el Br. Vílchez han propuesto, mediante el presente trabajo, una alternativa que permite un adecuado secado de los granos incluso en época lluviosa, permitiendo menos pérdida de granos y menores tiempos de secado.

Por todo lo anterior, la monografía presentada por el Br. Corea y el Br. Vílchez reúne las condiciones necesarias para ser presentada y defendida ante el tribunal examinador correspondiente, a fin de que se les otorgue el título de Ingeniero Químico.

Atentamente,



**MPhil. Ing. Rodolfo Espinoza M.**

**Profesor Titular y Tutor**

---

## TABLA DE CONTENIDOS

I	Introducción.....	1
II	Objetivos .....	3
2.1	Objetivo general .....	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
III	Marco Teórico.....	4
3.1	Generalidades de los granos .....	4
3.1.1	El Sorgo .....	4
3.1.2	El Frijol .....	5
3.1.3	El Arroz.....	6
3.1.4	El Maíz.....	6
3.2	Manejo post cosecha .....	7
3.3	Fluidización.....	9
3.3.1	Regímenes de Fluidización.....	9
3.3.2	Clasificación de las partículas de Geldart.....	12
3.3.3	Caída de presión como función de la velocidad .....	14
3.3.4	Efectos de la presión y temperatura en la fluidización .....	18
3.4	Selección de secadores de Lecho fluidizado .....	19
3.5	Secador de lecho fluidizado convencional.....	20
3.5.1	Importancia del Distribuidor de Aire.....	21
3.5.2	Regiones en un Secador en Régimen de Lecho Burbujeante .....	22
3.5.3	Estimación de la Velocidad Mínima de Fluidización.....	24
3.5.4	Velocidad Terminal de fluidización.....	26
3.6	Secador de lecho de chorro .....	27
3.6.1	Regímenes de Flujo en Lecho de Chorro.....	28
3.6.2	Caída de Presión como Función de la Velocidad en un Lecho de Chorro .....	29
3.6.3	Estimación de la Velocidad Mínima de Chorro.....	32
3.6.4	Criterios para el Dimensionamiento de una Columna para Lecho de Chorro .....	33
3.7	Generalidades del secado .....	35
3.8	Cinética del secado.....	36
3.8.1	Curvas características de secado de arroz y maíz .....	39

---

3.9	Equilibrio del secado .....	39
3.9.1	Curva de equilibrio para el maíz .....	41
3.10	Modelos matemáticos para el diseño de secadores de lecho fluidizado convencionales .....	42
3.11	Modelos matemáticos para el diseño de secadores de lecho de chorro .....	43
IV	Metodología .....	45
4.1	Medición de propiedades físicas de los granos .....	45
4.1.1	Medición de las dimensiones del grano .....	46
4.1.2	Cálculo de la esfericidad del grano .....	46
4.1.3	Medición de la densidad aparente del grano .....	46
4.2	Medición de propiedades de fluidización del lecho .....	48
4.2.1	Medición de la porosidad del lecho empacado .....	52
4.2.2	Determinación de la velocidad mínima de fluidización en una columna convencional .....	54
4.2.3	Determinación de la velocidad mínima de chorro .....	54
4.3	Simulación del Secado de los Granos Básicos .....	55
V	Presentación y discusión de resultados .....	58
5.1	Determinación de las propiedades físicas de los granos .....	58
5.1.1	Determinación de la Humedad Inicial de los Granos Básicos .....	58
5.1.2	Humidificación de los granos básicos .....	59
5.1.3	Medición de las dimensiones de los granos de cereal .....	63
5.1.4	Cálculo de la esfericidad .....	67
5.1.5	Medición de la densidad aparente del grano .....	70
5.2	Determinación de las propiedades de fluidización del lecho .....	73
5.2.1	Determinación de porosidad del lecho .....	73
5.2.2	Medición de la velocidad mínima de fluidización .....	74
5.2.3	Medición de la velocidad mínima de chorro y caída de presión .....	80
5.3	Simulación del secado de los granos básicos .....	95
VI	Conclusiones .....	104
VII	Recomendaciones .....	105
VIII	Nomenclatura .....	106
IX	Bibliografía .....	110
10	Anexo .....	118

---

Anexo A .....	119
Anexo B .....	120
Anexo C .....	122
Anexo D .....	124
Anexo E .....	125
Anexo F.....	127
Anexo G.....	130
Anexo H.....	131

### Índice de Tablas

Tabla 3.1 Recomendaciones Para el Secado de Granos con Aire Natural o Caliente. ....	8
Tabla 3.2 Descripción de los Regímenes de Fluidización. ....	11
Tabla 3.3 Modelo de Peleg para el sistema agua sorgo .....	41
Tabla 3.4 Modelo de Peleg para el sistema agua-maíz.....	41
Tabla 5.1 Humedad del grano adquirido (% , base húmeda).....	58
Tabla 5.2 Valores promedios de porosidad de lecho empacado, suelto y al azar.....	74
Tabla 5.3 Relación D/dp de cada grano básico para su humedad máxima de trabajo. ....	74
Tabla 5.4 Cálculos de número de Arquímedes, $H_{max}$ y altura del lecho. ....	81
Tabla 5.5 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del sorgo .....	84
Tabla 5.6 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del frijol .....	87
Tabla 5.7 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del Arroz.....	91
Tabla 5.8 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del maíz .....	94

### Índice de Figuras

Figura 3.1 Regímenes de fluidización. ....	10
Figura 3.2 Regímenes de Fluidización para Sistemas Con y Sin Transporte. ....	12
Figura 3.3 Diagrama de Clasificación de Partículas de Geldart para Fluidización con Aire a Temperatura Ambiente.. ....	13
Figura 3.4 Caída de presión contra velocidad del gas para determinar velocidad mínima de fluidización.. ....	15

---

Figura 3.5 Transición de fluidización homogénea a régimen de lecho burbujeante. Donde $L$ , altura del lecho fijo empacado aleatoriamente; y $L_f$ altura promedio del lecho fluidizado.....	16
Figura 3.6 Relación entre la velocidad mínima de burbujeo y la velocidad mínima de fluidización como función de la densidad y el tamaño medio de las partículas. ....	17
Figura 3.7 Uso de las líneas de caída de presión en el lecho fijo y en el lecho fluidizado para determinar experimentalmente la velocidad mínima de fluidización. ....	18
Figura 3.8 Efecto de la temperatura en la velocidad mínima de fluidización para diferentes tipos de partículas.. ....	19
Figura 3.9 Regiones observables en un secador en régimen de lecho burbujeante. ....	23
Figura 3.10 Formación de chorros y burbujas en la región de entrada.....	23
Figura 3.11 Secador de lecho de chorro.....	28
Figura 3.12 Regímenes de fluidización en lecho de chorro.....	29
Figura 3.13 Diagramas de régimen para trigo, $D_c=15\text{cm}$ , $D_i=1.25\text{cm}$ (a) y arena, $D_c=15\text{cm}$ , $D_i=1.58\text{cm}$ (b).. ....	30
Figura 3.14 Curvas de caída de presión para el trigo.....	31
Figura 3.15 Curva de secado a condiciones constantes. ....	36
Figura 3.16 Curva de velocidad de secado a condiciones constantes.....	38
Figura 3.17 Isotermas de desorción de granos de maíz, para tres diferentes temperaturas. ....	40
Figura 4.1 Instrumento experimental usado para la medición de densidad. Zogzas, Maroulis & Marinou-Kouris 1994 p 85, Figura 1 (a) y réplica construida del instrumento (b).....	48
Figura 4.2 Esquema de la columna de lecho fluidizado convencional (a) y columna de lecho de chorro (b). ....	49
Figura 4.3 Base de la columna de fluidización. ....	49
Figura 4.4 Cono invertido ubicado en la parte superior de la columna de fluidización. ....	50
Figura 4.5 Distribuidor de aire de plato perforado. ....	51
Figura 4.6 Distribuidor de aire con plato perforado y lecho fijo de partículas inertes. ....	52
Figura 5.1 Variación del porcentaje de humedad del grano de frijol con respecto al tiempo de humidificación. ....	60
Figura 5.2 Variación del porcentaje de humedad del grano de arroz con respecto al tiempo de humidificación. ....	61
Figura 5.3 Variación del porcentaje de humedad del grano de maíz con respecto al tiempo de humidificación. ....	62
Figura 5.4 Variación del porcentaje de humedad del grano de sorgo con respecto al tiempo de humidificación. ....	63
Figura 5.5 Variación del diámetro promedio del grano de sorgo con respecto al porcentaje de humedad.....	64

---

Figura 5.6 Variación del diámetro promedio del grano de frijol con respecto al porcentaje de humedad.....	65
Figura 5.7 Variación del diámetro promedio del grano de arroz con respecto al porcentaje de humedad.....	66
Figura 5.8 Variación del diámetro promedio del grano de maíz con respecto al porcentaje de humedad.....	67
Figura 5.9 Variación de la esfericidad del sorgo con respecto al porcentaje de humedad. ....	68
Figura 5.10 Variación de la esfericidad del frijol con respecto al porcentaje de humedad. ....	68
Figura 5.11 Variación de la esfericidad del arroz con respecto al porcentaje de humedad.....	69
Figura 5.12 Variación de la esfericidad del maíz con respecto al porcentaje de humedad en base húmeda.....	70
Figura 5.13 Variación de la densidad del sorgo con respecto al porcentaje de humedad.....	71
Figura 5.14 Variación de la densidad del frijol con respecto al porcentaje de humedad. ....	71
Figura 5.15 Variación de la densidad del arroz con respecto al porcentaje de humedad. ....	72
Figura 5.16 Variación de la densidad del maíz con respecto al porcentaje de humedad.....	73
Figura 5.17 Curva de caída de presión para el lecho vacío. ....	76
Figura 5.18 Curva de caída de presión del sorgo con lecho de 3 cm.....	77
Figura 5.19 Curva de caída de presión del frijol con lecho de 3 cm.....	78
Figura 5.20 Curva de caída de presión del arroz con lecho de 3 cm .....	79
Figura 5.21 Curva de caída de presión del maíz con lecho de 3 cm.....	80
Figura 5.22 Velocidad de chorro del sorgo con lecho de 0.35 m de altura .....	82
Figura 5.23 Velocidad de chorro del sorgo con lecho de 0.25 m de altura. ....	83
Figura 5.24 Velocidad de chorro del sorgo con lecho de 0.15 m de altura. ....	84
Figura 5.25 Velocidad de chorro del frijol con lecho de 0.15 m de altura .....	85
Figura 5.26 Velocidad de chorro del frijol con lecho de 0.12 m de altura .....	86
Figura 5.27 Velocidad de chorro del frijol con lecho de 0.06 m de altura .....	87
Figura 5.28 Velocidad de chorro del arroz con lecho de 0.25 m de altura .....	89
Figura 5.29 Velocidad de chorro del arroz con lecho de 0.18 m de altura .....	90
Figura 5.30 Velocidad de chorro del arroz con lecho de 0.11 m de altura. ....	91
Figura 5.31 Velocidad de chorro del maíz con lecho de 0.14 m de altura.....	92
Figura 5.32 Velocidad de chorro del maíz con lecho de 0.10 m de altura.....	93
Figura 5.33 Velocidad de chorro del maíz con lecho de 0.06 m de altura.....	94
Figura 5.34 Variación de la humedad base seca del maíz contra tiempo en Jinotega. ....	96
Figura 5.35 Variación de la humedad del aire en el sistema contra el tiempo en Jinotega. ....	97

---



Figura 5.36 Variación de la temperatura del sistema contra el tiempo en Jinotega.....	97
Figura 5.37 Variación de $dX/dt$ contra el tiempo en Jinotega. ....	98
Figura 5.38 Variación de $dX/dt$ contra humedad base seca del maíz en Jinotega. ....	99
Figura 5.39 Variación de la humedad base seca del maíz contra tiempo en Chinandega. ....	100
Figura 5.40 Variación de la humedad del aire en el sistema contra el tiempo en Chinandega...	100
Figura 5.41 Variación de la temperatura del sistema contra el tiempo en Chinandega.....	101
Figura 5.42 Variación de $dX/dt$ contra el tiempo en Chinandega.....	102
Figura 5.43 Variación de $dX/dt$ contra humedad base seca del maíz en Chinandega. ....	102

## **I INTRODUCCIÓN**

Nicaragua es un país con gran potencial agrícola. Desde inicios del presente siglo la producción agrícola ha aumentado hasta alcanzar más del 18% del PIB. Sin embargo, aunque las superficies cosechadas han aumentado notablemente, la productividad ha disminuido debido al mal uso de las tierras y la falta de infraestructuras y créditos (Gómez, 2009).

Los principales productos agrícolas del país son los granos básicos, entre los cuales se encuentran el sorgo, el frijol, el arroz y el maíz. Todos ellos constituyen una parte muy importante de la dieta del nicaragüense. Luego de su cosecha, para evitar la pudrición y germinación del grano, es necesario secarlos hasta alcanzar una humedad menor al 13%. Al disminuir el contenido de agua, se hace más fácil su transporte y a la vez aumenta su tiempo de conservación (Valdivia, s.f.).

Los granos básicos mencionados anteriormente se cultivan en casi todo el país. Sus períodos de cosecha abarcan casi todo el año; por lo cual el secado debe realizarse a diferentes condiciones climáticas. Buena parte del producto se echa a perder en lugares donde las condiciones climáticas no permiten un pre-secado en el área de siembra, y se requiere realizar esta operación en espacios techados. En época de lluvia, debido a la alta humedad del aire, no siempre se alcanzan los valores de humedad del grano requeridos para su almacenamiento (INTA, 2009c).

En el país, los productos agrícolas son generalmente secados al sol, ya sea directamente en el campo donde se sembró o bien en patios de secado. Este es el método más económico, pero tiene como desventaja las bajas velocidades de secado; grandes requerimientos de espacios; y contaminación o pérdidas por condiciones externas (tierra, animales, insectos, etc) (FAO, 1993; Sandino, 2016).

Por su parte, la empresa estatal de acopio de granos ENABAS, fundada en los años 1980, ofrece el servicio de secado industrial de granos. Sin embargo, dicho servicio se ha visto comprometido debido a la falta de mantenimiento de sus equipos y el aumento del costo energético (Acevedo, 2008). A partir del año 2008 se ha venido trabajando en un proyecto de reactivación para poder ofrecer nuevamente sus servicios con la calidad original, haciendo énfasis en el acopio y el almacenamiento de granos (ENABAS, 2016).

A principios del año 2016 inició operaciones en el departamento de Chinandega, una planta de secado exclusivamente para sorgo, la cual presta servicio a los productores de la zona. Esta planta, propiedad de la Cargill Nicaragua S.A. tiene una capacidad de secado de 30 toneladas por hora para llevar el grano a una humedad final del 13% (Sandino, 2016). No se tiene información acerca de otros proyectos similares a éste para prestar servicio de secado de otros granos básicos.

Para asegurar una mayor producción, en Nicaragua se requiere mejorar los anticuados métodos de secado existentes. Por ejemplo, en países como Colombia y México, estudios del secado de trigo (Vázquez & Vizcarra, 2008) y café (López, 2006), respectivamente, han demostrado que los secadores de lecho fluidizado son una alternativa viable para llevar a cabo esta operación. Ya que estos poseen un bajo costo de construcción, son fáciles de operar y poseen una alta eficiencia térmica. Además, son apropiados para cualquier tipo de sólido húmedo, siempre y cuando éste pueda ser fluidizado por gas caliente (Barreira, 2007).

Hasta este momento, no se ha encontrado información acerca de la utilización en Nicaragua de secadores de lecho fluidizado para secar granos básicos. Solo se conoce un trabajo de investigación realizado en la Facultad de Ingeniería Química de la UNI, acerca del secado en lecho fluidizado, pero de semilla molida de nim humedecida con solventes (Lagerstedt & Nyman, 1997). En esta misma facultad también se han realizado estudios sobre el secado de granos básicos en secador de lecho móvil (Carlén, 1994; Ohlsson, 1994; Schreil, 1996) y en secador por contacto (Gamero, 1993; Fernández, 2001). Además, se determinaron las isoterms de equilibrio de desorción de maíz y sorgo (Floripe, 1998).

La fluidización y el secado de los diferentes granos básicos requieren diferentes condiciones de operación, ya que está asociada tanto con la geometría del grano a fluidizar como con el modelo del secador a utilizar.

Mientras el sorgo es casi esférico; el frijol húmedo parece un elipsoide; y el arroz producido en el país, tiende a ser cilíndrico. Por su parte, el maíz presenta una geometría intermedia entre el sorgo y el arroz; y se asemeja más a una placa. Además, se observan diferencias morfológicas entre las diferentes variedades de cada grano (INTA, 2013). Para este trabajo se utilizó la variedad de cada grano básico de mayor producción en el país; a las cuales se les midieron las propiedades físicas, así como otras propiedades asociadas con la fluidización del lecho de partículas.

En los artículos de investigación científica, los modelos de secadores más utilizados para el estudio del secado de granos y cereales son: el secador de lecho fluidizado convencional y el secador de lecho de chorro. Ambos tienen como ventajas que son sencillos de construir y de mantener, ya que no poseen partes móviles (Jittanit, Srzednicki, & Driscoll, 2010; López, 2006; Vázquez & Vizcarra, 2008; Zahed & Epstein, 1992).

En esta tesis, con el objetivo de proponer un modelo alternativo al secado convencional utilizado en el país, se determinó el comportamiento fluidodinámico de todos los granos básicos, en estos dos modelos de secadores. No se realizaron experimentos de secado debido a que los equipos con los que se cuenta son de plástico y en ellos no se puede trabajar con aire caliente. En cambio, se realizó la simulación del proceso de secado por lotes solamente para el secador de lecho de chorro. En dicha simulación, se utilizaron los resultados obtenidos del comportamiento fluidodinámico, en combinación con datos disponibles en la literatura acerca de la cinética y el equilibrio del secado de los granos básicos con que se trabajó.

## **II OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar el comportamiento fluidodinámico de los granos básicos: sorgo, frijol, arroz y maíz; en dos secadores a escala de laboratorio: secador de lecho fluidizado convencional y secador de lecho de chorro.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las propiedades físicas relacionadas con la fluidización para una variedad de cada grano básico.
- Estudiar la fluidodinámica para una variedad de cada grano básico.
- Simular el proceso de secado por lotes para los granos básicos en los que se logre una adecuada fluidización.

### **III MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 GENERALIDADES DE LOS GRANOS**

Los granos básicos cultivados en Nicaragua son: El sorgo, el frijol, el arroz y el maíz (INTA, 2009b).

Desde la antigüedad son considerados como el alimento más importante para el hombre y el animal debido a sus altas cualidades nutricionales tales como: hidratos de carbono, proteínas, sales minerales y vitaminas, nutrientes indispensables para el ser humano.

Las tecnologías de cosecha empleadas en el medio rural, especialmente a nivel de los pequeños agricultores, han permanecido prácticamente sin evolucionar a través de la historia, lo que propicia el uso de técnicas poco apropiadas que facilitan el deterioro de los granos y sus productos.

##### **3.1.1 EL SORGO**

La planta de sorgo tiene una altura de 1 a 2 metros, con un sistema radicular que puede llegar en terrenos permeables a 2 m de profundidad. Tiene inflorescencias en panojas, con semillas esféricas y oblongas, que según la variedad pueden ser de color blanco, negro, amarillento o rojizo (INTA, 2009a).

El propósito principal del sorgo es el de consumo nacional (Campos & Carranza, 2015). En las estadísticas nacionales no se detallan las variedades sembradas, en cambio se mencionan en general sorgo blanco, sorgo millón y sorgo rojo (INIDE, 2012).

El sorgo blanco se utiliza tanto para alimento animal como para consumo humano. Existen variedades con doble propósito que aprovechan el grano y el forraje. El sorgo millón se utiliza principalmente para la producción de harina para consumo humano en la elaboración de tortillas, rosquillas y atoles (INTA, 2009a).

El sorgo rojo, también llamado sorgo industrial, se destina exclusivamente a la producción nacional de alimentos balanceados para aves, cerdos, bovinos y camarón (<http://www.confidencial.com.ni/archivos/articulo/18295/lanzan-plan-para-impulsar-produccion-nacional-de-sorgo>, visitado 10 agosto 2016).

El sorgo blanco se siembra principalmente en época de primera, el sorgo millón en postrera y el sorgo rojo en postrera (INTA, 2013a). Según el anuario estadístico del INIDE (2012), casi el 75%

de la producción nacional de sorgo del ciclo agrícola 2011-2012 se cosechó en la zona del pacífico y el resto en la zona central y norte.

Según Campos y Carranza (2015), durante el año 2012 el área total sembrada de sorgo fue de 37,717 manzanas, de las cuales el 54.5% fue de sorgo millón, el 41.1% de sorgo blanco y el 4.4% de sorgo rojo. En el período 2010-2014 la producción nacional de sorgo fue oscilante, con valores tan bajos como 800 mil quintales en 2012 y tan altos como un millón quinientos mil toneladas en 2011.

### **3.1.2 EL FRIJOL**

El frijol común es una planta anual, herbácea. Pertenece a la familia de las fabáceas de la sub familia de las papilionoidae. Se cultiva desde las zonas tropicales hasta las zonas templadas (INTA, 2009d).

Las variedades que se cultivan en Nicaragua son versiones mejoradas del frijol rojo y el negro, ambas especies son resistentes a enfermedades y plagas. Independientemente de su variedad, el grano de frijol se caracteriza por tener una forma elipsoide (INTA, 2009d)

El frijol rojo se cultiva principalmente en las regiones Pacífico y central del país, mientras que el frijol negro se cultiva principalmente en las regiones central, norte y la costa caribe. El 60% del área total sembrada en el país corresponde a los departamentos de Matagalpa, Jinotega y la costa Caribe. A su vez Matagalpa y Jinotega producen más del 30% del total del frijol del país, el cual se cultiva durante todo el año (INTA, 2013b).

Según INTA (2009d) Nicaragua es el mayor productor y exportador de frijol de Centroamérica, con una producción en 2008 de más de 206 mil toneladas, de las cuales se exportaron más de 53 mil toneladas a El Salvador, Honduras, Venezuela y Estados Unidos. Sin embargo, no se detallan las cantidades de cada variedad exportada. FAO (2012) indica que el frijol rojo se usa tanto para exportación como para consumo local, mientras que la producción de frijol negro tiene como propósito su exportación.

De acuerdo al Centro de Trámites de las Exportaciones (CETREX), (s.f.) en el período 2008 a 2015 las exportaciones de frijol han oscilado, con valores tan bajos como 27 mil toneladas en 2011 y tan altos como 64 mil toneladas en 2014.

Sobre las variedades exportadas, el Informe Anual del Comercio Exterior de MIFIC (2015) indica que las exportaciones de frijol negro aumentaron en el período 2011 a 2014, hasta llegar a

representar el 56% del total de frijoles exportados en 2014. Pero en 2015 su exportación sufrió una drástica caída hasta representar menos del 7% del total de exportación de frijol (<http://www.laprensa.com.ni/2015/10/01/economia/1911026-frijol-negro-se-hunde>, visitado 26 septiembre 2016).

### **3.1.3 EL ARROZ**

El arroz es una gramínea monoica y anual, de crecimiento rápido y con gran capacidad reproductiva adaptada a diversas condiciones de clima y suelo. Es un cultivo que se desarrolla en forma óptima bajo inundación. El arroz está dentro de los cuatro cereales más cultivados en el mundo (INTA, 2009b).

En Nicaragua se cultivan distintas variedades de arroz. Sin embargo, todas ellas caen dentro de la categoría de “arroz de grano largo”. El grano largo tiene una forma casi cilíndrica, con una longitud de entre cuatro y cinco veces su diámetro (anar.com.ni, visitada 7 octubre 2016).

El arroz se cultiva en casi todo el territorio nacional en alturas entre 0 a 800 m.s.n.m. Tiene un crecimiento óptimo a temperaturas entre 25 y 30 °C, siendo la máxima hasta 40°C. Temperaturas menores a 20°C disminuyen su crecimiento. En Nicaragua, el arroz se siembra de mayo a julio (época de secano), de julio a agosto y también de noviembre a diciembre (época de riego). La cosecha se realiza de 3 a 4 meses después de la siembra (INTA, 2009b).

Según datos de INIDE (2013) la producción de arroz en el ciclo agrícola 2012-2013 fue aproximadamente seis millones de quintales oro. Casi el 39% de dicha producción se obtuvo en la zona del pacífico, 32% en la zona del atlántico y el restante 29% en la zona central y norte.

En el año 2006 los productores abastecían el 45% del consumo nacional. Para el año 2011 esta cifra se elevó al 85%, teniendo que importarse sólo el 15% (INTA, 2012a). Según la Asociación Nicaragüense de Arroceros (ANAR) se proyecta para el ciclo agrícola 2016-2017 una producción nacional de cinco millones de quintales del grano (4.2 millones qq de riego y 800,000 qq de secano) (anar.com.ni, visitado 7 octubre 2016).

### **3.1.4 EL MAÍZ**

El maíz es una gramínea anual, robusta, de 1 a 5 m de altura, de un solo tallo dominante (INTA, 2009c). En Nicaragua el maíz se cultiva en todo el país. Puede sembrarse durante todo el año, en cinco épocas de siembra: primera (mayo-junio), postrerón (julio), postrera (agosto-septiembre),

apante (noviembre-febrero) y riego (noviembre-febrero). La cosecha se realiza de 2 a 3 meses luego de la siembra (INTA, 2009c).

En Nicaragua se cultivan las semillas modificadas provenientes de la variedad del “maíz dentado” de granos blancos y amarillos. Aunque el maíz dentado se encuentra entre los de mayor rendimiento, tiene como desventaja su susceptibilidad a hongos y plagas (INTA, 2009c). El maíz dentado de grano blanco se utiliza principalmente para consumo humano, mientras que el de grano amarillo suele destinarse para alimento de animales debido a su alto contenido proteico ([www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s07.htm](http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s07.htm), visitado 7 octubre 2016).

Según datos de INIDE (2013) la producción de maíz en el ciclo agrícola 2012-2013 fue de un poco más de diez millones de quintales. Casi el 60% de dicha producción se obtuvo en la zona central y norte, 30% en la zona del atlántico y el restante 10% en la zona del pacífico.

### **3.2 MANEJO POST COSECHA**

Una vez que el grano ha alcanzado su madurez y es recogido del campo es necesario que pase por una serie de etapas de acondicionamiento para evitar el deterioro.

**Pre-secado:** Se realiza en el lugar de cosecha o en sus cercanías, consiste en un secado al sol para remover una pequeña porción de humedad para evitar deterioro y aglomeraciones dentro de las etapas posteriores. Si la cosecha se da en temporada lluviosa es necesario realizar el pre secado en un ambiente techado para evitar el exceso de humedad.

**Limpieza:** Consiste en la eliminación de todo tipo de materia extraña que se junte con los granos durante la cosecha mediante el uso de cribas y zarandas.

**Selección:** Consiste en retirar aquellos granos que presenten daños tales como podredumbre, germinado o ataques de insectos o microorganismos, generalmente de forma manual.



Tabla 3.1 Recomendaciones Para el Secado de Granos con Aire Natural o Caliente. Basado en Inta 2009a, Inta 2009b, Inta 2009c, Inta 2009d y Chakraverty, Mujumdar, Raghavan & Ramaswamy, 2003. Capítulo 7, p171

Para tiempos de almacenamiento mayores a un año deben usarse contenidos de humedad 1 o 2% menores de lo que aquí se indica

	Sorgo	Frijol	Arroz	Maíz
Contenido máximo de humedad en cosecha para un secado satisfactorio con aire natural	20	20	20	20
Contenido máximo de humedad en cosecha para un secado satisfactorio con aire caliente	24	25	24	25
Humedad máxima para almacenamiento en silos	13	13	13	12
Porcentaje de humedad máxima relativa permitida para el aire para su posterior almacenamiento en silos	60	60	60	60
Temperatura máxima del aire en °C cuando:				
Se usa el grano para sembrado	43	40	43	43
Vendido para uso comercial	60	45	43	54
Alimento animal	82			82

**Secado:** Los tipos principales de secado de cereales y granos son el secado al sol y el secado mediante métodos artificiales, estos últimos son más efectivos pero costosos. El nivel de seguridad para almacenamiento depende del tipo de grano, pero generalmente es del 13 al 15% de humedad (base húmeda) para períodos de un año, y de 11 a 13% de humedad (base húmeda) para períodos de más de un año (Chakraverty, Mujumdar, & Ramaswamy, 2003). Los valores requeridos de humedad para cada grano se muestran en la Tabla 3.1.

**Almacenamiento:** su objetivo es conservar el grano en buenas condiciones y seguras por un largo periodo de tiempo, hasta que este sea vendido o procesado. El almacenamiento se realiza en bodega (sacos) y en silos cuando se almacena a granel (Roman, s.f; Valdivia, s.f.).

### **3.3 FLUIDIZACIÓN**

La fluidización es la levitación de una masa de partículas por la acción de un fluido vertical ascendente. En secado el fluido generalmente es un gas y el más utilizado es el aire. Si el sólido es colocado en una columna y se hace pasar un gas, al aumentar gradualmente su velocidad de flujo se pueden observar diversos estados, tal como se muestra en la Figura, 3.1 (Yang, 2003).

#### **3.3.1 REGÍMENES DE FLUIDIZACIÓN**

A velocidades bajas del gas, las partículas se encuentran descansando unas sobre otras en la parte baja de la columna y el gas fluye entre los espacios inter partículas. En este caso, se dice que el lecho se encuentra en estado fijo, más conocido como lecho fijo (columna al extremo izquierdo de Figura 3.1). Cuando se tienen valores intermedios de velocidad, cada partícula queda individualmente suspendida en el flujo, mientras que el lecho permanece inmóvil en relación a las paredes de la columna. A esto se le conoce como lecho fluidizado y la velocidad superficial del gas en ese momento es conocida como velocidad mínima de fluidización ( $U_{mf}$ ). Esta velocidad es de crucial importancia para caracterizar el comportamiento de un lecho fluidizado (Levenspiel & López, 1993; Smith, 2007).

A mayor velocidad del gas, mayor será la separación entre las partículas, provocando que aumente la altura del lecho. Si se sigue aumentando la velocidad del gas las partículas serán expulsadas fuera de la columna. A esto se le conoce como transporte neumático o hidráulico (columna al extremo derecho de Figura 3.1) (Levenspiel & López, 1993).

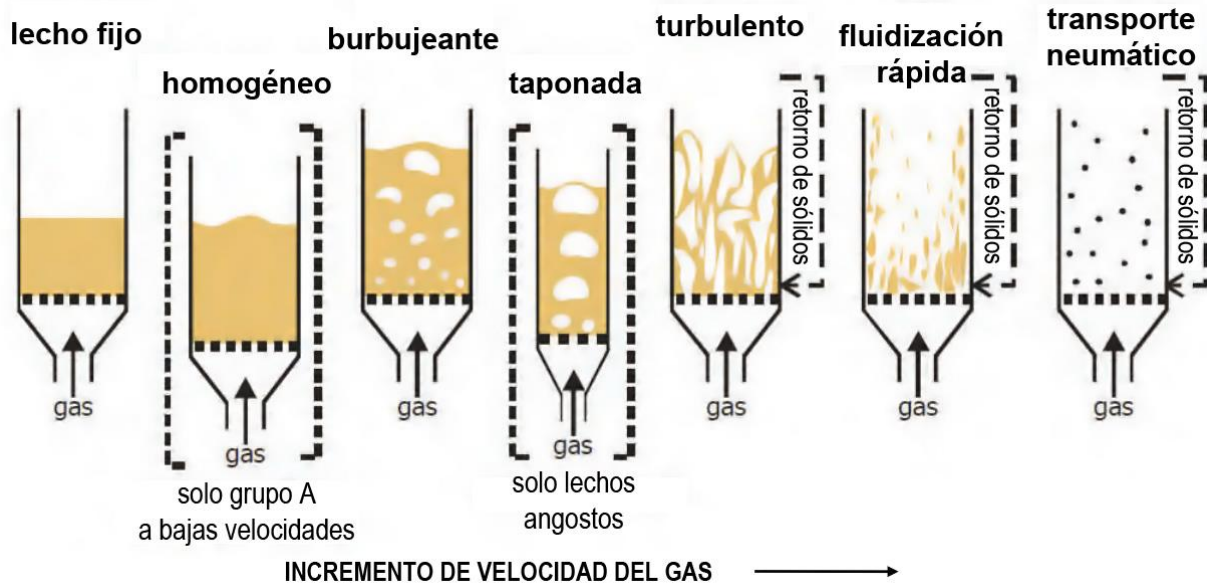


Figura 3.1 Regímenes de fluidización. Basada en Mujumdar 2011, Capítulo 3, p 46.

Las cinco columnas al medio de la Figura 3.1 representan diversos regímenes del lecho fluidizado. Los regímenes que se pueden alcanzar dependen del tipo de partícula, las características de la columna y la velocidad del gas.

En la Tabla 3.2 se resume y explica las características y apariencias de los diversos regímenes de fluidización. Los regímenes listados en dicha tabla también se representan gráficamente. Por ejemplo, en la Figura 3.2 se utilizan los números de Reynolds ( $Re$ ) y Arquímedes ( $Ar$ ) para delimitar las condiciones a las cuales se tienen los diferentes regímenes de fluidización. En la gráfica  $U_{mf}$  corresponde a la velocidad mínima de fluidización y  $U_t$  es la velocidad a la cual el gas arrastra las partículas fuera del lecho. Además, las letras A, B y D representan el tipo de partícula (Mujumdar, 2011).

El término fase se relaciona con las distintas regiones observadas en la mezcla partícula-gas, cada fase posee propiedades uniformes a través de ésta (Tester & Modell, 1997). En el caso de un lecho fluidizado, estas fases se diferencian entre ellas por la concentración de partículas dispersas en el gas.

La Figura 3.2 representa las relaciones entre la velocidad adimensional de la partícula,  $U_t^*$ , y el diámetro adimensional de la partícula,  $d_p^*$ , para los diversos tipos de secadores fluidizados. Se puede observar en el eje de las abscisas que el grupo D de partículas de Geldart se encuentran a la derecha por lo cual estas partículas se trabajan principalmente con lecho fluidizado burbujeante o lecho de chorro.

Tabla 3.2 Descripción de los Regímenes de Fluidización. Basada en Mujumdar (2011), Capítulo 3, p 46.

Rango de velocidad	Régimen	Características y apariencias del régimen
$0 \leq U \leq U_{mf}$	Lecho fijo	Las partículas están en reposo, flujo de gas a través de intersticios
$U_{mf} \leq U \leq U_{mb}$	Lecho fluidizado homogéneo	El lecho se expande suave y homogéneamente con poco movimiento de las partículas, la superficie del lecho esta bien definida
$U_{mb} \leq U \leq U_{msl}$	Lecho burbujeante	Las burbujas del gas se forman por encima del distribuidor, crecen y se unen; las burbujas de gas promueven la mezcla de sólidos durante la subida a la superficie y su ruptura
$U_{msl} \leq U \leq U_C$	Flujo taponado (slug)	El tamaño de la burbuja se aproxima a la Sección transversal del lecho; la superficie del lecho sube y baja con frecuencia con la correspondiente fluctuación de la presión
$U_C \leq U \leq U_k$	Transición a fluidización turbulenta	La fluctuación de la presión disminuye gradualmente hasta que el régimen de fluidización turbulento es alcanzado
$U_k \leq U \leq U_t$	Régimen turbulento	Pequeños vacíos de gas y aglomeración de partículas se lanzan aleatoriamente; la superficie del lecho es difuso y difícil de distinguir
$U \geq U_t$	Fluidización rápida	Las partículas son transportadas fuera del lecho y necesitan ser reemplazadas y recicladas; normalmente tiene una región de fase densa en el fondo que coexiste con la fase diluida en la parte superior; el lecho no tiene superficie
$U \gg U_t$	Transporte neumático	Usualmente es una operación continua en la cual todas las partículas alimentadas son transportadas fuera en fase diluida, la concentración varía a lo largo de la columna; el lecho no tiene superficie

U, Velocidad;  $U_{mf}$  mínima de fluidización;  $U_{mb}$  mínima de burbujeo;  $U_{msl}$  mínima de taponado;  $U_C$  a la cual la fluctuación de la presión es máxima en el lecho taponado;  $U_k$ ; al inicio del régimen turbulento;  $U_t$  terminal;

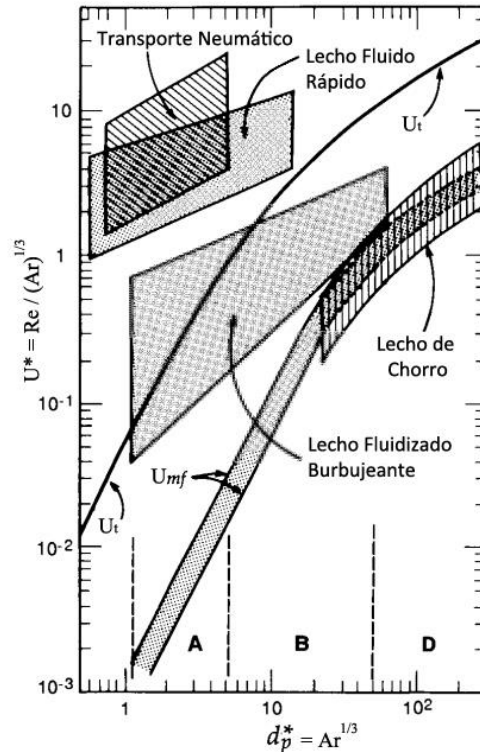


Figura 3.2 Regímenes de Fluidización para Sistemas Con y Sin Transporte. Tomada de Yang (2003), Capítulo 3, p 61, Figura 5.

### 3.3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE GELDART

En 1973 Geldart desarrolló un sistema de clasificación se ha convertido en un estándar para delimitar los tipos de partículas a fluidizar. Geldart fue el primero en clasificar el comportamiento de sólidos fluidizados por gases en cuatro grupos, caracterizados por la diferencia de densidades entre las partículas y el medio de fluidización,  $(\rho_p - \rho_g)$ , y por el diámetro promedio de las partículas,  $d_p$ , como se muestra en la Figura 3.3 (Yang, 2003).

El grupo C (cohesivo) corresponde a partículas finas y ultra finas que tienden a aglomerarse. En el grupo A (aereables) se encuentran partículas en el rango de  $30 < d_p (\mu\text{m}) < 100$  y  $\rho_p < 1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Por su parte, en el grupo B (arenosos) los rangos de valores son  $40 < d_p < 500 \mu\text{m}$ ,  $1400 < \rho_p < 4000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Mujumdar, 2011).

Finalmente, en el grupo D se encuentran partículas grandes y/o densas, generalmente  $d_p > 500 \mu\text{m}$ ,  $\rho_p > 1400 \text{ kg m}^{-3}$ . En inglés este grupo es nombrado spoutable, cuya traducción en

español puede ser en surtidor o en chorro. Dentro de este grupo se encuentran las legumbres, los granos y los cereales (Kunii & Levenspiel, 1991; Mujumdar, 2011).

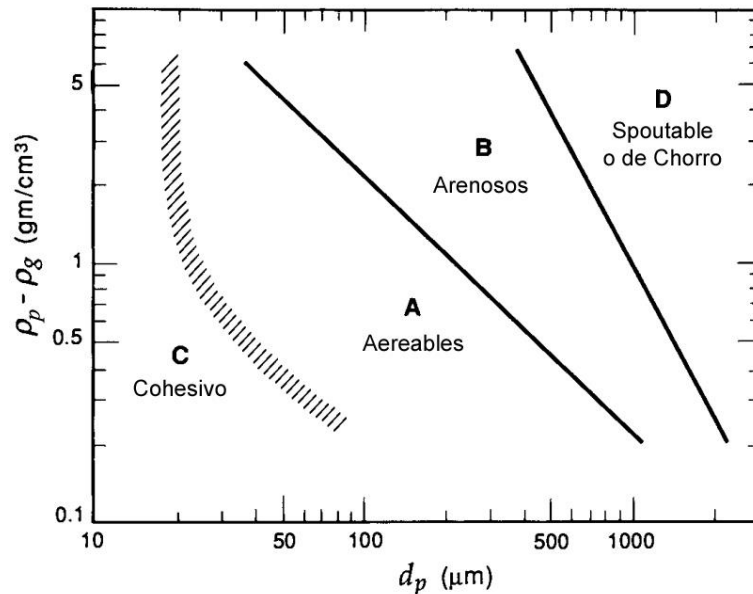


Figura 3.3 Diagrama de Clasificación de Partículas de Geldart para Fluidización con Aire a Temperatura Ambiente. Tomada de Kunii y Levenspiel (1991) Capítulo 3, p 78, Figura 9.

Cuando estos sólidos son colocados en lechos profundos resulta difícil fluidizarlos. Se comportan erráticamente, formando grandes burbujas que revientan, o se produce una severa canalización, o se tienen un comportamiento de chorro si el gas no se distribuye homogéneamente (Kunii & Levenspiel, 1991).

En cambio, se puede lograr un lecho burbujeante cuando el lecho es poco profundo, tiene suficiente diámetro, y la velocidad del gas no es mucho mayor que  $U_{mf}$ . Para evitar el comportamiento de taponado, especialmente al inicio de la fluidización, a veces los recipientes son diseñados con una Sección superior de mayor diámetro (Kunii & Levenspiel, 1991).

Los lechos fluidizados de sólidos del grupo D tienen las siguientes propiedades:

- Las burbujas coalescen rápidamente y crecen hasta alcanzar un gran tamaño;
- Las burbujas ascienden más lentamente que el resto del gas que percola a través de la emulsión;
- La fase densa tiene pocos espacios vacíos;

- Cuando el tamaño de la burbuja se aproxima al diámetro del lecho, se observa discos ascendentes de gas con pocas partículas en su interior (esto es nombrado en inglés flat slugs);
- Tiende a formar chorros de partículas con facilidad.

Para fluidizar estos sólidos es necesaria una enorme cantidad de gas, generalmente mucho más que la necesaria para operaciones químicas y físicas. Por esta razón se tiende a utilizar equipos del tipo de lecho de chorro ya que estos requieren mucho menos gas (Kunii & Levenspiel, 1991).

### 3.3.3 CAÍDA DE PRESIÓN COMO FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD

Al realizar los experimentos de variación de la velocidad de un gas que pasa a través de un lecho de partículas (ya mencionados en la Sección 3.3.1), además de observar la variación de regímenes de fluidización, también se observa una caída de presión del gas a su paso a través del lecho. Esta caída de presión es una guía para determinar las diferentes velocidades de fluidización, mencionadas en la Tabla 3.2; para lo cual se construye una gráfica de caída de presión versus la velocidad del gas, Figura 3.4.

La curva continua de dicha Figura 3.4 representa una curva normal de fluidización. En ella se observa que al aumentar la velocidad del gas, la caída de presión primero aumenta linealmente. Esto sucede en la región de comportamiento de lecho fijo. Luego se observa una región de transición de lecho fijo a fluidizado. Finalmente, en la región de comportamiento de lecho fluidizado la caída de presión permanece constante. En este momento la caída de presión a través del lecho es igual al peso de las partículas dividido entre el área de Sección transversal del lecho (Smith, 2007; Yang, 2003).

A las condiciones mínimas de fluidización se cumple que la caída de presión,  $\Delta P$ , es igual a (Kunii & Levenspiel, 1991):

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_g)g \quad (3.1)$$

donde  $L_{mf}$  es la altura del lecho a la velocidad mínima de fluidización,  $\varepsilon_{mf}$  es la porosidad del lecho a la velocidad mínima de fluidización,  $\rho$  es la densidad, con subíndice p para la partícula y subíndice g para el gas. Al inicio de la fluidización la porosidad es ligeramente superior a la de un lecho empacado,  $\varepsilon_{lecho}$ , y corresponde a un lecho de material empacado suelto y al azar. Por tanto,  $\varepsilon_{mf}$  puede ser obtenida a partir de datos de lechos empacados al azar o, mejor aún, puede ser determinada experimentalmente empleando la Ecuación 3.1.

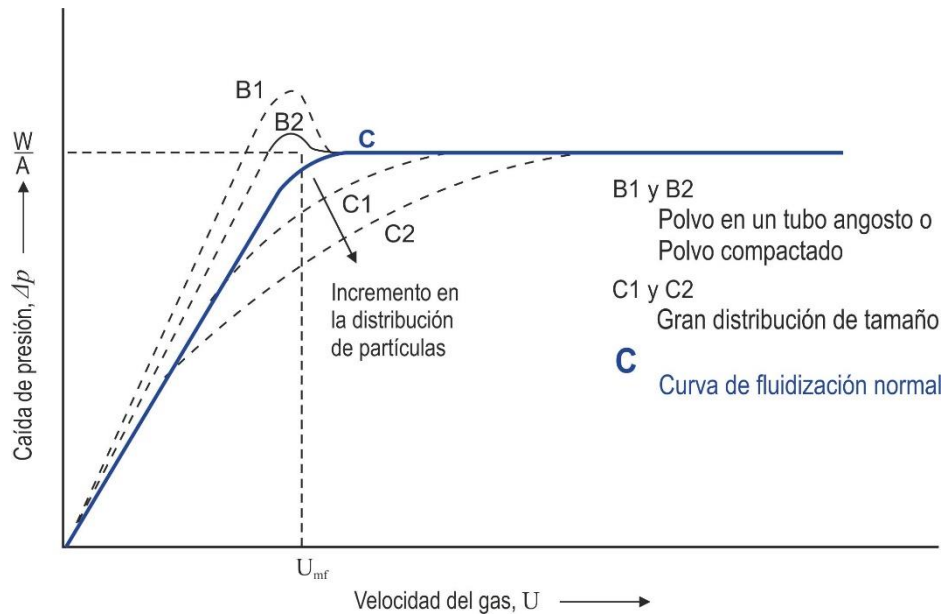


Figura 3.4 Caída de presión contra velocidad del gas para determinar velocidad mínima de fluidización. Tomada de Yang (2003), Capítulo 3, p72, Figura 6.

Si bien se espera que el comportamiento de la caída de presión sea principalmente lineal, se sabe que en la realidad esto no se cumple debido a diversos factores. Uno de ellos está asociado a la distribución del tamaño de partículas. A mayor distribución de tamaños, la velocidad de fluidización tiende a comportarse como una curva con valores menores a los esperados, tal como se indica con las curvas segmentadas C1 y C2, por debajo de la curva normal. Otro tipo de desviación se observa cuando las partículas se encuentran en una torre muy angosta o cuando han sido compactadas. Los resultados son las curvas segmentadas B1 y B2, por encima de la curva normal de la Figura 3.4 (Yang, 2003).

En un lecho de partículas grandes, se observa la formación de burbujas tan pronto como la velocidad del gas excede la velocidad mínima de fluidización, y por tanto  $U_{mb} \approx U_{mf}$  (Kunii & Levenspiel, 1991).



En la Figura 3.5 se muestra los resultados para un lecho de partículas pequeñas, ligeras, casi esféricas y con distribución de tamaño. La gráfica inferior es similar a la Figura 3.4, descrita previamente. Por su parte, la gráfica superior representa la variación de la altura del lecho al aumentar la velocidad del gas y es utilizada para determinar la velocidad mínima de burbujeo. La curva en esta gráfica indica que, al aumentar la velocidad del gas más allá de la velocidad mínima de fluidización, primero el lecho se expande homogéneamente sin observarse burbujas. Luego, al alcanzarse el régimen de lecho burbujearante la altura del lecho tiende a disminuir y luego a aumentar. Para esta gráfica en específico, la relación  $U_{mb}/U_{mf}$  es aproximadamente igual a tres. El valor de esta relación depende de la densidad y viscosidad del gas ( $\mu_g$ ), la densidad del sólido, la distribución de tamaños y el tamaño medio de las partículas. La Figura 3.6 muestra la dependencia de la relación  $U_{mb}/U_{mf}$  con la densidad y el tamaño medio de partículas. Puede observarse que al aumentar el tamaño medio la relación tiende a uno (Kunii & Levenspiel, 1991).

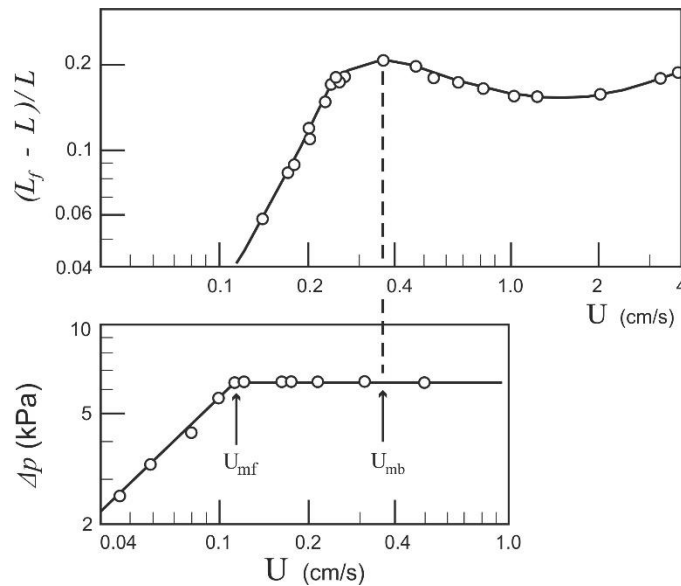


Figura 3.5 Transición de fluidización homogénea a régimen de lecho burbujearante. Donde  $L$ , altura del lecho fijo empacado aleatoriamente; y  $L_f$  altura promedio del lecho fluidizado. Tomada de Kunii y Levenspiel (1991) Capítulo 3, p 73, Figura 6.

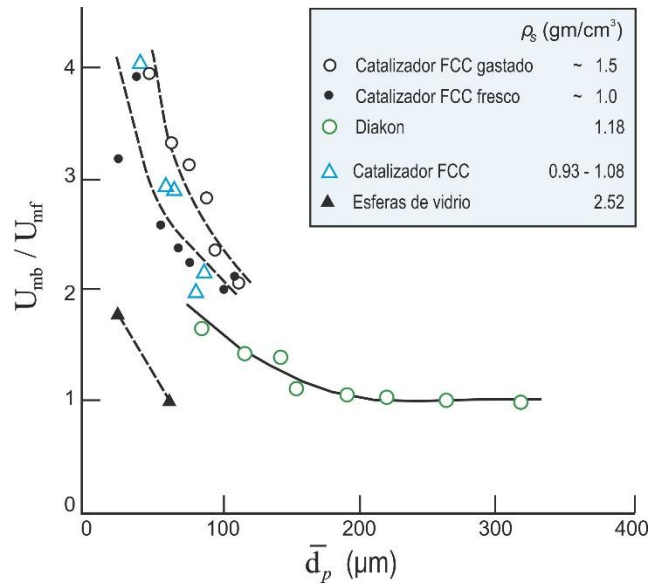


Figura 3.6 Relación entre la velocidad mínima de burbujeo y la velocidad mínima de fluidización como función de la densidad y el tamaño medio de las partículas. Tomada de Kunii y Levenspiel (1991) Capítulo 3, p 74, Figura 7.

Para determinar la velocidad mínima de fluidización, haciendo uso de la gráfica de caída de presión contra velocidad del gas, McCabe, Smith y Harriott (2007) sugieren que, al realizar el experimento, primero se fluidice vigorosamente el lecho, para luego dejarlo asentarse interrumpiendo el flujo de gas y finalmente, aumentar después de manera gradual el flujo hasta que el lecho comience a expandirse. A veces se obtienen valores más reproducibles de velocidad mínima de fluidización a partir de la intersección en la gráfica de la línea de caída de presión en el lecho fijo y la línea de caída de presión en el lecho fluidizado, tal como se muestra en la Figura 3.7.

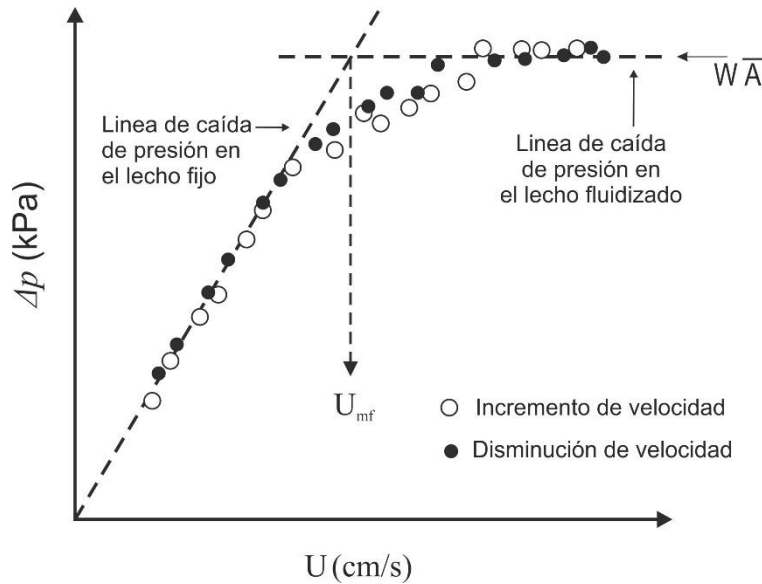


Figura 3.7 Uso de las líneas de caída de presión en el lecho fijo y en el lecho fluidizado para determinar experimentalmente la velocidad mínima de fluidización. Tomada de Kunii y Levenspiel (1991) Capítulo 3, p 72, Figura 5.

### 3.3.4 EFECTOS DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA EN LA FLUIDIZACIÓN

La temperatura tiene una influencia moderada sobre las mecánicas de fluidización de las partículas, como se puede observar en la Figura 3.8. Aún a temperaturas muy elevadas, como 200°C, las variaciones en la velocidad mínima de fluidización son considerablemente pequeñas para partículas de gran tamaño. Por tanto, a las temperaturas de trabajo del secado de granos (40-60°C), la influencia de la temperatura sobre la velocidad mínima de fluidización es despreciable (Yang, 2003).

La porosidad del lecho a la velocidad mínima de fluidización ( $\epsilon_{mf}$ ) incrementa con la temperatura en el caso de partículas finas (hasta un 8% para temperaturas arriba de 500°C), pero al parecer no se ve afectada cuando se trabaja con partículas grandes. (Kunii & Levenspiel, 1991)

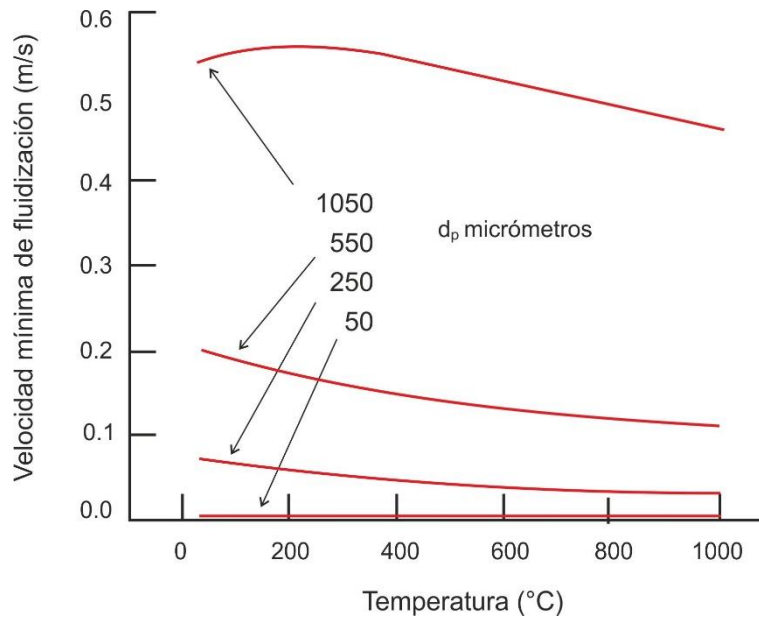


Figura 3.8 Efecto de la temperatura en la velocidad mínima de fluidización para diferentes tipos de partículas. Tomada de Yang (2003), Capítulo 5, p 142, Figura 2.

El efecto de la presión de operación de lechos de partículas del grupo D fue estudiada por Olowson and Almstedt (1991). Ellos determinaron que la velocidad mínima de fluidización disminuye al aumentar la presión. Además, la influencia de la presión sobre la velocidad mínima de fluidización es más pronunciada cuanto más grandes son las partículas. Por su parte Kunii and Levenspiel (1991), afirman que para alúmina gruesa la relación  $U_{mb}/U_{mf}$  incrementa hasta un 30% al incrementar la presión de operación. Esto sugiere que un aumento en la presión de operación amplía el rango de la fluidización de partículas.

### 3.4 SELECCIÓN DE SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO

Los secadores de lecho fluidizado destacan sobre otros tipos de secadores por tener las siguientes ventajas: alta velocidad de secado, gran eficiencia térmica, fácil transporte del material dentro del secador, facilidad de control y bajos costos de mantenimiento. Sin embargo, también poseen ciertas desventajas, tales como: alta caída de presión, altos gastos energéticos, baja calidad de fluidización de algunos tipos de partículas, secado no uniforme en algunos tipos de secadores, desgaste de tubos y recipientes, arrastre de partículas finas, desgaste o pulverización de partículas y aglomeración de partículas finas. Estos secadores operan comúnmente a una velocidad superficial del gas de dos a cuatro veces la velocidad mínima de fluidización ( Law & Mujumdar, 2006).

Como se mencionó en la Sección 3.3.2, las legumbres, los granos y los cereales pertenecen al grupo D de la clasificación de Geldart. Law and Mujumdar (2006), recomiendan para el secado de estas partículas el uso de los siguientes tipos de secadores: de lecho fluidizado vibratorio, de lecho fluidizado con agitación, de lecho fluidizado de pulso, de lecho fluidizado con deflectores, de lecho fluidizado híbrido y de lecho de chorro.

De los secadores anteriormente mencionados, el más conveniente para realizar pruebas experimentales es el secador de lecho de chorro, debido a que es el más sencillo de construir y no posee partes mecánicas móviles. Además este equipo y el secador de lecho fluidizado convencional, ambos en operación discontinua, son los más utilizados en los artículos de investigación científica para el secado de granos (Jittanit, Srzednicki, & Driscoll, 2010; López, 2006; Vázquez & Vizcarra, 2008; Zahed & Epstein, 1992). A continuación se detallan las características del secador de lecho fluidizado convencional y el secador de lecho de chorro.

### **3.5 SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO CONVENCIONAL**

Un lecho fluidizado convencional se forma al hacer pasar una corriente de gas desde la parte inferior de un lecho de partículas sólidas. El lecho de partículas descansa sobre un plato distribuidor de gas. El gas de fluidización pasa a través del distribuidor, se distribuye uniformemente en toda el área transversal del lecho y suspende las partículas sólidas (Law & Mujumdar, 2014).

Los secadores de lecho fluidizado convencional pueden operar de forma discontinua, semi continua, continua en mezcla perfecta y continua en flujo pistón. La forma de operación se establece en base al sólido. Por su parte, el gas es alimentado y retirado continuamente en todos los secadores previamente mencionados (Law & Mujumdar, 2006).

En el secador discontinuo, todo el lote de sólido a procesar (con cierta humedad inicial), se carga en el equipo y permanece dentro hasta alcanzar la humedad final deseada. El tiempo de permanencia es el mismo para cada partícula, independiente de que se tenga una distribución de tamaños de partículas (Law & Mujumdar, 2006).

En los secadores continuos se introduce y retira constantemente el sólido. Aunque todas las partículas tengan igual tamaño y geometría, no permanecerán igual tiempo dentro del equipo, en cambio se tendrá una distribución de tiempo de residencia (Fogler, 2006).

Los secadores de lecho fluidizado discontinuos son utilizados cuando se requiere una capacidad de procesamiento baja (50 a 1000 kg/h) o se debe procesar diferentes productos en una misma línea de producción. También es preferible operar discontinuamente cuando las operaciones preliminares y posteriores funcionan de esa misma manera, o se requiere realizar varias operaciones unitarias en secuencia en el mismo equipo. En estos equipos es posible ajustar la velocidad y la temperatura del gas para reducir el consumo energético y el desgaste de las partículas (Law & Mujumdar, 2006).

Un secador de lecho fluidizado semicontinuo consiste en una serie de recámaras de secado que pueden ser fijas o hacerse rotar sobre un eje. El producto húmedo es dosificado y cargado en lotes. Luego, el producto puede ser transportado de una recámara a otra o bien, el lote pueden rotar sobre un eje. Con este procedimiento se crea una operación continua ininterrumpida durante largos periodos. Además, se puede variar la velocidad y la temperatura del gas en las diferentes subcámaras (Law & Mujumdar, 2006).

El lecho fluidizado continuo en mezcla perfecta es uno de los secadores más utilizados en la industria. Como el lecho de partículas está bien mezclado, la temperatura del lecho es uniforme e igual a las temperaturas del producto y del gas agotado. Sin embargo, la distribución del tiempo de residencia de las partículas es amplia, con lo que resulta un amplio rango de contenido de humedad del producto. Por otro lado, como el material es continuamente cargado en el lecho fluidizado de partículas relativamente secas, se obtiene la ventaja adicional de un sólido más fácil de fluidizar y una fluidización de mejor calidad (Law & Mujumdar, 2006).

El secador de lecho fluidizado continuo en flujo pistón, consiste en un equipo horizontal con deflectores verticales, con los cuales se crean pequeños flujos de partículas, por lo cual la distribución de tiempo de residencia de las partículas se estrecha. Las partículas fluyen continuamente como un pistón desde la entrada hasta su salida del equipo. Esto asegura que todas las partículas tengan casi el mismo tiempo de residencia, independientemente de su tamaño, y asegura un contenido de humedad uniforme del producto (Law & Mujumdar, 2006).

### **3.5.1 IMPORTANCIA DEL DISTRIBUIDOR DE AIRE**

Para poder obtener una buena fluidización es necesario contar con un flujo de gas uniformemente distribuido en el área transversal del lecho. De esta forma se asegura una buena mezcla del lecho sin burbujes excesivos o formación de discos ascendentes.

A nivel industrial esto se logra utilizando diversos tipos de distribuidores de gas, tales como los detallados en el Capítulo 4 de Kunii and Levenspiel (1991). Wormsbecker, Pugsley & Tanfara (2007), explican la influencia del tipo de perforación en la hidrodinámica del lecho, obteniendo mejores resultados con platos con perforaciones parciales al trabajar con un secador de fondo cónico. Por su parte, Sutar and Sahoo (2011), emplearon un secador cuyo fondo cónico estaba relleno de esferas de acero de 3 mm y sílica gel, sobre los cuales se colocaba el plato distribuidor. Sus resultados indican que, un aumento en el diámetro de los orificios de los platos perforados favorece la velocidad de secado, siempre y cuando se cumpla que la caída de presión en el distribuidor se encuentre entre el 20 y el 40% de la caída de presión en el lecho (Kunii & Levenspiel, 1991).

Muchas veces, al trabajar con equipos a escala de laboratorio, para lograr una buena distribución del gas, es necesario colocar adicionalmente un lecho fijo de partículas inertes por debajo del plato distribuidor; tal como ya ha sido mencionado previamente en el artículo de Sutar and Sahoo (2011).

Respecto a la altura que debe tener el lecho de material inerte, Szekely and Poveromo (1975), indican que para obtener buenas distribuciones de aire, la relación mínima entre la altura de un lecho distribuidor y el diámetro de la columna debe ser mayor a 1; y recomiendan valores entre 1.5 y 2.5. Ellos también determinaron que entre menor sea el diámetro de las partículas en el distribuidor mejor será la distribución de velocidades a la salida. Recomendamos utilizar una relación  $D/d_{p,inerte}$  de entre 25 y 40. Más allá de este valor se reduce el efecto causado por el vacío en las paredes, pero se obtienen caídas de presión significativas.

### **3.5.2 REGIONES EN UN SECADOR EN RÉGIMEN DE LECHO BURBUJEANTE**

Un secador convencional operando en régimen de lecho burbujeante puede dividirse verticalmente en tres regiones (Pell, 1990); aunque algunos autores mencionan dos (Mujumdar, 2014) o hasta cuatro regiones (Zenz, 1968). El número de regiones existentes depende de las características del sistema, tales como el tipo de distribuidor de aire y el tamaño de las partículas. En la Figura 3.9, se esquematiza el caso con tres regiones, las cuales de abajo hacia arriba se nombran: región de entrada<sup>1</sup> (grid region, en inglés); región de emulsión; y francobordo (freeboard).

La región de entrada puede existir por encima del distribuidor. En esta región se forman chorros de aire que parten desde los orificios del distribuidor, antes que se formen las burbujas (Figura 3.10). Estos chorros provocan una alta turbulencia y mezclado de partículas, por lo cual la transferencia de masa en esta región es un orden de magnitud o mayor, que en la región de emulsión (Pell, 1990). En cambio, en la región de emulsión la fluidización es uniforme y estable (Mujumdar, 2014).

---

<sup>1</sup> La traducción al español no fue encontrada en la literatura especializada. La que se presenta acá es una traducción libre de los autores de este trabajo.

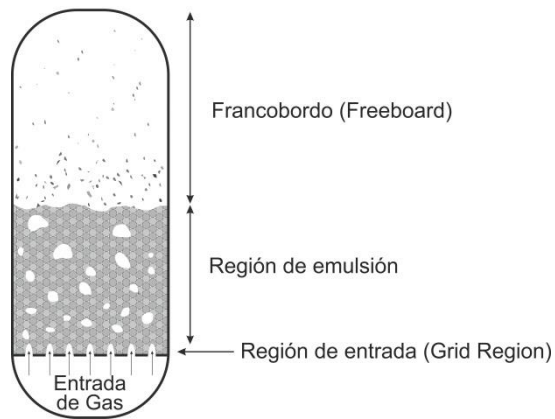


Figura 3.9 Regiones observables en un secador en régimen de lecho burbujeante. Tomada de Pell (1990), Capítulo 1, p 2, Figura 1-1.

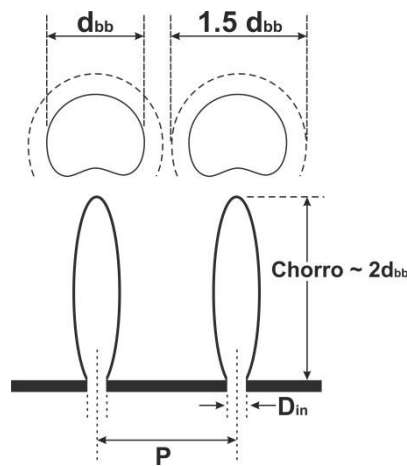


Figura 3.10 Formación de chorros y burbujas en la región de entrada. Tomada de Pell (1990), Capítulo 3, p 26, Figura 3-2.

Por su parte, el francobordo se ubica por encima de la superficie del lecho de partículas. En esta región se encuentran suspendidas partículas finas cuyas velocidades terminales son menores que la velocidad de operación del gas. La concentración de partículas suspendidas disminuye con respecto a la altura del francobordo; hasta llegar a una altura más allá de la cual la concentración de sólidos suspendidos permanece constante (Law & Mujumdar, 2014). Al trabajar con partículas grandes como las del grupo D, las partículas ubicadas en esta tercera región corresponderían principalmente a partículas quebradas o pulverizadas.



### 3.5.3 ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

La velocidad mínima de fluidización es el parámetro más importante que hay que conocer para la operación de un lecho fluidizado. Debido a esto se han hecho muchos estudios para desarrollar técnicas para la determinación o predicción de ésta (Smith, 2007).

Generalmente la velocidad mínima de fluidización se determina experimentalmente, como se ha explicado en las Secciones 3.3.3 y 3.3.4. Sin embargo, también puede ser estimada utilizando diversas correlaciones tales como las mostradas en Gupta and Sathiyamoorthy (1998) o en Smith (2007). Dichas correlaciones permiten aproximaciones muy acertadas dentro de un cierto rango de los parámetros de operación (Law & Mujumdar, 2006)

Kunii and Levenspiel (1991) presentan una versión modificada de la ecuación de Ergun (conocida como correlación de Wen y Yu), que permite una estimación general de la velocidad mínima de fluidización, utilizando los números de Reynolds y Arquímedes. A continuación se presenta una forma condensada de dicha correlación:

$$K_1 Re^2 + K_2 Re = Ar \quad (3.2)$$

Donde:

$$Re = \left( \frac{d_p \rho_p U_{mf}}{\mu} \right) \quad (3.3)$$

$$Ar = \frac{(\rho_p - \rho_g) g d_p^3 \rho_g}{\mu^2} \quad (3.4)$$

$$K_1 = \frac{1.75}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \quad (3.5)$$

$$K_2 = \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \quad (3.6)$$

En las ecuaciones previas,  $\phi$  es la esfericidad de la partícula y  $g$  la fuerza de gravedad. Para partículas no esféricas,  $d_p$  representa el diámetro equivalente de la partícula, el cual corresponde al diámetro de una esfera que posee el mismo volumen que la partícula.

A partir de todas las ecuaciones anteriores se deduce que la velocidad mínima de fluidización depende de características físicas del sólido a fluidizar (tales como su tamaño medio, densidad y esfericidad) y propiedades del gas (densidad y viscosidad). Para un gas, estas dos propiedades dependen solo de la temperatura y de la presión; y su efecto sobre la velocidad mínima ya ha sido abordado en la Sección 3.3.4.

Según Kunii and Levenspiel (1991), Wen y Yu descubrieron que  $K_1$  y  $K_2$  permanecen casi constantes para diferentes partículas en un amplio rango del número de Reynolds y que por tanto se pueden obtener predicciones de  $U_{mf}$  con una desviación estándar  $\pm 34\%$ . Sin embargo, posterior a ellos diversos autores han reportado distintos valores para  $K_1$  y  $K_2$ .

Una desventaja de la correlación de Wen y Yu es que no toma en cuenta el efecto del diámetro de la columna ni de la altura del lecho sobre la caída de presión y, en consecuencia, sobre la velocidad mínima de fluidización. Es de esperarse que a mayor altura del lecho se obtenga mayor caída de presión y resultará más difícil fluidizar las partículas. Por su parte, si el diámetro de la columna es relativamente pequeño con respecto al tamaño de las partículas, estas chocarán más frecuentemente con la pared. Como consecuencia de estos choques, la caída de presión en la región cercana a la pared será mayor que en el centro de la columna. Es decir, se tendrá una distribución de caída de presión en el área transversal al flujo del aire (Rao, Curtis, Hancock, & Wassgren, 2010).

Di Felice and Gibilaro (2004), estudiaron el efecto de la pared en lechos fijos para diversos números Reynolds y relaciones de diámetro de columna a diámetro de partícula,  $D/d_p$ , de hasta 40. Determinaron que para Reynolds bajos el efecto de la pared disminuye al aumentar  $D/d_p$  y se vuelve despreciable para relaciones mayores a 15. Esta tendencia es opuesta en casos de Reynolds altos, es decir el efecto de la pared aumenta al aumentar  $D/d_p$ . Ellos también propusieron una ecuación basada en la ecuación de Ergun para relacionar la caída de presión con la relación  $D/d_p$ , para las situaciones donde el efecto de la pared es importante.

En un estudio similar, Rao, Curtis, Hancock & Wassgren (2010), trabajaron con lecho fluidizado, Reynolds bajos (menores de 10), relaciones  $D/d_p$  de hasta 160 y relaciones de altura del lecho a diámetro de columna,  $L/D$ , de hasta 6. Comprobaron que en columnas muy delgadas ( $26.6 \leq D/d_p \leq 240$ ) y lechos muy altos, la altura del lecho influye apreciablemente en la velocidad mínima de fluidización. Ellos propusieron otra modificación a la ecuación de Ergun en la que se considera tanto la dependencia de  $D/d_p$  como de  $L/D$ .

Sin embargo, Escudero (2010) al trabajar en un lecho fluidizado de partículas de Geldart tipo B con  $D/d_p$  de 185 y  $0.5 \leq L/D \leq 3$ , demostró que la velocidad mínima de fluidización no muestra cambios considerables al incrementar la relación  $L/D$ . Adicionalmente, otros autores al trabajar con partículas de Geldart tipo D; tales como trigo con una relación con  $D/d_p$  de 39 y  $0.5 \leq L/D \leq 0.8$  (Hajidavalloo, 1998), maíz con una relación  $D/d_p$  de 25 y  $0.2 \leq L/D \leq 0.6$ , (Soponronnarit, Pongtornkulpanich, & Prachayawarakorn, 1997), arroz con cascarilla con una relación  $D/d_p$  de 57 y  $0.25 \leq L/D \leq 1$  (Soponronnarit & Prachayawarakorn 1994) y soya con una relación  $D/d_p$  de 25 y  $0.4 \leq L/D \leq 0.9$  (Soponronnarit, Swasdisevi, Wetchacama, & Wutiwiwatchai, 2001); también comprobaron que no hay un cambio considerable en la velocidad mínima de fluidización con la altura del lecho. Adicionalmente, demostraron que la  $U_{mf}$  se puede predecir perfectamente con la correlación de Wen y Yu.

Por su parte, Hajidavalloo (1998) investigó el efecto de la humedad inicial de granos de trigo en la velocidad mínima de fluidización. Comprobó que al aumentar el contenido de humedad de los granos aumenta la velocidad mínima de fluidización. Este aumento se puede dividir en tres zonas.

En la primera zona (de baja humedad), hay una pequeña pendiente para la variación de  $U_{mf}$ . En la segunda zona (alta humedad hasta llegar a la saturación) la variación es relativamente alta. En la zona tres se muestra nuevamente una pequeña y no lineal variación de  $U_{mf}$ . Esta variación puede ser justificada basándose que las moléculas de agua pueden existir sobre la superficie de los granos sobrepasando el estado de saturación. Por tanto, la correlación de Wen y Yu, al no tomar en cuenta el contenido de humedad de la partícula, no es capaz de arrojar un valor acertado de la  $U_{mf}$  cuando se tienen valores de humedad muy altos.

#### **3.5.4 VELOCIDAD TERMINAL DE FLUIDIZACIÓN**

La velocidad terminal de una partícula es aquella en la cual la fuerza de arrastre se iguala a la fuerza de gravedad. Más allá de esta velocidad se produce el arrastre de la partícula (Rahman & Ahmed, 2012).

Al calcular la velocidad terminal, es necesario tomar en cuenta la distribución de tamaños de partículas, aún si esta no es considerablemente grande. Para tales fines se toma como referencia el diámetro de la partícula más pequeña presente en el lecho (Kunii & Levenspiel, 1991).

Anteriormente la velocidad terminal se determinaba a través de métodos iterativos. Haider y Levenspiel (1989) propusieron un método para determinarla matemáticamente sin incurrir en la prueba y el error. Ellos definieron la velocidad terminal como:

$$U_t = U_t^* \left[ \frac{\mu(\rho_p - \rho_g) g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (3.7)$$

Donde  $U_t^*$ , se obtiene a través de:

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{0.5}} \right]^{-1}, \quad 0.5 < \phi < 1 \quad (3.8)$$

El diámetro adimensional de la partícula,  $d_p^*$ , está relacionado con el número de Arquímedes tal como se mostró en la Figura 3.2.

Cuando se tienen un lecho de partículas fluidizadas, el movimiento de cada partícula depende de la presencia de las otras. Por tanto, la velocidad terminal obtenida a través de las ecuaciones anteriores no es válida para modelar una suspensión. En este caso, la velocidad terminal será menor y dependerá de la porosidad del lecho de partículas.

### 3.6 SECADOR DE LECHO DE CHORRO

Un secador de lecho de chorro consiste en una columna (ver Figura 3.11a) con base cónica (1) por cuyo centro se alimenta una corriente de gas (2) dirigida exclusivamente hacia el centro del lecho. En este tipo de equipo se distinguen tres regiones, el núcleo central conocido como surtidor (3), la región anular entre el surtidor y la pared de la columna llamada ánulo (5) y una región por encima de la superficie del lecho (6), conocida como fuente (7).

En el surtidor el gas arrastra las partículas hacia arriba hasta llevarlas a la fuente, en donde caen en forma de lluvia en el ánulo. Luego las partículas bajan lentamente a través del ánulo hasta llegar al surtidor donde vuelven a subir una y otra vez induciendo una buena mezcla y creando un flujo cíclico de partículas (Epstein & Grace, 2011; Law & Mujundar, 2014).

Mujumdar clasificó los lechos de chorro en al menos 30 variantes, cada una con sus específicas ventajas y limitaciones. Algunos ejemplos de ellos son, lechos de chorro periódicos, lechos de chorro múltiples, lechos de chorro 2D y lecho de chorro oscilantes (Law & Mujund, 2014).

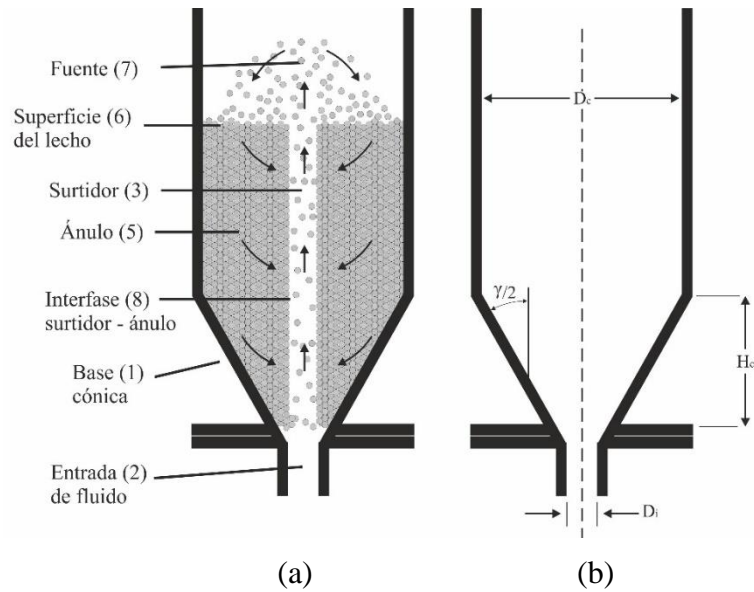


Figura 3.11 Secador de lecho de chorro. Basada en <http://www.pieb.org/quinuavariadad/proyecto.php>. Visitada 26/06/2015

Algunas ventajas de los lechos de chorro son:

- Menores caídas de presión comparadas con el lecho fluidizado convencional.
- Para partículas grandes existe un mejor contacto sólido gas comparadas con el lecho fluidizado convencional.
- Es posible el procesamiento de materiales pegajosos o adhesivos y aquellos que requieren que se remueva la capa superficial.
- La segregación de partículas es menos severa (Patel, Bridwater, Baker & Birmingham, 1985).

### 3.6.1 REGÍMENES DE FLUJO EN LECHO DE CHORRO

Debido a la configuración del equipo, los secadores de lecho de chorro exhiben solo algunos de los regímenes de fluidización detallados en la Sección 3.3.1. Los regímenes que se pueden alcanzar dependen de la velocidad del gas, las características del sólido, y de la geometría y configuración del equipo. Los cuatro posibles regímenes que se pueden obtener se muestran en la Figura 3.12: Lecho Fijo (a), Lecho de chorro (b), Lecho burbujeante (c) y Flujo taponado (d) (Epstein & Grace, 2011).

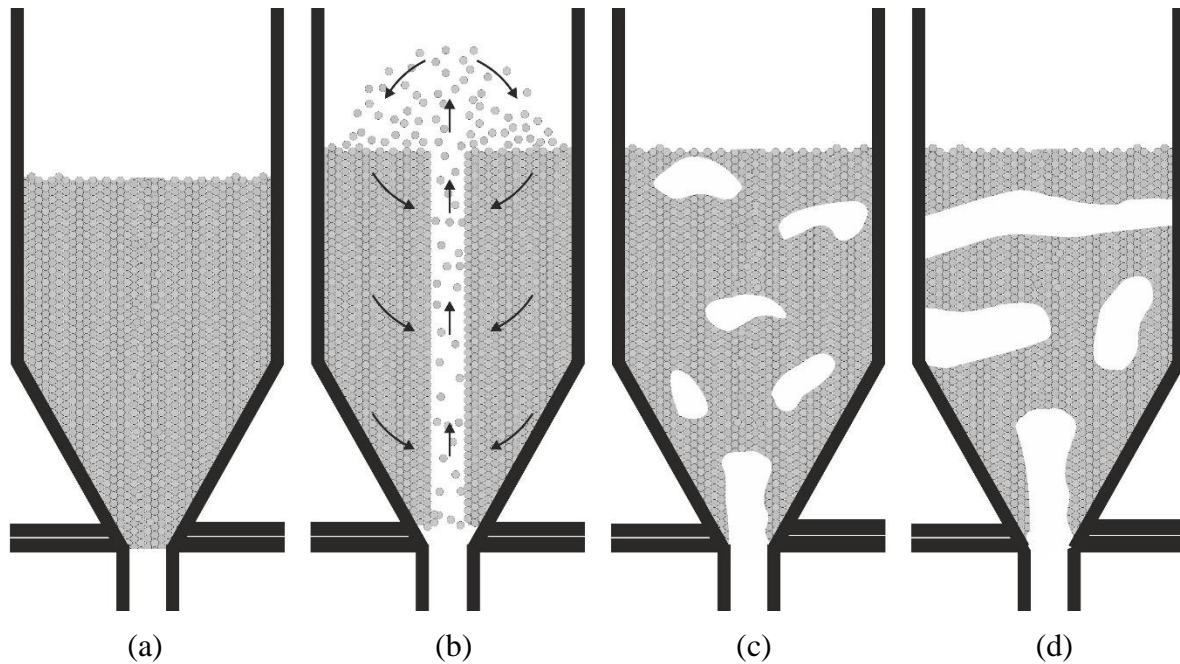


Figura 3.12 Regímenes de fluidización en lecho de chorro. Basada en Epstein & Grace, 2011. Capítulo 1, p 5, Figura 1.4

La transición entre los diferentes regímenes se representa en gráficas de la altura del lecho fijo empacado aleatoriamente,  $H$ , contra la velocidad superficial del gas, conocidas como diagramas de régimen (Figura 3.13). Se puede observar que en el caso del trigo, Figura 3.13a, se alcanzan los cuatro regímenes de flujo, mientras para la arena, Figura 3.13b, no se logra el régimen de lecho de chorro.

Adicionalmente en el diagrama de régimen del trigo (Figura 3.13a), se observa que existe una altura de lecho por encima de la cual no se puede obtener el régimen de lecho de chorro, y éste es reemplazado por una fluidización de baja calidad. Dicha altura es conocida como altura máxima del lecho,  $H_{max}$ .

### 3.6.2 CAÍDA DE PRESIÓN COMO FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD EN UN LECHO DE CHORRO

Al igual que en la Sección 3.5.3, la transición de un lecho estático a un lecho de chorro puede observarse a través de la gráfica de caída de presión contra velocidad del gas (Figura 3.14). Esta gráfica también es utilizada para determinar experimentalmente la velocidad mínima para alcanzar el régimen de lecho de chorro (Epstein & Grace, 2010).

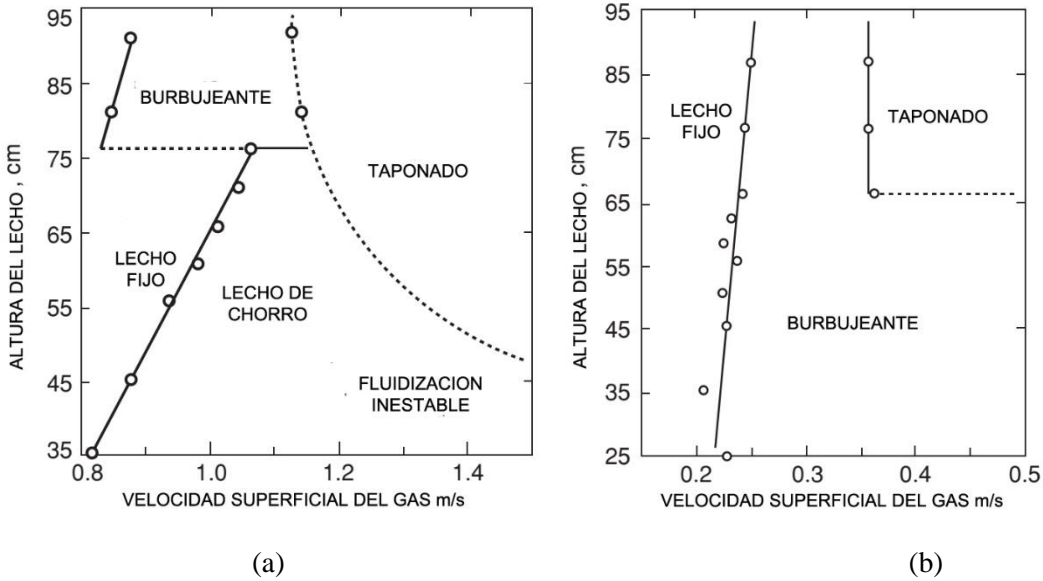


Figura 3.13 Diagramas de régimen para trigo,  $D_c=15\text{cm}$ ,  $D_i=1.25\text{cm}$  (a) y arena,  $D_c=15\text{cm}$ ,  $D_i=1.58\text{cm}$  (b). Tomada de Epstein 2011. Capítulo 1, pp 6-7, Figuras 1.5 y 1.6.

En la Figura 3.14 se muestran cuatro curvas de fluidización para diferentes alturas de lecho, cuyo comportamiento es similar. A bajas velocidades, el gas simplemente pasa a través del lecho sin perturbar las partículas, como en cualquier otro lecho fijo.

Posteriormente, al incrementar la velocidad del gas, la caída de presión aumenta casi linealmente hasta llegar a un valor máximo (Sección AB en curva para  $H=30\text{ cm}$ ), denominado caída de presión máxima,  $\Delta P_M$ , para la cual la correspondiente velocidad del gas se denota  $U_M$  (punto B). En esta Sección se forma gradualmente el surtidor (conocido como surtidor interno), al ser compactadas las partículas por encima de la entrada del gas.

Por encima de  $U_M$  la caída de presión decrece (Sección BC) debido a que la altura del surtidor interno es relativamente mayor que la altura de las partículas compactadas por encima de él. Al aproximarse al punto C las partículas son desplazadas de la región central, por lo cual se observa una expansión del lecho. Esta expansión del lecho a veces provoca una disminución apreciable de la caída de presión; pero también usualmente es acompañada por la expansión y contracción alternas del surtidor interno y por fluctuaciones en la caída de presión.

Al incrementar ligeramente la velocidad del gas más allá del punto C, llamado punto incipiente de chorro, el surtidor interno rompe la superficie del lecho. Cuando esto ocurre la concentración de partículas en la región sobre el surtidor disminuye abruptamente, causando una disminución drástica de la caída de presión en el punto D, en el cual el lecho se vuelve móvil y se alcanza el régimen de lecho de chorro estable. Este punto es llamado punto de inicio del lecho de chorro.

Al continuar incrementando la velocidad del gas más allá del punto D, el gas adicional pasa a través del surtidor por ser el camino de menor resistencia, provocando un aumento de la altura de la fuente sin causar efectos significativos en la caída de presión. Por tanto, más allá del punto D, la caída de presión,  $\Delta P_s$ , permanece relativamente constante.

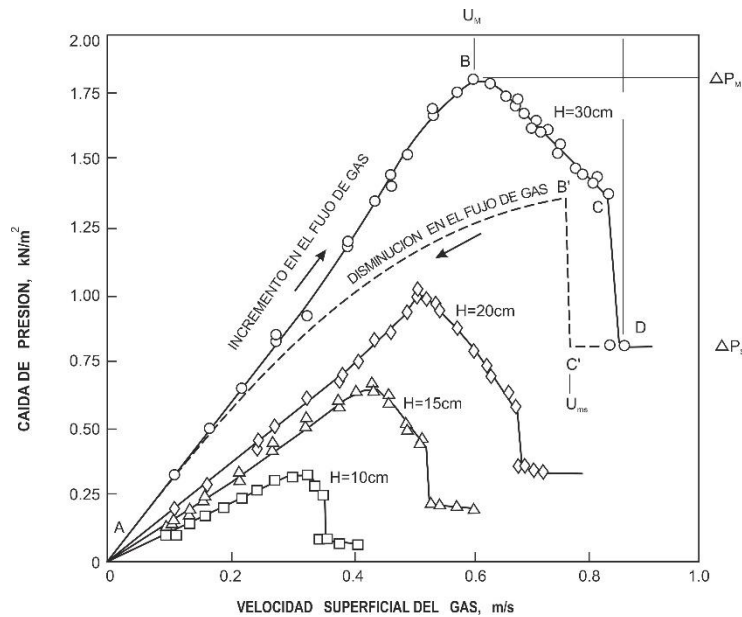


Figura 3.14 Curvas de caída de presión para el trigo. Tomado de Mathur & Epstein, 1974, Capítulo 2, p 15, Figura 2.1.

El punto incipiente de chorro (C) y el punto de inicio del lecho de chorro (D) dependen del historial del lecho y por tanto no son reproducibles. Por esta razón se trabaja con una velocidad más reproducible, denominada velocidad mínima de chorro  $U_{ms}$ , que se obtiene al disminuir lentamente la velocidad del gas partiendo desde el régimen de lecho de chorro estable (Mathur & Epstein, 1974).



Como indica la línea discontinua de la Figura 3.14, el régimen de lecho de chorro estable se mantiene hasta el punto C', el cual representa  $U_{ms}$ . Adicionalmente, el comportamiento de las cuatro curvas continuas, indica que dicha velocidad mínima de chorro depende directamente de la altura del lecho. Para la altura máxima del lecho,  $H_{max}$ , discutida previamente en la Sección 3.6.1, existe una velocidad mínima de chorro, denotada por  $U_m$  (Mathur & Epstein, 1974).

Una ligera disminución en la velocidad del gas causa el colapso del surtidor y la caída de presión aumenta súbitamente, llegando al punto B'. Al continuar la disminución de la velocidad del gas la caída de presión disminuye gradualmente a lo largo de la Sección B'A. Puede observarse que la curva de caída de presión (C'-B') presenta una mayor histéresis que la curva de caída de presión de un lecho fluidizado convencional, como la mostrada en la Figura 3.7, Sección 3.3.3 (Mathur & Epstein, 1974).

### 3.6.3 ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE CHORRO

Existen muchas correlaciones para estimar la velocidad mínima de chorro,  $U_{ms}$ . Sin embargo, entre las más usadas está la correlación de Mathur-Gishler. Esta ecuación fue desarrollada a partir de resultados obtenidos al fluidizar diversos materiales, con poca distribución de tamaño de partículas, en columnas de diámetro interno,  $D_c$ , desde 7.6 a 30.5 cm (Mathur & Epstein, 1974).

$$\frac{U_{ms}}{\sqrt{2gH}} = \left( \frac{d_p'}{D_i} \right) \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

En esta ecuación, la dimensión característica de la partícula,  $d_p'$ , incluye tanto el diámetro de la partícula, como su esfericidad y la rugosidad de su superficie. Este parámetro coincide con el diámetro promedio de las partículas,  $d_p$ , cuando se tienen partículas casi esféricas y de superficies lisas. Para ciertas partículas no esféricas, pero de geometría regular (tales como el trigo), se ha comprobado que resulta efectivo utilizar como longitud característica el diámetro equivalente (Mathur & Epstein, 1974).

Sin embargo, en la práctica el método más confiable y conveniente es determinar empíricamente un valor efectivo de  $d_p'$ , utilizando un secador de chorro a escala de laboratorio. La ventaja de éste procedimiento es que con el análisis experimental se puede obtener en conjunto tanto el efecto de la geometría de la partícula como la influencia que tienen las características de la superficie de la partícula en la  $U_{ms}$  (Mathur & Epstein, 1974).

### 3.6.4 CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UNA COLUMNA PARA LECHO DE CHORRO

Algunos de los parámetros utilizados para el dimensionamiento de una columna a ser utilizada como secador de lecho de chorro son: ángulo de la base cónica,  $\gamma$ , diámetro de la entrada del gas,  $D_i$ , diámetro de la columna,  $D_c$ , y altura de la base cónica,  $H_c$  (Figura 3.11b). Diversos autores han recomendado rangos a utilizar de cada uno de estos parámetros, de acuerdo a ciertos criterios.

El ángulo de la base cónica debe estar en el rango  $28^\circ \leq \gamma \leq 60^\circ$ . A ángulos menores a  $28^\circ$  el lecho es inestable, mientras que a valores mayores a  $60^\circ$  la velocidad de circulación del sólido es muy lenta, especialmente si el lecho es profundo (Epstein & Grace, 2010). Muchos autores toman como ángulo de la base cónica  $60^\circ$ , algunos ejemplos son: Passos, Mujumdar, & Raghavan (1989), He, Qin, Lim, & Grace (1994), Pereira, Godoi & Rocha (2010), Dotto, Souza, & Pinto (2011), Fujita, Borges, Correia, Gombossy, & Genovese (2013).

Otra condición para el dimensionamiento está asociada con la relación entre el diámetro de entrada del gas,  $D_i$ , y el diámetro de la columna,  $D_c$ , por medio de la ecuación (Epstein & Grace, 2010):

$$\frac{D_i}{D_c} \leq \epsilon_{ms}^{n/2} \quad (3.10)$$

donde  $n$ , el índice adimensional de Richardson y Zaki, puede ser estimado mediante la ecuación:

$$\frac{4.8 - n}{n - 2.4} = 0.047 Ar^{0.57} \quad (3.11)$$

Adicionalmente Becker (1961) indica que para partículas grandes, se debe cumplir  $D_i/D_c < 0.35$ .

Por otro lado, independientemente de la densidad de partículas se debe cumplir la relación (Epstein & Grace, 2010):

$$\frac{D_i}{d_p} \leq 25 \text{ a } 30 \quad (3.12)$$

Finalmente, la altura de la base cónica se calcula mediante la ecuación:

$$H_c = \frac{(D_c - D_i)/2}{\tan(\gamma/2)} \quad (3.13)$$

Adicional a los tres parámetros de dimensionamiento ya discutidos, se tiene la altura total de la columna. Para establecer dicha altura, se debe tomar en consideración tanto la altura máxima del lecho,  $H_{max}$ , como la altura de la fuente,  $H_f$ . La altura máxima del lecho puede predecirse utilizando la siguiente ecuación: (Epstein & Grace, 2010)

$$\frac{H_{max}}{D_c} = \frac{D_c}{d_p} \left( \frac{D_c}{D_i} \right)^{2/3} \frac{568b^2}{Ar} \left( \sqrt{1 + 35.9 \times 10^{-6} Ar} - 1 \right)^2 \quad (3.14)$$

Esta expresión solo es válida para valores de  $D_c$  menores a 0.5 m. En general la constante  $b$  se define como:

$$\frac{U_m}{U_{ms}} = b \quad (3.15)$$

Esta constante usualmente es mayor que la unidad, pero rara vez excede el valor de 1.5. Utilizando resultados de experimentos realizados con varios tamaños de partículas, diámetro de entrada del gas y temperaturas del lecho; diversos autores lograron ajustar la Ecuación (5.14) con un valor de  $b = 1.11$  (con el cual  $568b^2 = 700$ ), y la Ecuación (4.15) con  $b = 1.09$ . Puede observarse que la diferencia entre estos dos valores no es apreciable (Epstein & Grace, 2010).

Por su parte, Niksiar, Sohrabi & Rahimi (2013a), y He, Lim & Grace (1997) realizaron experimentos con partículas del grupo D (arena y esferas de vidrio) en lechos de chorro. Dichos autores determinaron que la relación  $H_{max}/D_c$  oscila entre 1.5 y 2.5; siendo esta relación menor entre mayor sea el tamaño de la partícula.

Según Day (1990), la altura de la fuente,  $H_f$ , puede predecirse utilizando la expresión:

$$\frac{H_f}{D_i} = 46.4 \left( \frac{U_i}{U_{ms}} - 1 \right)^{0.865} \left( \frac{H}{H_{max}} \right)^{-0.379} B^{2.13} \left( \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{-0.892} \left( \frac{d_p}{D_i} \right)^{-3.49} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{-2.75} \quad (3.16)$$

donde  $U_i$  es la velocidad superficial del gas en la entrada, basada en la Sección transversal de parte superior de la columna;  $H$  es la altura del lecho; y la constante  $B$  se define como:

$$B = \left( \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right) \left( \frac{U_{ms} U_t}{g D_i} \right) \quad (3.17)$$

donde  $U_t$  es la velocidad terminal de la partícula tal como ha sido definida en la Sección 3.5.4.

### **3.7 GENERALIDADES DEL SECADO**

El secado es una operación fundamental en la industria y una de las que tiene mayor demanda energética, ya que representa entre 10 y 20% del consumo total de las industrias alrededor del mundo. El secado describe el proceso de remover térmicamente sustancias volátiles para dar lugar a un producto parcial o totalmente libre de líquidos. El líquido a remover puede ser un solvente orgánico; pero en la industria de alimentos, el líquido más usual a remover es el agua ya contenida por el alimento (Law & Mujumdar, 2006).

Cuando un sólido húmedo se somete al secado ocurren dos procesos simultáneos:

1. Transferencia de energía en forma de calor desde el ambiente hacia la superficie del sólido y posteriormente hacia su interior; esta energía sirve para evaporar la humedad y/o aumentar la temperatura del sólido;
2. Transferencia de humedad, ya sea como líquido o vapor, desde el interior del sólido hacia la superficie; y transferencia externa a través de la película de fluido estancada alrededor de la superficie del sólido.

La velocidad con la que se realiza el secado está determinada por la velocidad de ambos procesos. La transferencia de calor del ambiente hacia el sólido puede ocurrir por conducción, convección o radiación y, en algunos casos, por una combinación de estos mecanismos. Por su parte la transferencia de calor en el interior del sólido se lleva a cabo principalmente por conducción (Law & Mujumdar, 2006).

El transporte de humedad dentro del sólido puede ocurrir por difusión de líquidos, difusión de vapor, difusión de Knudsen, diferencia de presión o una combinación de las anteriores (Mujumdar, 2011). Debido a que durante el secado pueden ocurrir cambios en la estructura del sólido, es posible que también ocurran cambios en el mecanismo del transporte interno de masa. El transporte externo de la humedad se lleva a cabo principalmente por convección forzada (Law & Mujumdar, 2006).

### 3.8 CINÉTICA DEL SECADO

La cinética de secado es una representación del contenido de humedad de un sólido,  $X$ , (y a veces de su temperatura) como función del tiempo. Gráficamente se representa por la llamada curva de secado (Figura 3.15). La cinética del secado es requerida para calcular el tiempo de secado necesario para alcanzar una humedad deseada y los requerimientos energéticos de la operación unitaria (Strumillo & Kudra, 1986).

La cinética del secado de materiales puede ser representada por tres maneras diferentes. Una es empleando métodos teóricos, otra es utilizando métodos meramente empíricos, y la tercera es una combinación de las dos anteriores.

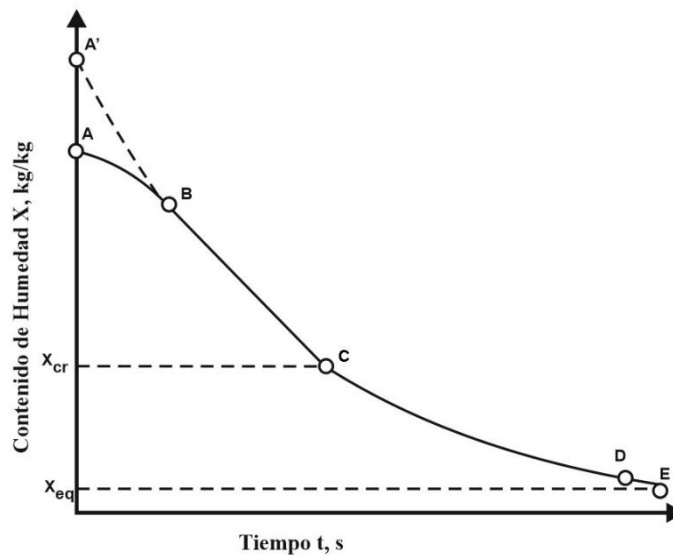


Figura 3.15 Curva de secado a condiciones constantes. Tomada de Strumillo & Kudra (1986), Cap 3, p 71, Fig 3.1.

En los métodos teóricos se combinan ecuaciones de transferencia de masa y de calor, tanto a lo interno como a lo externo del sólido. Como la mayoría de los alimentos son materiales porosos conformados por una matriz sólida con espacios vacíos rellenos de líquido o gas, al modelar la transferencia interna de masa, se toman en cuenta factores como la capilaridad, el encogimiento, los mecanismos de transporte del agua, ya sea como líquido o vapor, desde el interior del sólido hasta su superficie (Bakalis, Knoerzer & Fryer, 2015).

Aún en la actualidad, los modelos teóricos no logran reproducir con exactitud los resultados reales del secado de materiales alimenticios. Debido a esto, en muchos casos se utilizan modelos combinados para aumentar la exactitud del método (Coumans, 1999).

Con respecto al método empírico, el más utilizado es el de la curva característica de secado. Dicha curva es construida a partir de datos experimentales; obtenidos a condiciones de laboratorio en las cuales se mide el cambio de masa y temperatura de una muestra de material con el tiempo. El proceso de secado se realiza utilizando aire caliente a temperatura, humedad y velocidad constantes. En la Figura 3.16 se muestra una curva de velocidad de secado; el eje de las abscisas corresponde a la humedad del sólido en base seca; y el eje de las ordenadas a la velocidad de secado, es decir la variación de la humedad con el tiempo por unidad de área de transferencia de masa (Strumillo & Kudra 1986)

Tanto en la Figura 3.15 como en la Figura 3.16, se pueden observar cuatro períodos de secado: uno inicial, seguido de uno de velocidad constante y luego dos períodos de velocidad decreciente. En el período inicial de secado (curva AB), la superficie e interior del sólido están cubiertos totalmente de líquido y tienen una temperatura inferior a la temperatura de equilibrio  $T_s$ . Como resultado de esto, la velocidad de secado aumenta gradualmente y la temperatura de la superficie incrementa hasta alcanzar el valor de equilibrio (punto B). En muy raros casos, cuando la temperatura del sólido húmedo está por encima de  $T_s$ , la velocidad de secado en el período inicial disminuye mientras el sólido se enfría hasta alcanzar la temperatura de equilibrio (curva A'B) (Strumillo & Kudra, 1986).

En el período de velocidad de secado constante (curva BC), tanto la velocidad de secado como la temperatura permanecen constantes. En éste período, la velocidad de secado es controlada principalmente por el transporte externo de humedad (Strumillo & Kudra, 1986).

Por debajo de punto C, la velocidad de secado disminuye al ser controlada por el transporte de humedad dentro del material. Las dos curvas comprendidas entre los puntos C y E se denominan: primer período de velocidad de secado decreciente (curva CD) y segundo período de velocidad de secado decreciente (curva DE). El punto C es conocido como primer valor de humedad crítica,  $X_{cr1}$ . Mientras que el punto D es conocido como segundo valor de humedad crítica  $X_{cr2}$  (Strumillo & Kudra, 1986; Ng, Tasirin & Law, 2006).

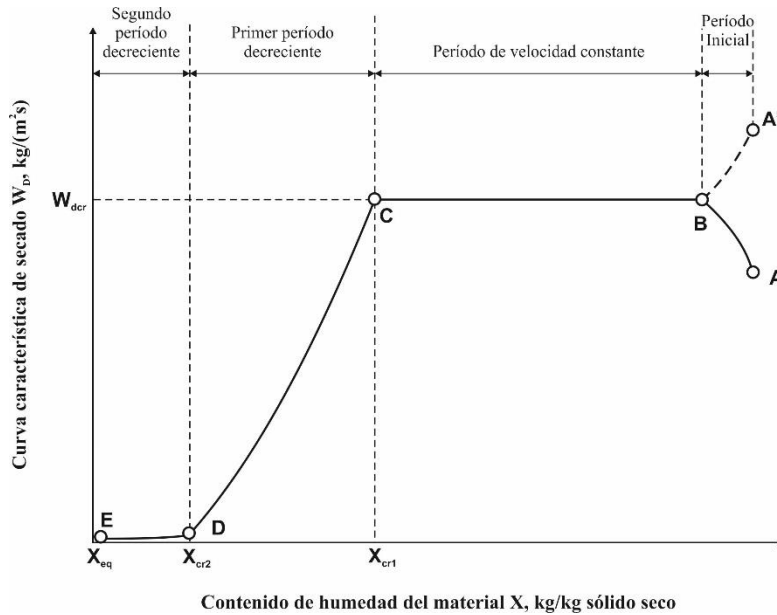


Figura 3.16 Curva de velocidad de secado a condiciones constantes. Tomada de Strumillo & Kudra (1986), Cap 3, p 71, Figura 3.2.

Estos dos períodos de velocidad decreciente se diferencian entre sí, debido a que la variación de la velocidad de secado es mayor en el primer período. En el segundo período la velocidad de secado disminuye ligeramente, tendiendo asintóticamente a cero, al alcanzarse un valor de humedad de equilibrio,  $X_{eq}$  (Strumillo & Kudra, 1986; Ng, Tasirin & Law, 2006, Treybal, 1988).

No es posible obtener una sola ecuación que represente todos los períodos de secado adecuadamente. Por lo cual es usual encontrar en la literatura ecuaciones exclusivas para cada período, algunas de ellas obtenidas empíricamente a través de ajustes y otras obtenidas al combinar métodos teóricos y empíricos (Coumans, 1999).

Cuando la humedad inicial del grano está por debajo del valor de saturación, en las curvas características de secado el período de velocidad constante es muy corto o no existe, tal como se muestra para el arroz con cascarilla en Ng, *et al.* (2006) y en Kemp *et al.* (2001). Adicionalmente, en estos trabajos también se puede observar que al aumentar la temperatura de secado hay un aumento en la velocidad de secado, con lo cual se reduce el tiempo de secado. Sin embargo, también hay que tomar en cuenta que al aumentar la temperatura también aumenta la velocidad de degradación de los nutrientes y se incrementan las posibilidades de que se produzcan daños estructurales en el grano.

A pesar de que las curvas características de secado resultan más cómodas para identificar los diversos períodos de secado, en la mayoría de la literatura sobre secado de granos solamente se reportan curvas de secado. Tal como se puede ver en Ng, Law, Tasirin & Daud (2005), Ng, *et al.* (2006), Kemp, et al que trabajaron con arroz con cascarilla, Doymaz & Pala (2003) trabajaron con maíz y Rennie, Mercer & Tubeileh, (2011) con sorgo.

### 3.8.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SECADO DE ARROZ Y MAÍZ

Entre los trabajos realizados en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Ingeniería se encuentran los trabajos de Carlén (1994), quien determinó la curva característica de secado del arroz a partir de experimentos de secado realizados a temperaturas de 50 °C, 60 °C y 70 °C, utilizando un flujo de aire de 170 m<sup>3</sup>/h y propuso el siguiente polinomio para su ajuste:

$$f = 0.012846 + 0.58658\phi - 1.9689\phi^2 + 2.4027\phi^3 \quad (3.18)$$

Además Ohlsson (1994), determinó la curva característica de secado del arroz a partir de experimentos de secado realizados a temperaturas de 40 °C, 60 °C y 80 °C, utilizando una velocidad de aire de 2.7 m/s y propuso la siguiente ecuación de ajuste:

$$f = 0.0232 + 0.2026\phi - 0.0890\phi^2 + 2.5052\phi^3 - 1.8914\phi^4 \quad (3.19)$$

## 3.9 EQUILIBRIO DEL SECADO

El valor de humedad de equilibrio del sólido,  $X_{eq}$ , que puede alcanzarse en el proceso de secado depende de características propias de cada material así como de la humedad y temperatura del aire desecante. Estos parámetros se relacionan gráficamente mediante curvas obtenidas experimentalmente, las cuales son conocidas como isotermas de sorción.

Como se puede observar en la Figura 3.17, las isotermas de sorción relacionan el contenido de humedad (ordenadas) y la actividad del agua,  $a_w$ , (abcisas) del material, a temperatura y presión constantes (Iglesias & Chirife, 1982). La mayoría de los granos y cereales presentan isotermas de sorción en forma de letra S (conocidas como sigmoideas), las cuales son características de materiales medianamente higroscópicos (Heldman, 2003).



Como muestran las curvas de la Figura 3.17, a menor humedad del sólido, menor actividad del agua. Al comparar las isotermas de un alimento para diferentes temperaturas, se observa una disminución en la cantidad de agua absorbida al aumentar la temperatura para una actividad de agua constante. Esto significa que los alimentos se vuelven menos higroscópicos al aumentar la temperatura (Iglesias & Chirife, 1982).

Los materiales más higroscópicos son más difíciles de secar y requieren mayor cantidad de energía en comparación a su contraparte menos higroscópicos. Por tanto, para diseñar cualquier equipo de secado, es necesario contar con un modelo matemático que describa adecuadamente la isoterma de sorción del alimento. (Heldman, 2003)

Las isotermas de desorción han sido descritas por medio de un gran número de modelos matemáticos empíricos y semiempíricos. Según, Heldman (2003), uno de los modelos más usados es el de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB). En Iglesias & Chirife (1982) se encuentra una lista de parámetros de algunos modelos matemáticos para algunos granos y cereales.

Adicionalmente, otros autores también representaron las isotermas de sorción basadas en experimentos y modelos matemáticos, tales como Bonner & Kenney, (2013), Dunstan, Chung & Hodges (1973) que trabajaron con sorgo, Sun, (2004), Samapundo, Devlieghere, Meukenaer, Atukwase, Lamboni & Debevere, (2006) utilizaron maíz y Mousa, Ghazali, Jinap, Ghazali & Radu (2014) con arroz.

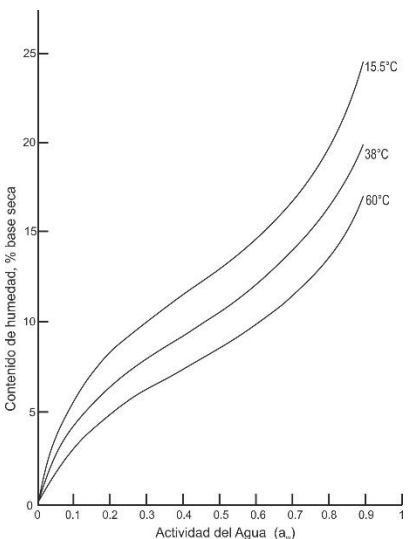


Figura 3.17 Isotermas de desorción de granos de maíz, para tres diferentes temperaturas. Tomado de Iglesias 2012 p 85, Figura 150.

### 3.9.1 CURVA DE EQUILIBRIO PARA EL MAÍZ

Entre los trabajos realizados en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Ingeniería se encuentra el trabajo de Floripe, (1998), en el que se determinaron las curvas de equilibrio para la desorción de agua en sorgo y en maíz, en ambos granos a las temperaturas de 30 °C, 40 °C y 50 °C.

Entre los modelos para describir curvas de equilibrio utilizados por Floripe (1998), se encuentra el modelo de Peleg, el cual se describe con la Ecuación 3.20 y cuyos parámetros de ajuste se encuentran en la Tabla 3.3 para el sistema agua-sorgo y en la Tabla 3.4 para el sistema agua-maíz.

$$X_{eq} = K_1 a_w^{N_1} + K_2 a_w^{N_2} \tag{3.20}$$

Tabla 3.3 Modelo de Peleg para el sistema agua sorgo, basado en los resultados de los experimentos de Floripe (1998), Capítulo 5, Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, pp 26-30

Parámetros	Temperatura		
	30 °C	40 °C	50 °C
K1	0.0884	0.0651	0.0903
K2	0.0635	0.0547	0.1133
N1	0.2384	0.16	14.7468
N2	1.3909	1.5722	0.4381

Tabla 3.4 Modelo de Peleg para el sistema agua-maíz, basado en los resultados de los experimentos de Floripe (1998), Apéndice A, Tablas A.1, A.2 y A.3, pp 1A-4A

Parámetros	Temperatura		
	30 °C	40 °C	50 °C
K1	0.0617	0.1288	0.0617
K2	0.0503	0.0335	0.0503
N1	0.1856	0.1478	0.1856
N2	1.8289	4.0489	1.8289

### **3.10 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL DISEÑO DE SECADORES DE LECHO FLUIDIZADO CONVENCIONALES**

En la literatura se pueden encontrar diversos modelos matemáticos para el diseño de secadores de lecho fluidizado continuos y discontinuos tales como se mencionan en Khanali, Rafiee, Jafari, Hashemabadi & Banisharif, (2012), Zahed, Zhu & Grace, (1995), Daud, (2008). A continuación se detallan solamente los modelos para secadores discontinuos cuyo estudio es el objetivo de este trabajo.

Los modelos utilizados para el diseño de secadores de lecho fluidizado convencional pueden ser agrupados de acuerdo al número de fases que considera (Law & Mujumdar, 2006).

En un régimen de lecho fluidizado homogéneo la concentración de partículas dispersas en el gas es la misma en todo el lecho (Tabla 3.2 y Figura 3.1). Generalmente, este régimen se logra cuando se trabaja con partículas finas (grupo A y C de la clasificación de Geldart). Por tanto, en el diseño de secadores que funcionan en este régimen, es usual emplear modelos de una fase. En este modelo, se asume un comportamiento de mezcla perfecta de tal manera que las concentraciones en el gas tanto de sólido disperso como de vapor de agua presente, son homogéneas en todo el lecho. También se asume que la resistencia a la transferencia de masa externa es despreciable (Law & Mujumdar, 2006).

Por su parte, en los regímenes de lecho burbujeante y de flujo taponado se observan dos fases, denominadas fase diluida y fase densa (Tabla 3.2 y Figura 3.1). En el lecho burbujeante las burbujas corresponden a la fase diluida. A su vez, esta es una fase dispersa, cuya concentración de partículas es baja o nula. Por su parte, la fase densa contiene la mayoría o la totalidad de las partículas. Esta fase continua también es conocida simplemente como emulsión (Gupta & Sathiyamoorthy, 1998).

Si el comportamiento de la fase densa se asume como el de una mezcla perfecta, entonces la concentración del gas intersticial será la misma en todo el lecho. En cambio, si la fase densa se considera como un flujo pistón, la concentración del gas variará con respecto a la altura del lecho. Por su parte, el gas en la fase de burbujas siempre se asume como un flujo pistón. Por tanto, su concentración también dependerá de la altura del lecho (Gupta & Sathiyamoorthy, 1998).

Por otra parte, en el flujo taponado la fase diluida (y dispersa) está conformada por los discos de gas ascendentes con comportamiento de flujo pistón. La segunda fase es la fase densa, que para este caso también tiende a ser una fase dispersa con comportamiento intermedio entre mezcla perfecta y flujo pistón (Gupta & Sathiyamoorthy, 1998).

En la literatura a la que se ha tenido acceso no se encontraron diseños de secadores operando en régimen de flujo taponado. La totalidad de trabajos se concentran en el régimen de lecho burbujeante, en los cuales se procesan partículas de los grupos A, C y D. Sin embargo, se debe tener cuidado al seleccionar el modelo a emplear, ya que dentro del régimen burbujeante existen diversos comportamientos en dependencia del tamaño de la partícula que se tenga. Por tanto, modelos desarrollados para partículas finas (grupo A y C) no son directamente aplicables a partículas grandes (grupo D) (Catipovic, Jovanovic & Fitzgerald, 1978).

En los modelos de tres fases, además de las dos fases mencionadas anteriormente, se considera una tercera fase conformada por las partículas de sólido húmedo. Al realizar los análisis de transferencia de masa y de calor, se estudia una sola partícula y se asume que todas las demás partículas tendrán el mismo comportamiento. Este modelo se acerca más a la realidad ya que incluye como factores limitantes las transferencias de masa y de calor en el interior del sólido. Al tomarse en consideración las resistencias internas el proceso total de secado es más lento. El modelo de tres fases se puede reducir a uno de dos fases, cuando las resistencias internas son despreciables, lo cual sucede en el período de velocidad constante de secado.

### **3.11 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL DISEÑO DE SECADORES DE LECHO DE CHORRO**

Según Epstein & Grace (2011), los modelos utilizados para el diseño de secadores de chorro pueden ser organizados en tres niveles, denotados cero, uno y dos.

Los modelos de nivel cero se desarrollan a partir de los balances de masa y energía más simples aplicados al gas y a las partículas sólidas, a la entrada y a la salida del secador. Si se conocen las condiciones de entrada del gas y las partículas, y además las condiciones de salida (o finales) de las partículas sólidas, entonces se puede determinar las condiciones de salida del gas.

En los modelos de nivel uno, además de los balances mencionados en el modelo de nivel cero, se hace uso de la curva de desorción del sólido. Estos modelos permiten conocer con rapidez el contenido de humedad a la salida o final del sólido en un secador continuo o discontinuo, respectivamente. Sin embargo, no son capaces de proveer datos para el escalamiento, diseño o control de un secador.

El modelo de nivel uno encontrado fue el modelo de Spreutels, Haut, Chaouki, Bertrand & Legros, (2014), en el que modelaron el secado de levadura en un secador de lecho de chorro cónico.

Los modelos de nivel dos se subdividen en tipos A y B. Consideran que el gas (mezcla de aire y vapor de agua) se comporta como una fase continua, mientras que las partículas de sólido se comportan como una fase discreta. Estos modelos son más complejos y requieren soluciones numéricas de las ecuaciones que rigen el proceso.

Los modelos del tipo 2A simplifican los movimientos del gas y las partículas dentro del secador asumiendo que el recorrido medio estadístico de las partículas es el estándar para cada partícula. Además, incorporan la variación de humedad y temperatura tanto en el sólido como en el gas. Gracias a estas simplificaciones, el sistema de ecuaciones que describe el secado puede ser resuelto en relativamente poco tiempo.

Entre los trabajos encontrados sobre el uso de los modelos de tipo 2A para secadores de lecho de chorro se encuentran los trabajos de Ghalavand, Rahimi & Hatamipour, (2012), en el que se hizo un estudio experimental y modelación matemática del secado de guisantes verdes. Niksiar, Sohrabi & Rahimi, (2013), evaluaron distintas correlaciones existentes para predecir el comportamiento hidrodinámico del polietileno y el arroz. Białoobrzewski, Zielinska, Mujumdar & Markowski, (2008), quienes simularon el proceso de secado de cubos de zanahoria en un secador de lecho de chorro.

Los modelos del tipo 2B son aún más complejos, ya que incorporan fluido dinámica computacional (CFD por sus siglas en inglés) para describir el flujo del gas en tres direcciones y para el monitoreo individual de un gran número de partículas. Estos modelos requieren largas horas de procesamiento computacional para resolver las ecuaciones gobernantes.

Entre los modelos encontrados del tipo 2B se encuentran los trabajos de Szafran & Kmiec, (2004), quienes modelaron la transferencia de masa y calor para granos micro-esféricos utilizando modelación CFD. Liu, Shao, Zhong, Grace, Epstein & Jin, (2013), predijeron la velocidad mínima de chorro mediante la aproximación CFD-TFM (modelo de dos fluidos). Moline, Marchelli, Spanachi, Martínez, Bosio & Arato, (2019), quienes compararon dos modelos matemáticos utilizando bolitas de vidrio: el método de elemento discreto (DEM por sus siglas en inglés) y el modelo de dos fluidos.

## **IV METODOLOGÍA**

En este capítulo se describen los procedimientos, recursos, materiales y métodos que fueron utilizados en este estudio.

### **4.1 MEDICIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS GRANOS**

Como se ha indicado previamente, se trabajó con los cuatro granos básicos producidos nacionalmente: sorgo, frijol, arroz y maíz. Se utilizó una variedad de cada grano básico tomando como criterio la variedad de mayor producción en el país.

Existe gran cantidad de literatura internacional acerca de las propiedades físicas de estos cuatro granos básicos. Sin embargo dicha literatura no refleja datos acerca de las variedades de granos cultivadas localmente. Por tanto, fue necesario determinar las propiedades físicas de cada grano para obtener resultados más cercanos a la realidad nacional. Los granos utilizados fueron adquiridos directamente de productores nacionales o bien en el comercio local.

Todas las propiedades físicas de los granos fueron determinadas para valores de humedad del grano comprendidos dentro de los rangos de trabajo sugeridos en la Tabla 3.1 de la Sección 3.2. La humedad máxima de trabajo se correspondía con la humedad máxima del grano sugerida para realizar el secado con aire caliente. Sin embargo en caso de no poder alcanzarse dicho valor, se utilizaría la humedad máxima conseguida a través de un proceso de humificación del grano. Por su parte, el valor para la humedad mínima de trabajo, se estableció con la humedad máxima para almacenamiento en silos.

Para la determinación de la humedad de los granos adquiridos se utilizó el método gravimétrico, descrito en el Anexo A el cual consistió en colocar la muestra dentro de un horno Fisher Scientific, Isotemp 825F de 120 v y una temperatura máxima de 325°C, a 110°C durante 24h para eliminar completamente la humedad contenida. En los casos en que los granos adquiridos presentaron una humedad menor a la humedad máxima de trabajo, estos fueron sometidos a un proceso de humidificación para elevar su humedad, el cual es descrito en la Sección 5.1.2.

Para todas las mediciones se obtuvo una muestra representativa de cada grano, siguiendo el método del cuarteo manual. Dicho método consiste en homogenizar la muestra y luego dividirla en cuatro porciones iguales. Luego se eliminan dos de las partes diagonalmente opuesta. Finalmente se mezcla y homogeniza el material restante y se cuarteo sucesivamente hasta reducir la muestra al tamaño requerido para las pruebas (Ramírez, 2003).

#### 4.1.1 MEDICIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL GRANO

El largo (mayor longitud),  $l$ , y ancho,  $w$ , de los granos fueron determinados siguiendo el procedimiento indicado por Whan *et al.* (2014). Este procedimiento consistió en escanear una muestra de granos, utilizando un scanner HP Scanjet G2710, con una resolución de 2400x4800 pixeles por pulgada y color de 48 bits. Luego se utilizó el software Grainscan para obtener el largo y ancho de cada grano. Por su parte para obtener el espesor,  $e$ , de cada grano se utilizó un pie de rey Truper, CALDI-6MP, con rango de medida de 0 a 152.4 mm y precisión de 0.0005 mm.

Los datos de las tres dimensiones de las partículas obtenidos para cada humedad del grano, fueron sometidos a un análisis estadístico para determinar los valores promedio para cada dimensión. Con el valor promedio de cada una de estas dimensiones se calculó el diámetro promedio equivalente de las partículas,  $\bar{d}_p$ , a través de la ecuación: (Rojas, 2010)

$$\bar{d}_p = (l \cdot w \cdot e)^{1/3} \quad (4.1)$$

Seguidamente, se determinó la ecuación de dependencia del diámetro promedio de la humedad del grano; lo cual incluye una gráfica de ambos parámetros con sus correspondientes barras de error para el diámetro promedio.

#### 4.1.2 CÁLCULO DE LA ESFERICIDAD DEL GRANO

La esfericidad de cada grano se determinó a través de la siguiente ecuación que relaciona el diámetro equivalente con la dimensión de mayor magnitud (Rojas, 2010).

$$\Phi = \frac{\bar{d}_p}{l} \quad (4.2)$$

Con los datos obtenidos, se determinó la ecuación de dependencia de la esfericidad de la humedad del grano; lo cual incluye una gráfica de ambos parámetros con sus correspondientes barras de error para la esfericidad.

#### 4.1.3 MEDICIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE DEL GRANO

Se denomina densidad aparente del grano,  $\rho_a$ , a la densidad que incluye la masa del sólido, el agua y todas las cavidades que contiene la partícula en su interior. Esta densidad aparente es necesaria para estimar la dinámica de fluidización de cada grano básico.

La densidad aparente de los granos fue determinada aplicando el método de desplazamiento de líquido (Zogzas, Maroulis & Marinos-Kouris, 1994). Estos autores utilizaron el instrumento mostrado en la Figura 4.1a, compuesto de un compartimento (en el cual se coloca la muestra), conectado a una bureta graduada. El compartimento se cierra herméticamente con un tapón. Estos mismos autores recomiendan utilizar n-heptano como líquido a desplazar debido a su baja toxicidad y para evitar que los granos absorban humedad.

En el presente trabajo se construyó un instrumento similar al descrito por Zogzas, Maroulis & Marinos-Kouris (1994). El instrumento mostrado en la Figura 4.1b, se construyó utilizando botellas de PET, empaques de goma, pegamento para plástico y una bureta de vidrio de 25 mL, con precisión 0.1 mL. Se decidió no utilizar n-heptano en las mediciones, pues podría afectar la integridad del instrumento. Como alternativa se utilizó agua destilada teniendo especial cuidado en realizar la medición de forma rápida para evitar la humidificación del grano durante el proceso.

El procedimiento de medición consistió en agregar un volumen previamente establecido de agua en el compartimento. Luego se introdujo una muestra de granos (alrededor de 10 g), pesada previamente,  $m_{\text{grano}}$ , en una balanza Sartorius, LE6202S, con capacidad de 6200g, y precisión de 0.01g. El instrumento se giró para medir el volumen desplazado por el sólido,  $V_{\text{desp}}$ . Este procedimiento se realizó por triplicado. La densidad aparente promedio de los granos se calculó mediante la ecuación:

$$\rho_a = \frac{m_{\text{grano}}}{V_{\text{desp}}} \quad (4.3)$$

Con los datos obtenidos, se determinó la ecuación de dependencia de la densidad aparente promedio de la humedad del grano; lo cual incluye una gráfica de ambos parámetros.



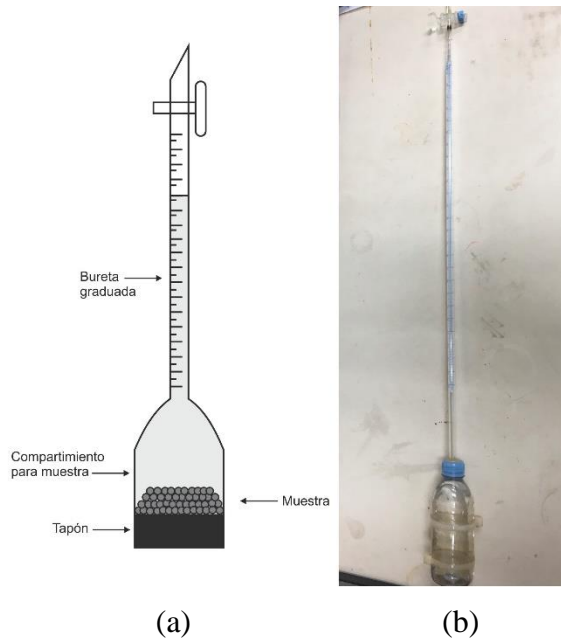


Figura 4.1 Instrumento experimental usado para la medición de densidad. Zogzas, Maroulis & Marinos-Kouris 1994 p 85, Figura 1 (a) y réplica construida del instrumento (b).

## 4.2 MEDICIÓN DE PROPIEDADES DE FLUIDIZACIÓN DEL LECHO

Para estudiar la dinámica de fluidización de cada grano, se construyeron dos equipos, un lecho fluidizado y un lecho de chorro. Estos dos equipos se encuentran esquematizados en la Figura 4.2. La columna de fluidización utilizada en ambos equipos se fabricó utilizando un tubo de plástico acrílico transparente de 0.15 m de diámetro interno y 0.80 m de altura.

La base de la columna de fluidización (Figura 4.3), también utilizada en ambos equipos, se construyó utilizando un embudo plano de plástico traslúcido con un ángulo de  $45^\circ$ , y un vástago de diámetro interno 0.015 m. Este embudo se unió a la columna utilizando un anillo de PVC. En el vástago del embudo se colocó una Sección de manguera de goma traslúcida que a su vez estaba conectada por su otro extremo al ventilador. Adicionalmente, a esta manguera de goma traslúcida se le colocó lateralmente una manguera de goma transparente para realizar mediciones de caída de presión.

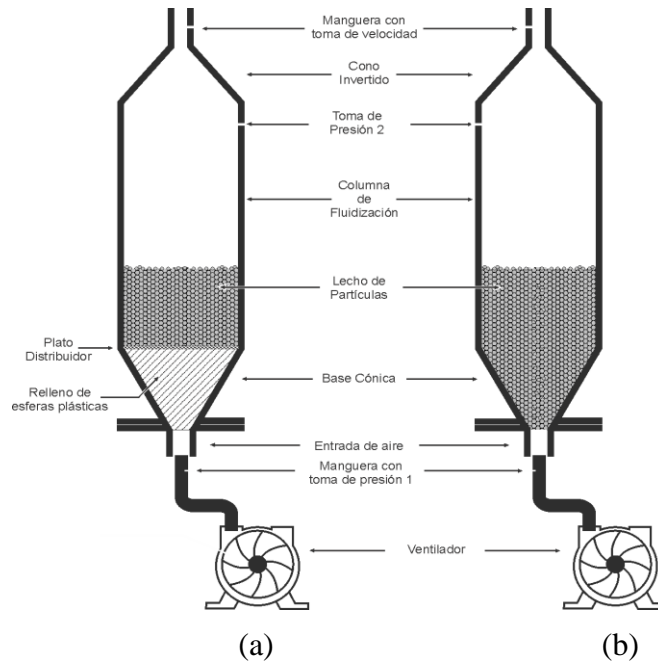


Figura 4.2 Esquema de la columna de lecho fluidizado convencional (a) y columna de lecho de chorro (b).

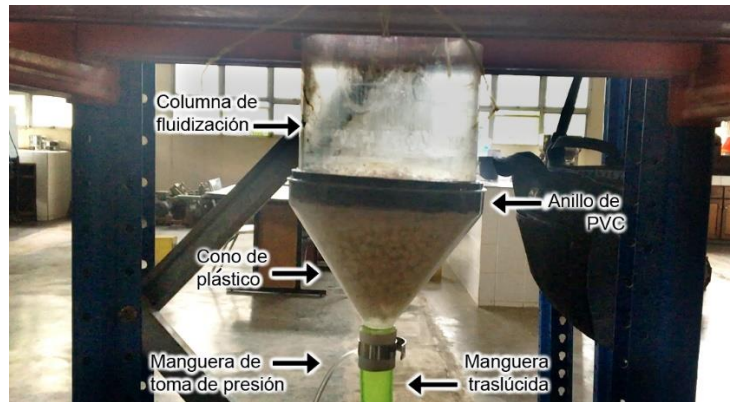


Figura 4.3 Base de la columna de fluidización.

En la parte superior de la columna de fluidización se adaptó un cono invertido (Figura 4.4), construido de cartón dúplex, para evitar el arrastre de las partículas. En la parte superior de este cono se conectó un trozo de tubo de PVC, en cuyo extremo opuesto se colocó una Sección de manguera de goma traslúcida. Esta manguera de goma tenía un orificio lateral en el cual se colocaba un medidor de velocidad del aire Testo 435 de sonda de hilo caliente de 0.75 mm, velocidad máxima de lectura 20 m/s, precisión de 0.03 m/s.



Figura 4.4 Cono invertido ubicado en la parte superior de la columna de fluidización.

El aire de fluidización fue suministrado por un ventilador Osmund, HFKR 41, capacidad de 3500 RPM, para la variación de presión de 4.9/6.4 KPa, flujos de 20/14 m<sup>3</sup>/min, conectado a un motor trifásico Felten & Guilleaume, d3D 100L1-2, de 380 v, 50Hz, 3kW, 6.75 A, 2860 RPM. El motor es alimentado a través de un inversor de frecuencia Hitachi HFC-VWS con un voltaje máximo de salida de 220-240 V, una frecuencia de hasta 144 Hz, con el cual se regulaba el caudal de aire alimentado a la columna de fluidización. Sin embargo, el motor del ventilador no alcanzó su capacidad máxima debido a que el inversor de frecuencia sólo funciona en modo bifásico.

Para medir la caída de presión en el lecho se utilizó un manómetro diferencial Testo 512, con un rango de diferencial de presión desde 0 hasta 199.9 hPa. El punto de alta presión (toma 1) se encontraba ubicado en la manguera de goma traslúcida de la base de la columna de fluidización. Por su parte, el punto de baja presión (toma 2) se ubicaba a 0.76 m de la parte inferior de la columna. En la columna convencional entre ambos puntos de medición se encontraba un distribuidor de aire y el lecho de granos básicos. Por tanto, la caída de presión medida corresponde a:

$$\Delta P_{\text{medido}} = \Delta P_{\text{distribuidor}} + \Delta P_{\text{lecho}} \quad (4.4)$$

Para conocer la caída de presión en el distribuidor, se realizó un experimento con la columna vacía.

La manguera de goma traslúcida, en la cual se colocaba el medidor de velocidad del aire, tenía un diámetro interno de 0.05 m. La velocidad del aire en la columna de fluidización se obtuvo utilizando la ecuación de continuidad:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (4.5)$$

donde  $A_1$  es el área transversal de la manguera de goma traslúcida,  $V_1$  es la velocidad de flujo de aire medida con el medidor de flujo,  $A_2$  es el área transversal de la columna de fluidización y  $V_2$  es la velocidad promedio del aire en la columna de fluidización.

Para distribuir el aire en la columna convencional (Figura 4.2a), se hicieron dos arreglos: En el primero arreglo se colocó internamente sobre la base cónica un distribuidor de plato perforado (Figura 4.5). Este distribuidor se basa en el utilizado por Wormsbecker, Pugsley & Tanfara (2007). Se construyó a partir de una placa de PVC de 6 mm de espesor. Su diseño consistía de 650 hoyos de 2 mm de diámetro, perforados en arreglo cuadrado a 5 mm.



Figura 4.5 Distribuidor de aire de plato perforado.

En el segundo arreglo del distribuidor de aire, se colocó adicionalmente un lecho fijo de partículas inertes (bolitas de plástico lisas de 6 mm de diámetro) por debajo del plato distribuidor, como se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6 Distribuidor de aire con plato perforado y lecho fijo de partículas inertes.

En cambio, en la columna de lecho de chorro (Figura 4.2b), no se requirió de distribuidor de aire ya que con la base cónica bastaba para que el aire fluyera por el centro del lecho de granos.

#### 4.2.1 MEDICIÓN DE LA POROSIDAD DEL LECHO EMPACADO

El procedimiento de medición de la porosidad de un lecho empacado suelto y al azar,  $\epsilon_{\text{lecho}}$ , es similar al método de desplazamiento de líquido. Primeramente, se humidificó un lote de cada grano siguiendo el procedimiento mencionado en la Sección 4.1.1 con el propósito de alcanzar una humedad cercana a la humedad máxima en cosecha para un secado satisfactorio con aire caliente (Tabla 3.1). Esta humedad se denominó como humedad máxima alcanzada.

El primer paso para determinar la porosidad del lecho, consistió en determinar el volumen del lecho, utilizando un beaker de vidrio de 2 litros, de diámetro interno 0.124 m. Este diámetro permitió apilar sueltos y al azar todos los granos básicos.

Este beaker fue pesado vacío y su masa correspondió a  $m_1$ . Luego, se llenó con aproximadamente un litro de agua. Se procedió a pesar y la masa del recipiente con agua correspondió a  $m_2$ . Seguidamente, se procedió a trazar una línea guía a nivel del agua en todo el contorno del recipiente, la cual correspondería al volumen del lecho. Dicho volumen se calculó mediante la ecuación:

$$V_{\text{lecho}} = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4.6)$$

En el segundo paso se calculó la densidad aparente del lecho,  $\rho_{\text{lecho}}$ . Para esto, primeramente se secó el recipiente, para luego llenarlo con la muestra de granos colocados sueltos y al azar, hasta que se alcanzó la línea guía. Se procedió a pesar y la masa del recipiente con granos correspondió a  $m_3$ . La densidad aparente del lecho se calculó mediante la ecuación:

$$\rho_{\text{lecho}} = \frac{m_3 - m_1}{V_{\text{lecho}}} \quad (4.7)$$

En el tercer y último paso, se determinó la porosidad del lecho. Esta fue determinada rellorando el recipiente que contenía los granos, cuidadosamente con agua hasta la línea guía. Se tuvo el cuidado de evitar que quedaran burbujas de aire atrapadas entre los granos. Seguidamente se procedió a pesar y la masa del recipiente con los granos y el agua correspondió a  $m_4$ . El volumen de espacios vacíos,  $V_{\text{ev}}$ , se calculó por la ecuación:

$$V_{\text{ev}} = \frac{m_4 - m_3}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4.8)$$

Una vez conocido el volumen de espacios vacíos, la porosidad del lecho empacado suelto y al azar se calculó mediante la ecuación:

$$\varepsilon_{\text{lecho}} = \frac{V_{\text{ev}}}{V_{\text{lecho}}} \quad (4.9)$$

Todos los pesajes previamente mencionados se realizaron en una balanza de precisión Sartorius, LE6202S, con capacidad máxima 6200g, y precisión de 0.01g.

#### **4.2.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN EN UNA COLUMNA CONVENCIONAL**

De acuerdo a lo mencionado en la Sección 3.5.3, el efecto de la pared sobre la fluidización se vuelve despreciable para relaciones de  $D/d_p$  mayores a 15. Por tanto, previo a determinar la velocidad mínima de fluidización, se calculó dicha relación con los diámetros promedios de los granos obtenidos de acuerdo a lo explicado en la Sección 4.1.1, pero sólo para los granos con humedad máxima de trabajo.

La velocidad mínima de fluidización se determinó experimentalmente en la columna convencional, aplicando el procedimiento de McCabe, Smith y Harriott (2007) descrito en la Sección 3.3.3: Al inicio del experimento, los granos se fluidizaron vigorosamente. Luego se interrumpió el flujo de aire para obtener un lecho empacado aleatoriamente. A continuación se aumentó gradualmente la velocidad del aire. A partir de ese momento se llevó registro de la velocidad del aire, la caída de presión, la altura del lecho, así como observaciones del comportamiento del lecho, tales como formación de burbujas o tapones, esporádicos o continuos. No obstante, solo fue posible observar lo que ocurría en la región cercana a la pared de la columna y en la parte superior del lecho.

En el caso de un secador de lecho de chorro la altura máxima del lecho puede predecirse utilizando la Ecuación 3.14 discutida previamente en la Sección 3.6.4. Sin embargo, no existe una ecuación análoga para el caso de secadores de lecho fluidizado convencional. Por este motivo se partió de una altura baja de lecho y se fue añadiendo gradualmente carga hasta llegar a una altura en la que ya no se observara fluidización del grano. Los datos obtenidos experimentalmente se usaron para construir una gráfica de caída de presión contra velocidad del aire (similar a la Figura 3.7).

Adicionalmente se tomaron notas del comportamiento del lecho tales como expansión, formación de burbujas y tapones.

#### **4.2.3 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE CHORRO**

La velocidad mínima de chorro se determinó experimentalmente tomando en cuenta los conceptos abordados en la Sección 3.6.3. Los experimentos se realizaron en la columna de lecho de chorro, trabajando con diferentes alturas de lecho.

La altura del lecho se estableció de la siguiente manera: primeramente se estimó la relación  $H_{max}/D_c$ , utilizando la Ecuación 3.15. Este valor se utilizó como referencia y se procedió a realizar experimentos usando múltiplos del mismo, partiendo desde 0.6 con incrementos de 0.2, hasta que ya no se observó la formación de la fuente. Las alturas del lecho a utilizar, se calculó por medio de la expresión:

$$H = (\text{múltiplo}) \left( \frac{H_{\max}}{D_c} \right) D_c \quad (4.10)$$

Donde múltiplo = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, ...

Los experimentos se iniciaron a baja velocidad del aire, para luego incrementarla gradualmente. La velocidad del aire se aumentó hasta observar el arrastre de partículas o bien alcanzar la máxima potencia del ventilador.

En todo momento se llevó registro de la velocidad del aire, la caída de presión, la altura total del lecho y la altura de la fuente. Además, se tomaron notas del comportamiento del lecho, tales como formación de la fuente, burbujas y tapones. Sin embargo, los regímenes de flujo fueron establecidos con la limitación de que solamente era posible observar lo que ocurría en la región cercana a la pared de la columna y en la parte superior del lecho.

Para los casos en los que se observó la formación de la fuente, se continuó el experimento realizando el procedimiento inverso, es decir disminuyendo gradualmente la velocidad del aire, hasta alcanzar el colapso de la fuente. También durante este proceso se llevó registro de todos los parámetros mencionados previamente. Todo este procedimiento previamente explicado se realizó por triplicado.

Los valores de caída de presión y velocidad del aire fueron utilizados para construir gráficas similares a la Figura 3.14. Estas gráficas fueron utilizadas para determinar las velocidades mínimas de chorro para cada grano.

### 4.3 SIMULACIÓN DEL SECADO DE LOS GRANOS BÁSICOS

La simulación del secado de los granos básicos se realizó únicamente para los granos que presentaron buena calidad de fluidización y se conocían todas sus propiedades físicas y el comportamiento fluidodinámico del material a secar, así como la cinética y el equilibrio del secado.

Las propiedades físicas de los granos: dimensiones, densidad aparente y esfericidad fueron determinadas a través de los procedimientos mencionados en la Sección 4.1. Por su parte, las propiedades de fluidización del lecho: porosidad del lecho, velocidad mínima de fluidización y velocidad mínima de chorro se obtuvieron utilizando la metodología descrita en la Sección 4.2.



Por su parte, se buscaron en la literatura información sobre la cinética del secado de cada grano ya sea en forma de curvas características de secado. Respecto al equilibrio del secado, se buscaron en la literatura las curvas de desorción del agua, que permitan determinar la humedad de equilibrio del grano como función de la temperatura y la humedad del aire.

Para realizar la simulación, se eligieron las condiciones ambientales más adversas para el secado de los granos básicos de tal manera que si se lograba secar a estas condiciones, también lo haría a condiciones más favorables.

En el caso de la simulación en el lecho de chorro se decidió utilizar el modelo de Spreutels, Haut, Chaouki, Bertrand & Legros, (2014), uno de los modelos de nivel uno más simples, el cual tiene las siguientes consideraciones:

1. Como el anulo del lecho tiene una fracción de sólido más alta que la del chorro y dado que el aire pasa más lentamente por esta región, se asume que la transferencia de masa solo ocurre en la región del chorro. Por lo tanto, se asume que el contenido de agua de las partículas en el anulo es constante.
2. Se considera que el secado ocurre en dos fases diferentes: durante la primera fase se remueve el contenido de humedad que está por encima de la humedad crítica. En la segunda fase la velocidad de secado está limitada por los fenómenos de transferencia de masa que ocurren dentro de la partícula.
3. Se considera que las partículas están en equilibrio térmico con el aire en el anulo.
4. Se considera que la temperatura del aire puede ser estimada por un balance global de calor, donde la energía transferida del gas se consume en su mayoría por la evaporación del agua. Este balance incluye la transferencia de energía entre el secador y el exterior.
5. Como el tiempo promedio de cada ciclo (chorro-fuente-anulo) es más corto que el tiempo de secado, se considera que las propiedades de las partículas son espacialmente homogéneas.
6. La evolución del tiempo, en tamaño y densidad de las partículas es despreciable para la determinación del flujo, permitiendo así que los perfiles de flujo gas-sólido se asuman constantes durante todo el período de secado.
7. El encogimiento de las partículas durante el secado es despreciable ya que en previos estudios se ha demostrado que su influencia no es significativa como demostraron Spreutels, Debaste, Legros, & Haut (2013).

Para el desarrollo del modelo, Spreutels *et al.* (2014), se utilizan las ecuaciones que se describen a continuación. Al aplicar el balance de calor para el aire en el secador se obtiene la ecuación:

$$C_{p_w} m_{dry} (1 + X) \frac{dT}{dt} = G_{in} C_{p_a} (T_{in} - T_{sys}) - \frac{dX}{dt} m_{dry} \Delta H_{vap} + h_{\Omega} (T_{amb} - T_{sys}) \quad (4.11)$$

$M_{dry}$ , es la masa seca de granos la cual corresponde a la Ecuación 4.11,  $T_{sys}$ , es la temperatura dentro del sistema, que se asume homogénea e igual a la temperatura de la superficie de la partícula a la salida del chorro ( $T_{sys}=T_p=T_g$ ).  $h_{\Omega}$ , es el coeficiente de transferencia combinado para las paredes externas del secador, que corresponde a la Ecuación 3.41.

$$m_{dry} = \frac{m}{1 + X_0} \quad (4.12)$$

$$h_{\Omega} = 0.7G_{in}Cp_{air} \quad (4.13)$$

donde 0.7, es un coeficiente de ajuste,  $G_{in}$ , es el flujo másico de aire a la entrada.

Para el balance de masa del gas en el secador se obtuvo la ecuación:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{(Y_{in} - Y_{sys})G_{in}}{m_{dry}} \quad (4.14)$$

Con estas ecuaciones se puede determinar la humedad de los granos, su temperatura y la humedad del aire a la salida. Con estos valores se construyeron los gráficos pertinentes.

## V PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tal como se indicó en la Sección 4.1, los experimentos se realizaron con las variedades de granos básicos de mayor producción en el país, los cuales corresponden a: sorgo millón, frijol rojo, arroz de grano largo con cascarilla y maíz blanco.

El sorgo, el frijol y el maíz fueron adquiridos en el comercio local. Por su parte el arroz con cascarilla se obtuvo de una finca ubicada en el municipio de Santa Teresa, Carazo, y corresponde a la cosecha realizada en marzo del 2017.

Los granos básicos obtenidos presentaban materiales como piedras, ramas, cascarilla, hojas y restos de plagas por lo cual se realizó una limpieza para remover estas impurezas.

### 5.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS GRANOS

En esta Sección se detallan los pasos que se siguieron para determinar las propiedades físicas de los granos, es decir: el contenido de humedad, las dimensiones de las partículas, la densidad aparente y su esfericidad siguiendo los procedimientos previamente indicados en las Secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3.

#### 5.1.1 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD INICIAL DE LOS GRANOS BÁSICOS

Posterior a la limpieza se realizó selección de una muestra representativa de aproximadamente un kilogramo siguiendo el método del cuarteo descrito en la Sección 4.1. Seguidamente se midió la humedad de los cuatro granos básicos, aplicando el método gravimétrico descrito en el Anexo A. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.1. Los cuatro granos básicos presentaron una humedad por debajo de las humedades máximas sugeridas para almacenamiento en silos, las cuales se indican en la fila tres de la Tabla 3.1. Por lo tanto, los cuatro granos básicos se sometieron al proceso de humidificación detallado en la Sección 5.1.2.

Tabla 5.1 Humedad del grano adquirido (% , base húmeda).

Grano	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Humedad Promedio
Sorgo	10.20	10.40	9.33	9.98
Frijol	11.62	11.19	11.78	11.53
Arroz	8.96	8.82	8.78	8.85
Maíz	11.84	11.25	12.36	11.81

### **5.1.2 HUMIDIFICACIÓN DE LOS GRANOS BÁSICOS**

La humidificación de los cuatro granos básicos se realizó sumergiendo en agua aproximadamente un kilogramo de cada uno de los granos. Durante este procedimiento se observó material que flotaba. En el caso del sorgo el material que flotaba correspondía a granos germinados y cascarilla. El frijol fue el grano que presentó menos materiales flotantes. Por su parte el material flotante en el arroz correspondía a cascarilla. Finalmente, para el maíz, el material flotante eran granos huecos debido al daño por plaga. Se procedió a retirar dicho material sobrenadante para que no afectara las mediciones de las propiedades, en especial de la densidad. Todo trabajo posterior se realizó solamente con los granos que permanecían sumergidos.

La inmersión de los granos se prolongó hasta un tiempo de dos horas para el caso del frijol, el arroz y el maíz, tiempo para el cual no se observaba variación apreciable del tamaño de los granos. El caso de humidificación del sorgo se detalla posteriormente. Durante el tiempo del procedimiento, cada 30 minutos se tomaron muestras de aproximadamente 200 gramos de los granos sumergidos. A estas muestras se les determinó inmediatamente la humedad en base húmeda, la densidad y las dimensiones de los granos por triplicado.

Sin embargo, debido a la naturaleza del método gravimétrico, solo se puede disponer los resultados de humedad hasta después de 24 horas. Por tanto al graficar posteriormente los valores de humedad contra el tiempo se observó que el arroz y el maíz aún no habían alcanzado su respectivo contenido máximo de humedad en cosecha para un secado satisfactorio con aire caliente (Tabla 3.1). Por tanto, se debió repetir el procedimiento de humidificación para estos dos granos, esta vez aumentando el tiempo total de humidificación hasta 3.5 horas para el arroz y 2.5 horas para el maíz y luego se repitieron todas las mediciones correspondientes a estos dos granos.

La variación del porcentaje de humedad con respecto al tiempo, durante el procedimiento de humidificación, se presenta en las Figuras 5.1 para el frijol, Figura 5.2 para el arroz y Figura 5.3 para el maíz. Los datos con los que se construyeron estas gráficas se encuentran en el Anexo B tablas B.2, B.3 y B.4, respectivamente. Adicionalmente, los datos de humedad y tiempo, así como las correspondientes gráficas para el procedimiento de dos horas para el arroz y el maíz se presentan en formato digital en el archivo de Excel “Anexo B digital”.

En el caso del frijol (Figura 5.1) se observa que el porcentaje de humedad aumenta de manera lineal con respecto al tiempo llegando a alcanzar en aproximadamente 60 minutos, el contenido máximo de humedad en cosecha para un secado satisfactorio con aire caliente.

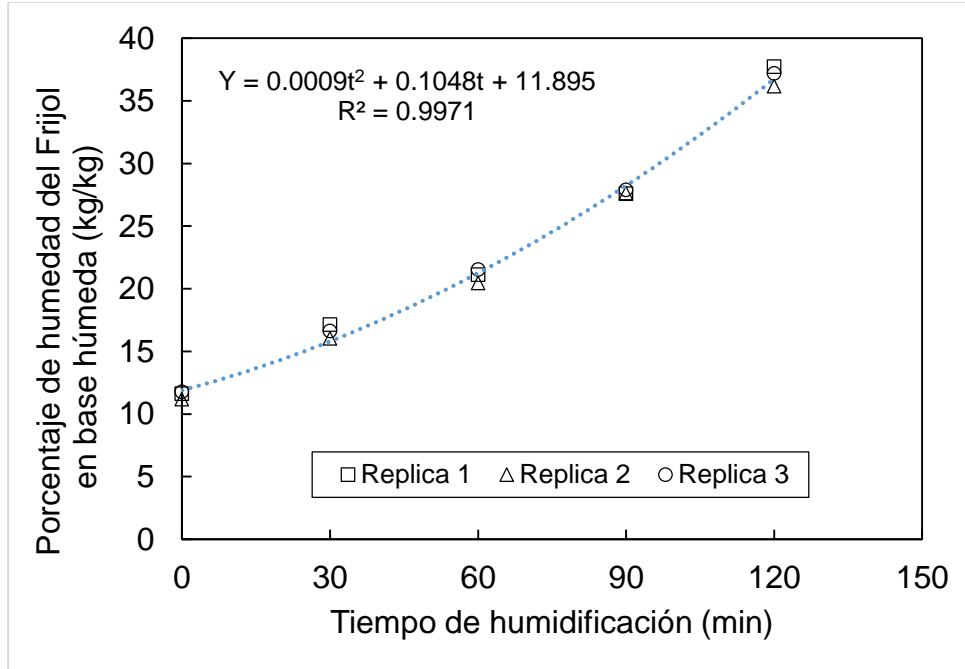


Figura 5.1 Variación del porcentaje de humedad del grano de frijol con respecto al tiempo de humidificación.

Por su parte, el arroz (Figura 5.2) presentó un comportamiento asintótico, aumentando su porcentaje de humedad en los primeros 90 minutos hasta 22%. Luego se mantuvo casi constante hasta el final del procedimiento. Esto se debe posiblemente a la presencia de celulosa en la cascarilla, la cual impide el paso de humedad hacia el grano. Por lo tanto, el valor de humedad máxima de trabajo para el arroz se debió reducir de 24% (Tabla 3.1) a 22%.

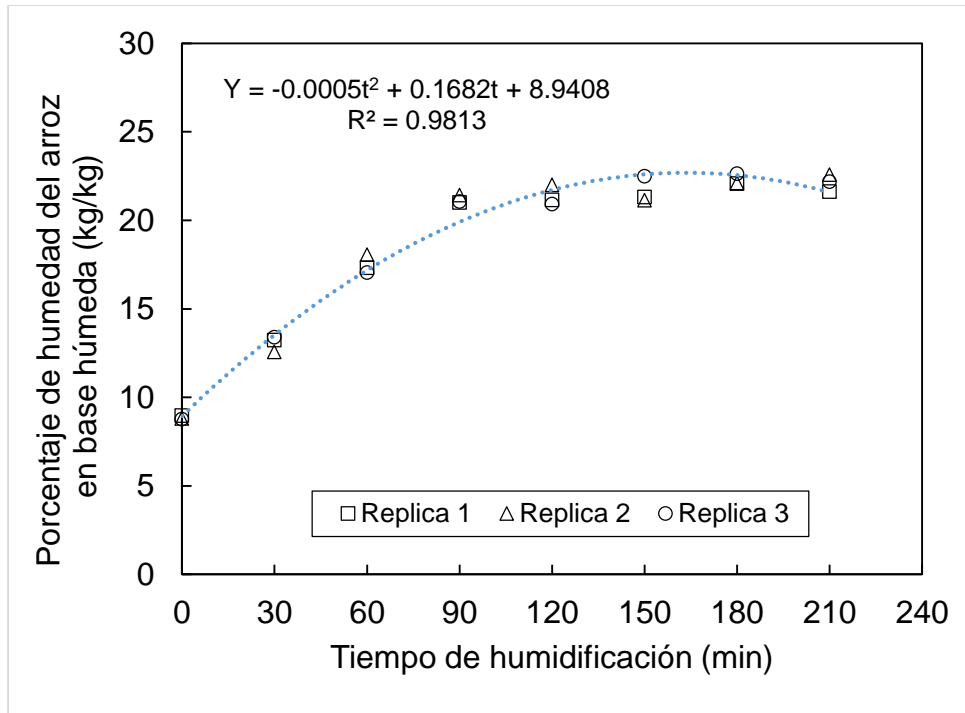


Figura 5.2 Variación del porcentaje de humedad del grano de arroz con respecto al tiempo de humidificación.

El maíz (Figura 5.3) también presentó un incremento lineal del porcentaje de humedad durante todo el período de toma de muestra, alcanzando la humedad requerida en un tiempo aproximado de 150 minutos.

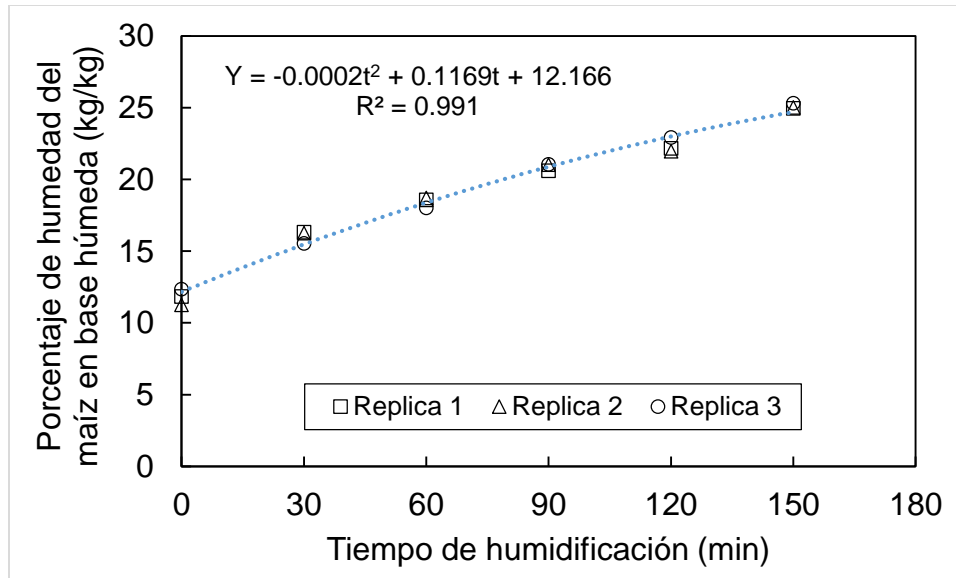


Figura 5.3 Variación del porcentaje de humedad del grano de maíz con respecto al tiempo de humidificación.

Por su parte, en el caso del sorgo se observó que el tamaño del grano aumentaba rápidamente durante los primeros 30 minutos. En el resto del tiempo hasta alcanzar las dos horas, no había cambio apreciable en el tamaño. Al contrastar esta observación con los resultados de humedad del grano se comprobó que igualmente la humedad aumentaba rápidamente en los primeros 30 minutos y luego ya no tenía cambios apreciables.

Por esta razón, se procedió a repetir el procedimiento de humidificación del sorgo, pero esta vez las muestras se tomaron cada 7 minutos durante un tiempo total de 30 minutos. Con los datos de los procedimientos de dos horas y 30 minutos obtenidos construyó la Figura 5.4.

Los valores de humedad para cada tiempo de toma de muestras de ambos procedimientos se presentan en el Anexo B, Tablas B.1. Esta información puede ser útil para que en futuras investigaciones se tenga una guía del tiempo requerido para alcanzar humedades específicas para los cuatro granos básicos.

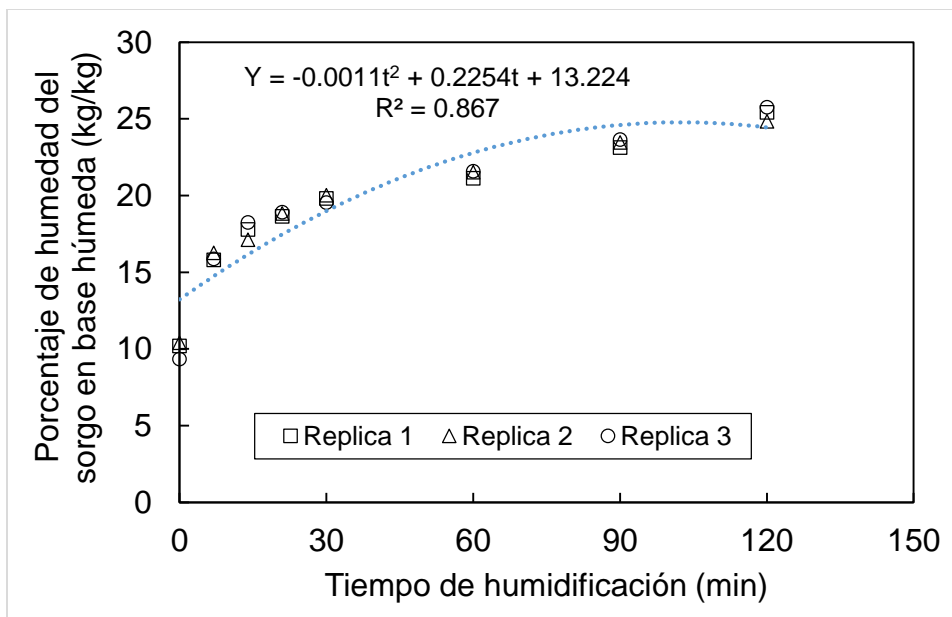


Figura 5.4 Variación del porcentaje de humedad del grano de sorgo con respecto al tiempo de humidificación.

### 5.1.3 MEDICIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LOS GRANOS DE CEREAL

Como se indica en la Sección 4.1.1, la medición de las dimensiones de los granos se realizó a través del software Grainscan. En general, el programa arrojó datos bastante replicables, excepto en el caso del frijol, el cual requirió de un tratamiento especial de imagen para poder ser analizado correctamente.

El tratamiento especial de imagen consistió en el uso de un filtro de alto contraste en la imagen digitalizada. Este filtro permite aumentar las diferencias de color y tono entre el fondo de la imagen y la silueta de cada grano, permitiendo una correcta interpretación del mismo. Cuando no se utilizaba dicho filtro se formaban sombras difusas en los bordes del grano que no eran interpretadas correctamente por el programa.

Conforme se realizaron los experimentos se observó que la medición digital de la tercera dimensión resultaba muy difícil. Esta medición requería colocar los granos de manera vertical, lo cual solo se pudo lograr a través del uso de un adhesivo transparente para fijar los granos uno por uno. Sin embargo, aún con esto no se consiguieron buenos resultados, ya que las imágenes digitalizadas eran borrosas y con sombras. Por tanto, se decidió obtener la tercera dimensión manualmente utilizando un pie de rey.



Los resultados de las mediciones de cada una de las tres dimensiones de los granos, sus valores promedio, así como la varianza, se presentan en el Anexo C, en la Tabla C.1 el sorgo, en la tabla C.2, el frijol, en la Tabla C.3, el arroz y en la Tabla C.4 el maíz. Adicionalmente los datos de las dimensiones y la varianza de cada replica para cada grano se presentan en formato digital en la carpeta “Anexo C digital” en los archivos de Excel “Anexo C1 Sorgo”, “Anexo C2 Frijol”, “Anexo C3 Arroz” y “Anexo C4 Maíz.

Con los datos de las dimensiones de los granos, y utilizando la Ecuación 4.1, se calculó el diámetro promedio, el cual fue utilizado para graficar la variación de este contra la humedad en base húmeda de los granos.

En el caso del sorgo (Figura 5.5) se logra apreciar muy poca variación del diámetro promedio contra el porcentaje de humedad de base húmeda, teniendo una variación de  $0.2 \times 10^{-3} \text{m}$  aproximadamente.

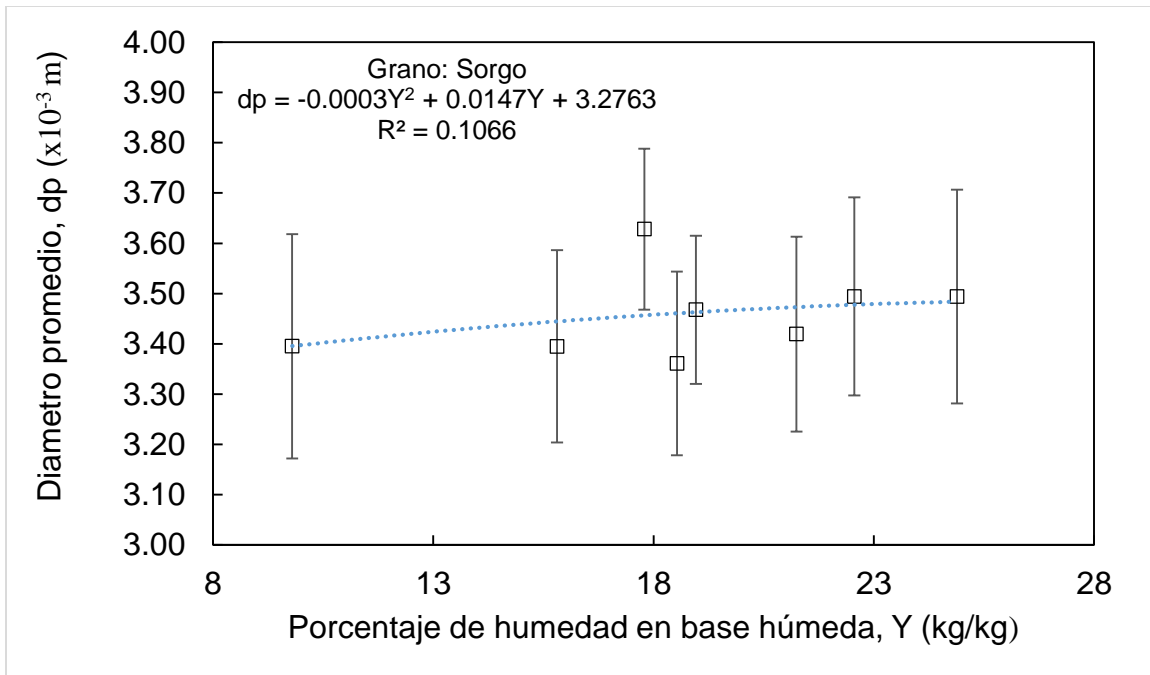


Figura 5.5 Variación del diámetro promedio del grano de sorgo con respecto al porcentaje de humedad.

Por su parte el frijol (Figura 5.6) fue el grano que presentó mayor variación del diámetro promedio contra el porcentaje de humedad de base húmeda, teniendo una variación de  $1 \times 10^{-3} \text{m}$  aproximadamente.

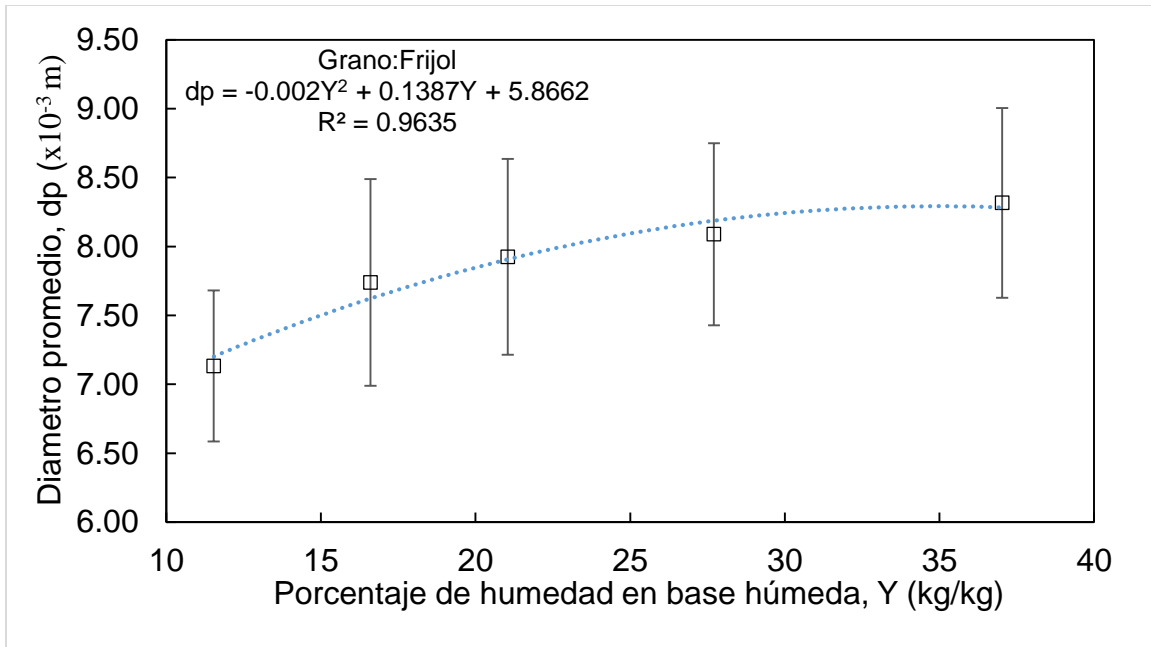


Figura 5.6 Variación del diámetro promedio del grano de frijol con respecto al porcentaje de humedad.

El arroz (Figura 5.7) presentó muy poca variación del diámetro promedio contra el porcentaje de humedad de base húmeda, teniendo una variación de  $1 \times 10^{-3} \text{m}$  aproximadamente.

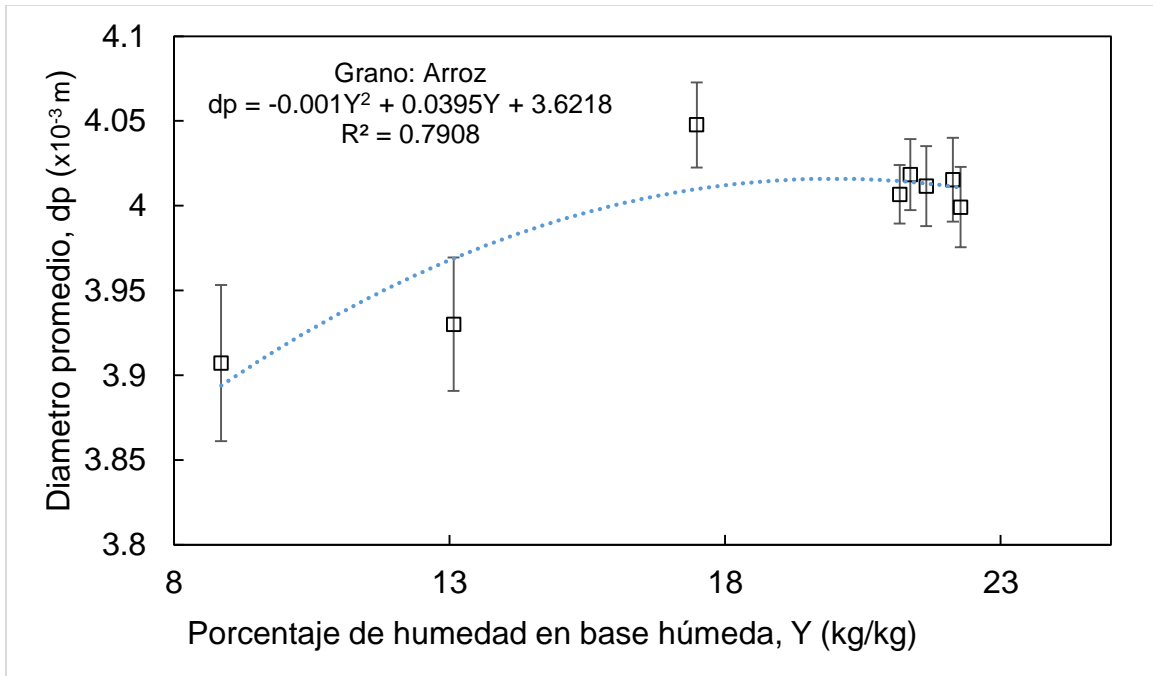


Figura 5.7 Variación del diámetro promedio del grano de arroz con respecto al porcentaje de humedad.

En el caso del Maíz (Figura 5.5) la variación del diámetro promedio contra el porcentaje de humedad de base húmeda también es pequeña, teniendo una variación de  $0.7 \times 10^{-3}$  m aproximadamente.

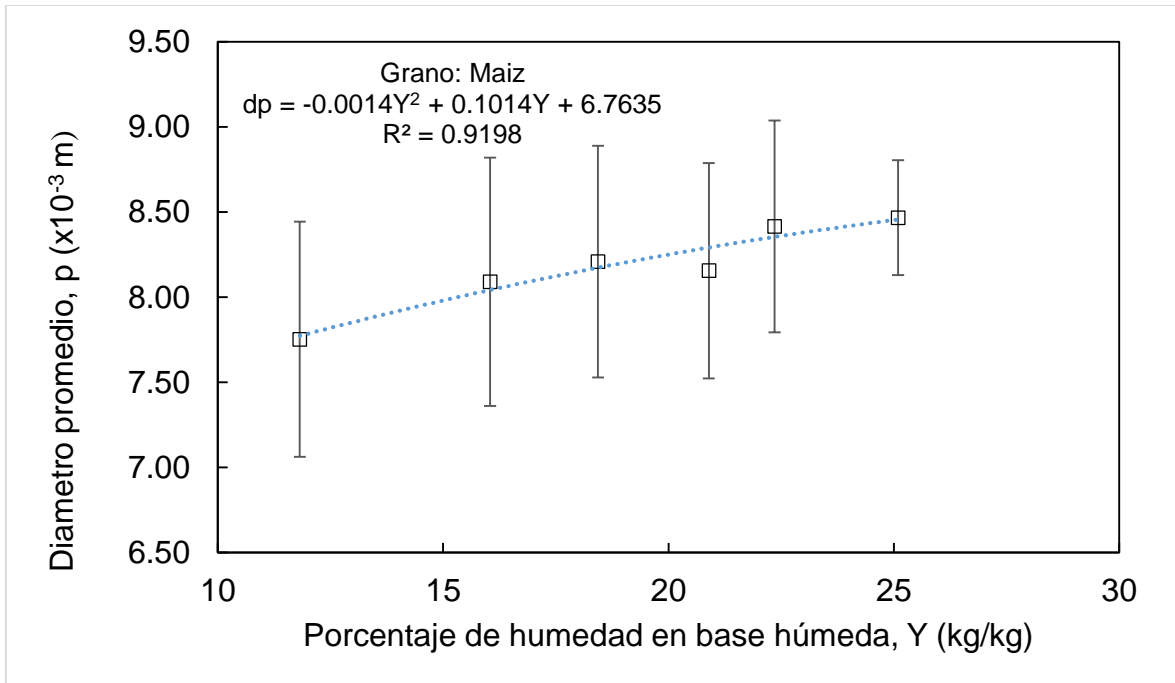


Figura 5.8 Variación del diámetro promedio del grano de maíz con respecto al porcentaje de humedad.

#### 5.1.4 CÁLCULO DE LA ESFERICIDAD

El cálculo de la esfericidad se realizó mediante la Ecuación 4.2. En el caso del sorgo (Figura 5.9) la variación de la esfericidad con respecto a la humedad varía muy poco, siendo esta de 0.02.

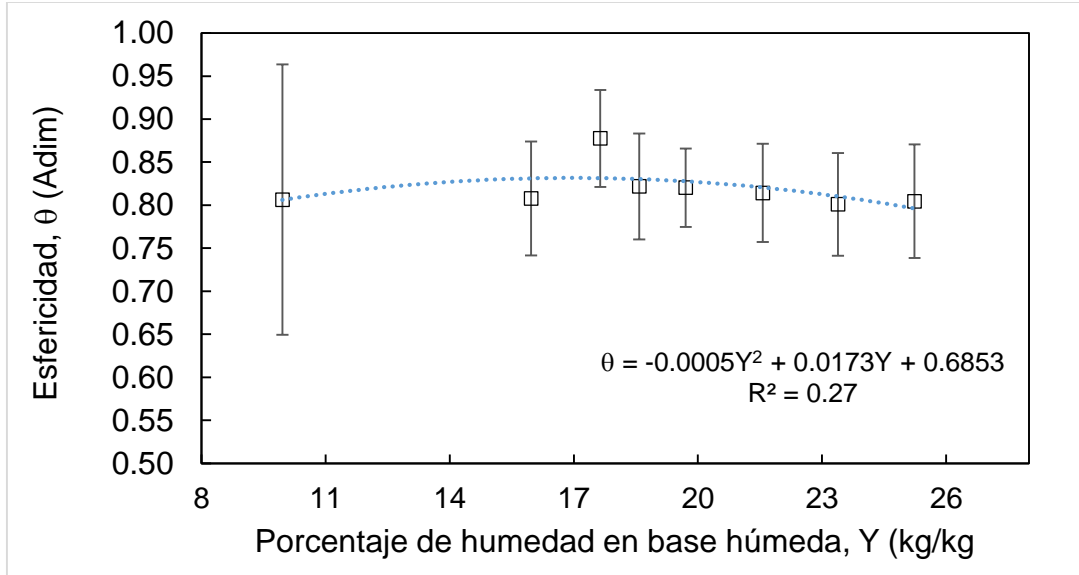


Figura 5.9 Variación de la esfericidad del sorgo con respecto al porcentaje de humedad.

Por su parte el frijol (Figura 5.10), la variación de la esfericidad con respecto a la humedad varía muy poco, siendo esta de 0.05.

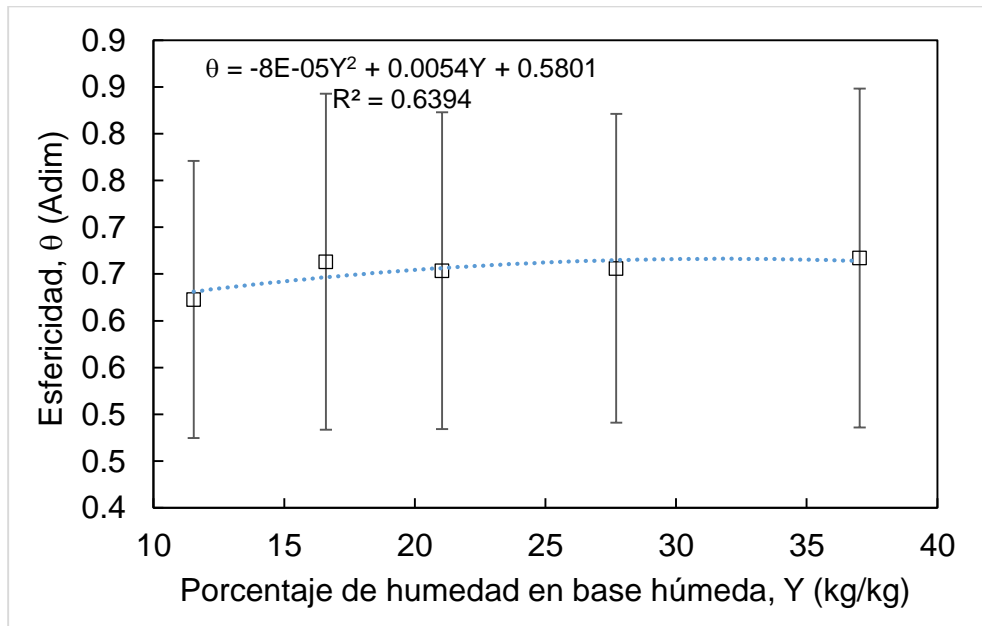


Figura 5.10 Variación de la esfericidad del frijol con respecto al porcentaje de humedad.

En el caso del arroz (Figura 5.11) la variación de la esfericidad con respecto a la humedad al igual que los anteriores varía muy poco, siendo esta de 0.1.

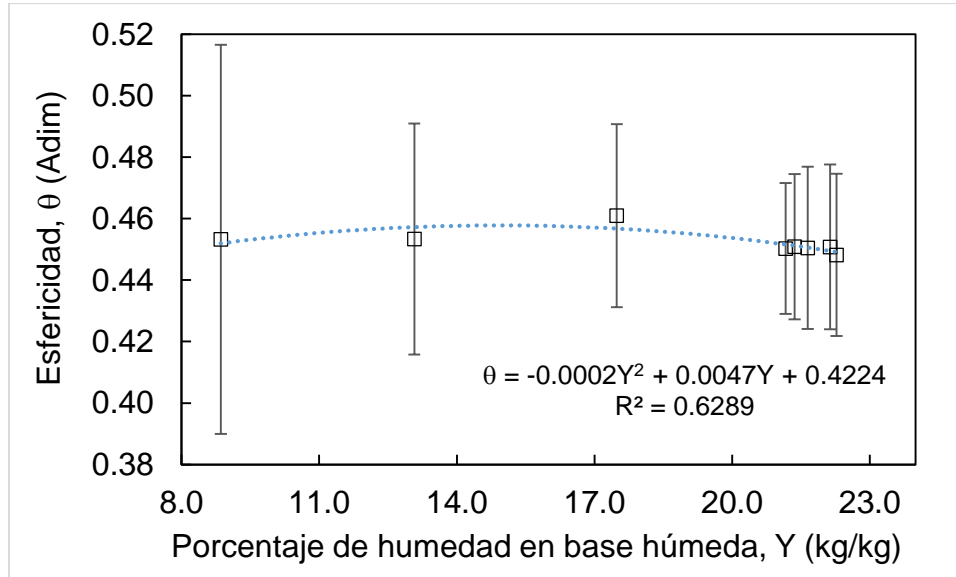


Figura 5.11 Variación de la esfericidad del arroz con respecto al porcentaje de humedad.

Finalmente, el maíz (Figura 5.12), la variación de la esfericidad con respecto a la humedad también varía muy poco. Sin embargo este grano es que presenta mayor variación de su esfericidad con respecto a la humedad siendo esta de 0.2.

Los datos de la esfericidad de los granos se presentan en el Anexo D, en la Tabla D.1 para el sorgo, Tabla D.2, el frijol, Tabla D.3, el arroz, y en la Tabla D.4, el maíz.

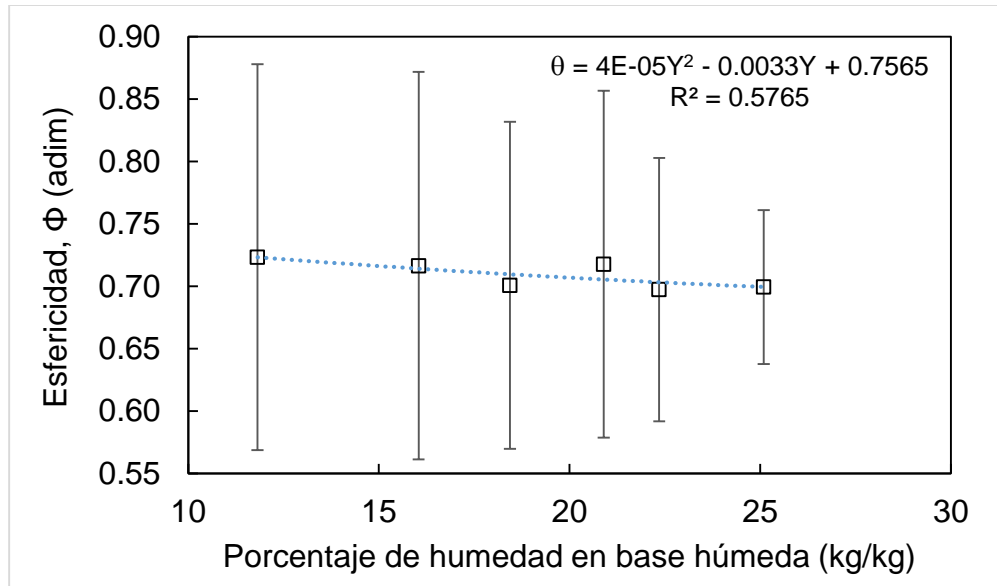


Figura 5.12 Variación de la esfericidad del maíz con respecto al porcentaje de humedad en base húmeda.

### 5.1.5 MEDICIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE DEL GRANO

La medición de la densidad de los granos se realizó a través de una réplica del aparato descrito en la Figura 4.1.

El aparato fue construido utilizando los materiales que se tenían a la mano como botellas de PET, empaques de goma y pegamentos plásticos. Se decidió no utilizar solvente, pues podría deteriorar la integridad del aparato, además que la sencillez del aparato no permitía un manejo limpio y recuperación del solvente, lo cual incurría en una alta peligrosidad de manipulación y posible envenenamiento.

Como alternativa se decidió utilizar agua destilada teniendo especial cuidado en realizar la medición de forma rápida para evitar la humidificación del grano durante el proceso.

El cálculo de la densidad se realizó a través de la Ecuación 4.3. En el caso del sorgo (Figura 5.13), se puede observar que a medida que aumenta la humedad, la densidad de los granos también aumenta levemente. La variación de la densidad fue de aproximadamente  $0.150 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ .

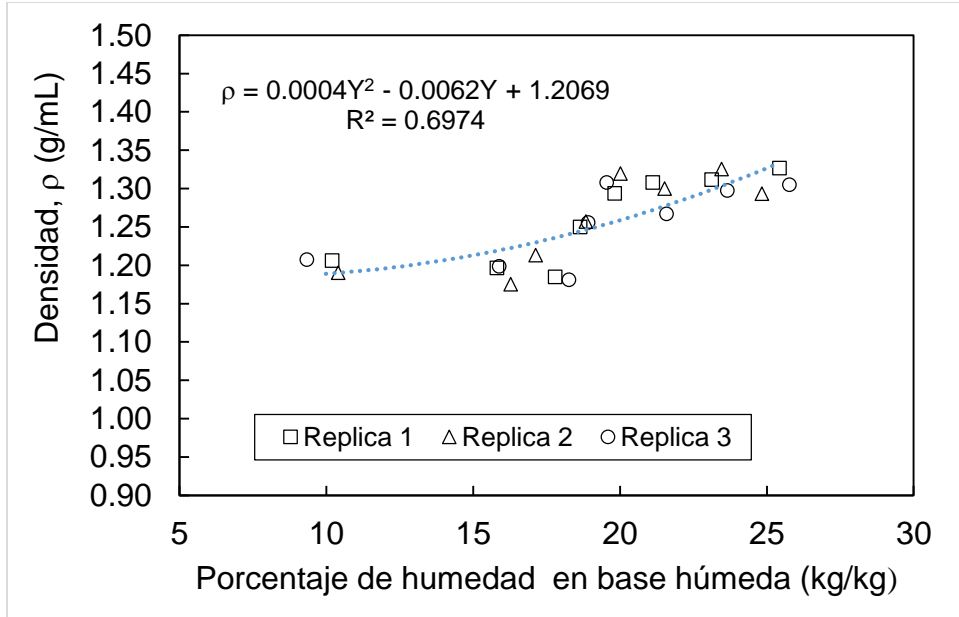


Figura 5.13 Variación de la densidad del sorgo con respecto al porcentaje de humedad.

Por su parte el frijol (Figura 5.14) a medida que aumenta la humedad, primeramente su densidad disminuye para luego presentar una variación muy pequeña de aproximadamente  $0.050 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ .

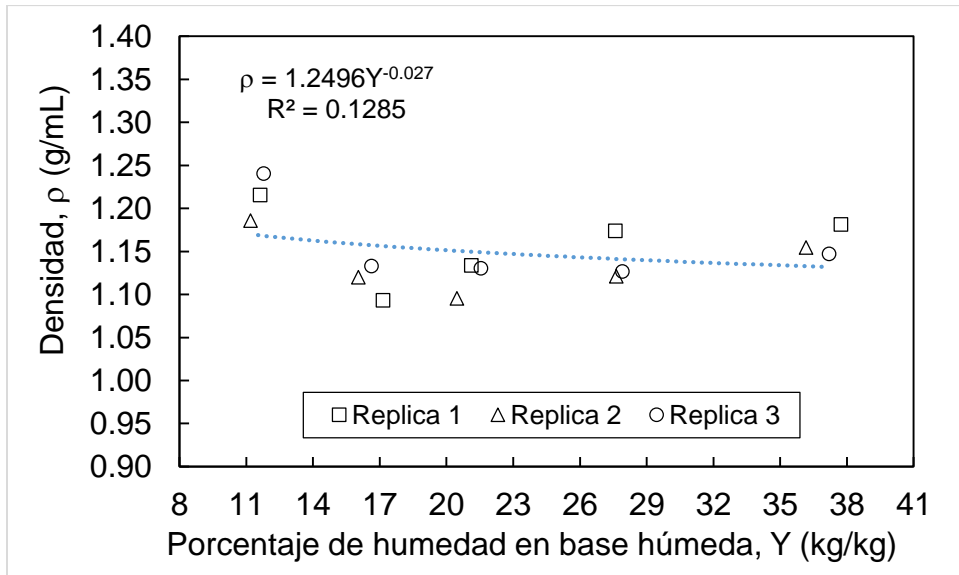


Figura 5.14 Variación de la densidad del frijol con respecto al porcentaje de humedad.



El arroz (Figura 5.15) a medida que la humedad aumenta, la densidad permanece casi constante, teniendo una variación menor al  $0.050 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ .

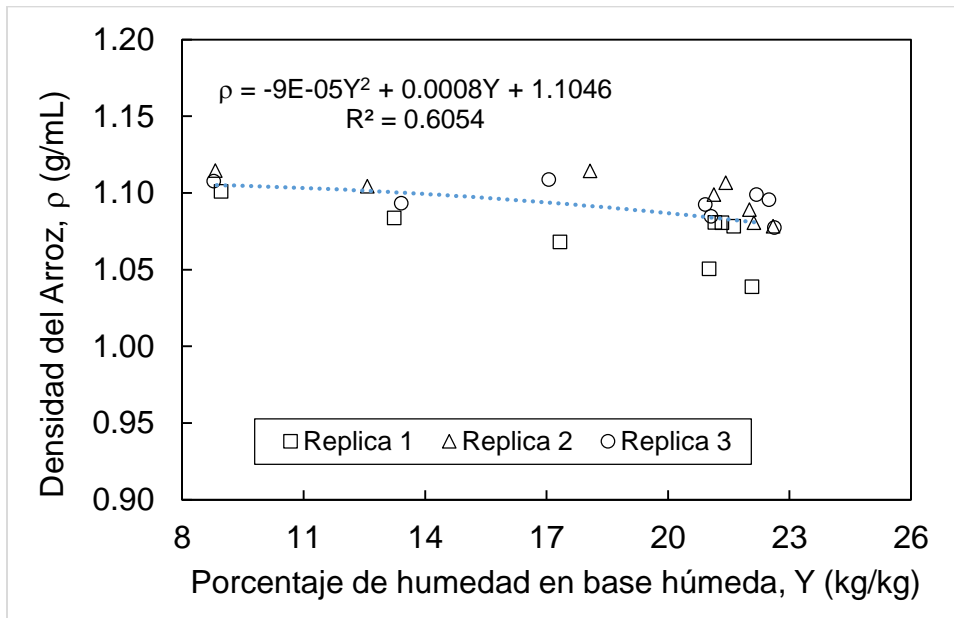


Figura 5.15 Variación de la densidad del arroz con respecto al porcentaje de humedad.

Por su parte el maíz (Figura 5.16), a medida que aumenta la humedad, la densidad de los granos disminuye levemente. Sin embargo este fue el grano que presentó mayor variación de la densidad, siendo esta de aproximadamente  $0.200 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ .

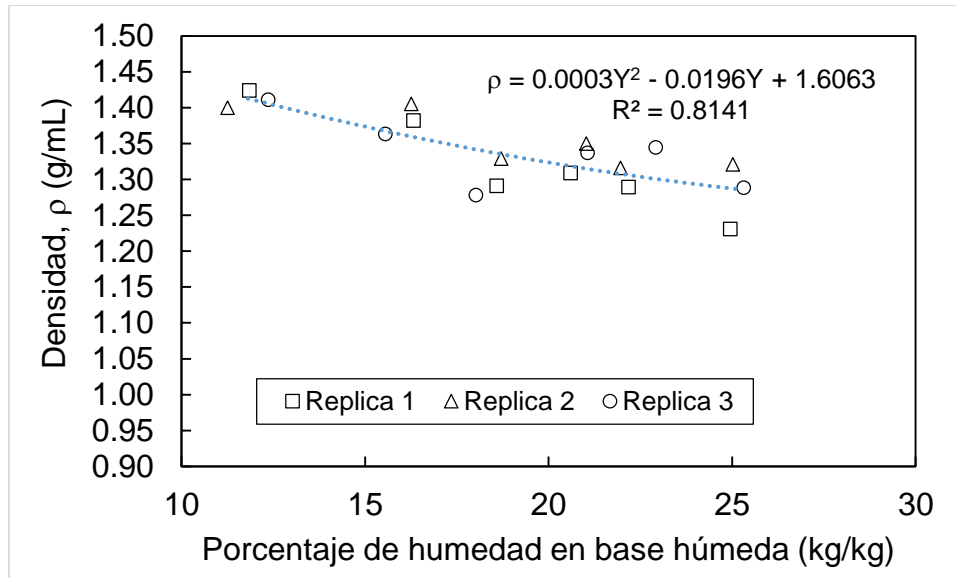


Figura 5.16 Variación de la densidad del maíz con respecto al porcentaje de humedad.

Los datos de la densidad promedio se presentan en el Anexo B en la última columna de las tablas. Para el sorgo, en la Tabla B.1, el frijol en la Tabla B.2, el arroz, en la Tabla B.3 y el maíz, en la Tabla B.4.

## 5.2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE FLUIDIZACIÓN DEL LECHO

En esta Sección se explica los pasos que se utilizaron para determinar las propiedades de fluidización del lecho, comenzando con la determinación de la porosidad siguiendo los pasos explicados en la Sección 4.2.1, así como los pasos explicados en la Sección 4.2.2 y 4.2.3 para determinar la velocidad mínima de fluidización y de chorro.

### 5.2.1 DETERMINACIÓN DE POROSIDAD DEL LECHO

La porosidad del lecho para los cuatro granos básicos previamente humedecidos hasta la humedad denominada máxima alcanzada, se determinó siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 4.2.1. Este procedimiento se realizó por triplicado para cada uno de los granos.

Los datos completos de las mediciones de la masa del beaker vacío,  $m_1$ , la masa del beaker con agua,  $m_2$ , la masa del beaker con los granos,  $m_3$ , la masa del beaker con los granos y agua, así como el volumen del lecho, la densidad del lecho, el volumen de los espacios vacíos y la porosidad del lecho (calculadas aplicando las Ecuaciones 4.5 a 4.8) se presentan en el Anexo E: Para el sorgo, en la Tabla E.1, el frijol en la Tabla E.2, el arroz, en la Tabla E.3 y el maíz, en la Tabla E.4.

Los resultados de la porosidad promedio para el lecho de cada grano se encuentran en la Tabla 5.2. El lecho de arroz presentó la mayor porosidad. En cambio, en el caso de los lechos de sorgo, frijol y maíz las porosidades son muy cercanas.

Tabla 5.2 Valores promedios de porosidad de lecho empacado, suelto y al azar.

Grano	Humedad máxima alcanzada, % base humedad	$\epsilon_{lecho}$ , adim
Sorgo	24.9	0.43
Frijol	25.2	0.40
Arroz	20.0	0.55
Maíz	22.7	0.44

### 5.2.2 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Primeramente con el objetivo de comprobar que se cumplía que la relación  $D/d_p$  fuese mayor a 15 para todos los granos, se procedió a calcularla utilizando los diámetros promedios de los granos con humedad máxima de trabajo, presentados en la Sección 5.1.3. Los datos de  $D/d_p$  para cada grano se muestran en la Tabla 5.3. Dado que para todos los granos la relación  $D/d_p$  resultaron mayores que 15, se procedió a realizar los experimentos de fluidización.

Tabla 5.3 Relación  $D/d_p$  de cada grano básico para su humedad máxima de trabajo.

Grano	Humedad máxima de trabajo, % base humedad	$d_p \times 10^3$ , m	$D/d_p$ , adim
Sorgo	23.4	2.64	56.8
Frijol	27.7	8.08	18.6
Arroz	22.2	4.02	37.3
Maíz	25.1	8.46	17.7

Los experimentos para determinar la velocidad mínima de fluidización fueron desarrollados de acuerdo al procedimiento descrito en la Sección 4.2.2. Primero se realizaron dos experimentos utilizando el distribuidor de aire de plato perforado. En el primer experimento se colocó sobre el plato perforado un lecho de maíz de 3 cm. Sin embargo, al hacer funcionar el ventilador a su máxima potencia, no se observó algún movimiento en el lecho de partículas.

En el segundo experimento, se colocó un lecho de arroz de 3 cm, ya que este es el material más liviano. En este caso, al hacer funcionar el ventilador a su máxima potencia, se observó un comportamiento similar a un lecho de chorro. Las partículas del centro eran desplazadas hacia los lados, creándose un ánulo por el cual finalmente solo fluía el aire sin que se provocase más movimiento de los granos de arroz.

Debido a que no se logró fluidización de los granos con el distribuidor de aire de plato perforado, se concluyó que este no era adecuado para distribuir el flujo de aire homogéneamente en la torre. Por tanto, se procedió a realizar cinco experimentos con el distribuidor de aire con plato perforado y lecho fijo de partículas inertes. En todas estas pruebas se trabajó a cinco potencias del ventilador, aumentando gradualmente hasta alcanzar su máxima potencia.

En el primer experimento se trabajó con la columna vacía para determinar la relación entre la caída de presión en el distribuidor y la velocidad del aire. Se puede observar en la Figura 5.17 que la caída de presión tiene una dependencia polinómica de segundo orden con respecto a la velocidad superficial del aire, tal como es predicho por la ecuación de Ergun. La ecuación de ajuste se utilizó para calcular la caída de presión en el lecho de granos por medio de la Ecuación 4.4. Los resultados experimentales se encuentran en la Tabla F.1 del Anexo F.

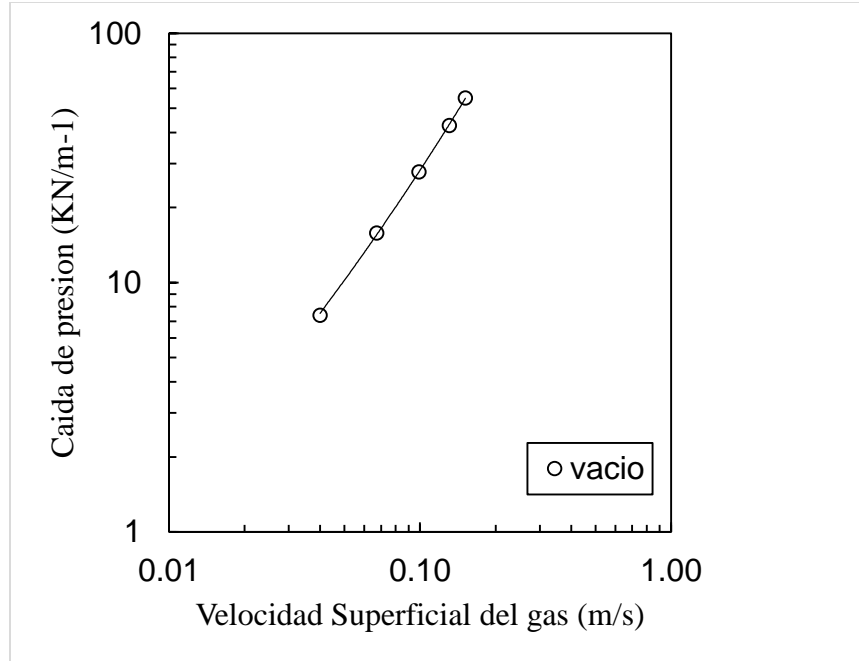


Figura 5.17 Curva de caída de presión para el lecho vacío.

Posteriormente se procedió a realizar cuatro experimentos, uno por cada grano básico, utilizando lechos de 3 cm. Las caídas de presión y las velocidades medidas en estos experimentos se encuentran en el Anexo F: Tabla F.1 para el sorgo, Tabla F.2 para el frijol, Tabla F.3 para el arroz y Tabla F.4 para el maíz. La velocidad del aire en la columna se obtuvo aplicando la Ecuación 4.5. Por su parte, las caídas de presión en el lecho se obtuvieron aplicando la Ecuación 4.4 en conjunto con la Ecuación de ajuste 5.1.

$$\Delta P_{\text{distribuidor}} = 1526.4v^2 + 130.8v - 0.1225 \quad (5.1)$$

En el experimento realizado con sorgo no se logró su fluidización. Sin embargo, a la velocidad del aire correspondiente a la potencia máxima del ventilador, se presentó un burbujeo constante en la superficie solamente en la zona del centro y sus alrededores. En la Figura 5.18 se muestra los resultados para la variación de la caída de presión en la columna contra la velocidad superficial del aire. Los datos presentan un comportamiento lineal y creciente, similar al ejemplo de la Figura 3.7. Sin embargo, se requiere más potencia del ventilador para alcanzar el régimen de fluidización.

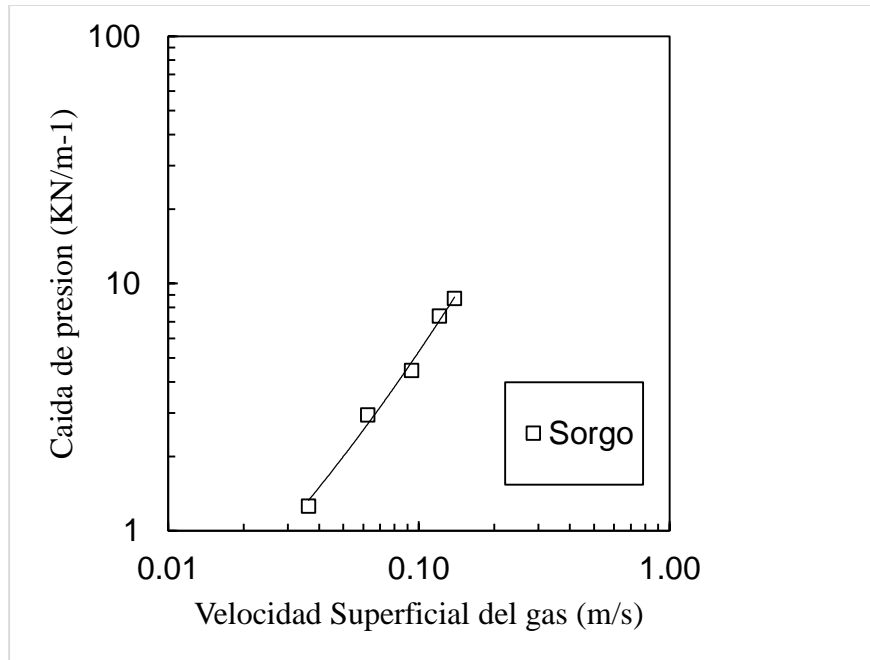


Figura 5.18 Curva de caída de presión del sorgo con lecho de 3 cm

Por su parte en el lecho de frijol no se observaron cambios en el lecho. Este permaneció inmóvil durante todo el experimento, es decir que se comportó como un lecho fijo. Al igual que para el sorgo los datos de la caída de presión contra la velocidad superficial del aire (Figura 5.19) presentan un comportamiento creciente.

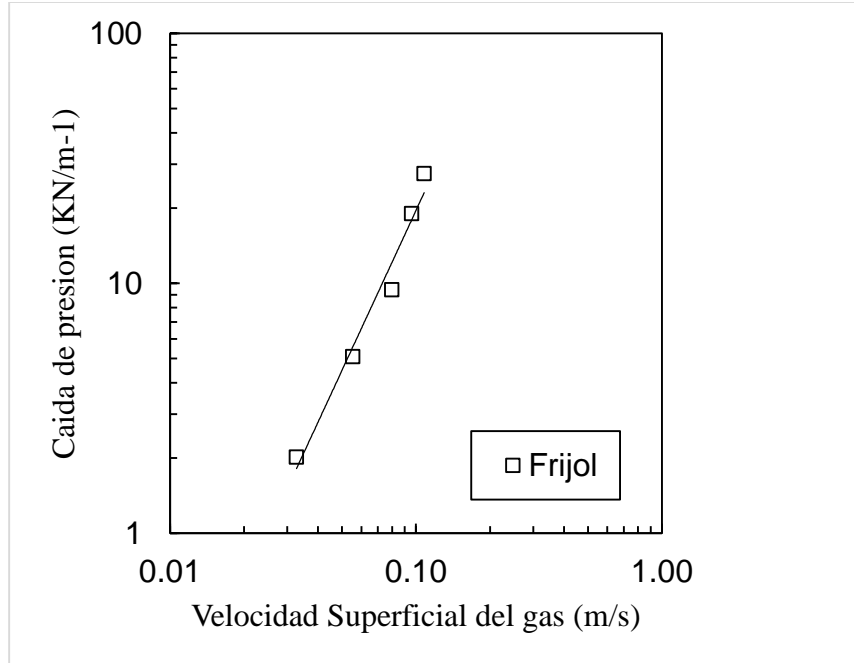


Figura 5.19 Curva de caída de presión del frijol con lecho de 3 cm

En el caso del arroz, al alcanzar los 50 Hz de potencia se observaron canalizaciones en la zona cercana a la pared. Al aumentar la potencia a 60 Hz se apreció una expansión del lecho de aproximadamente 0.5 cm. Además, las canalizaciones cercanas a la pared continuaron. Este fue el grano que presentó la caída de presión más alta. Sin embargo, aunque no se logró alcanzar la fluidización, la gráfica de la variación de la caída de presión contra la velocidad superficial del aire (Figura 5.20), presenta una ligera curvatura, lo cual indica que presentaba tendencia a la fluidización.

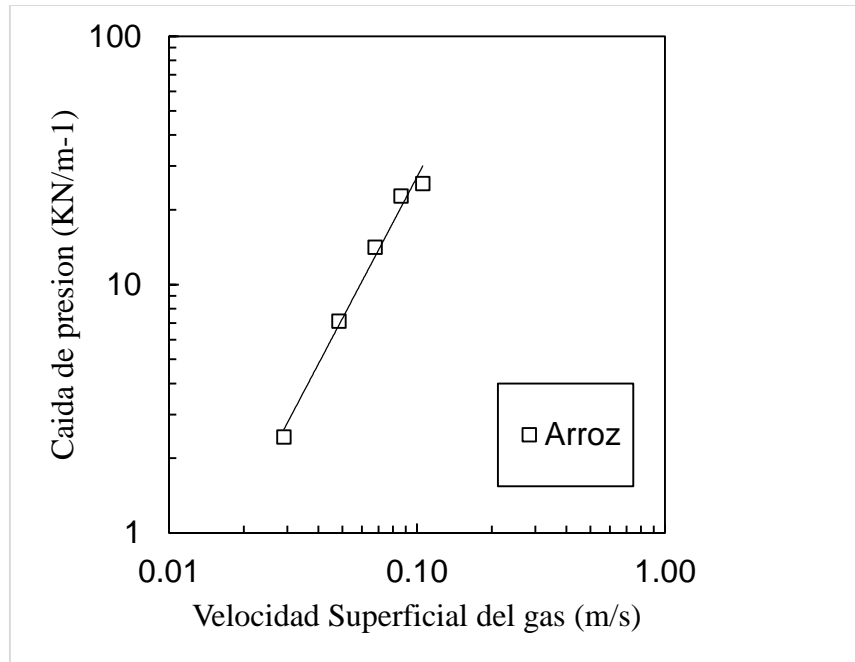


Figura 5.20 Curva de caída de presión del arroz con lecho de 3 cm

Finalmente, en el caso del maíz no se observó cambio en el lecho. Este permaneció inmóvil durante todo el experimento, es decir, que se comportó como lecho fijo. Este lecho fue el que presentó la caída de presión más baja a lo largo del experimento. En el caso de este experimento, al calcular la caída de presión mediante la Ecuación 4.4 para las dos primeras frecuencias del ventilador (20 y 30 Hz), se obtuvieron valores negativos de la caída de presión en la columna. Desde el punto de vista físico esto es incorrecto ya que se estaría diciendo que la caída de presión en un lecho vacío es mayor que en un lecho relleno. Este resultado puede deberse a las oscilaciones de la velocidad del aire al momento de pasar por el lecho o a los instrumentos de medición. Debido a esto, se asumió que en estas mediciones la caída de presión es igual a cero. Para construir el gráfico de caída de presión contra velocidad del aire (Figura 5.21), solamente se tomaron las mediciones de tres frecuencias del ventilador.



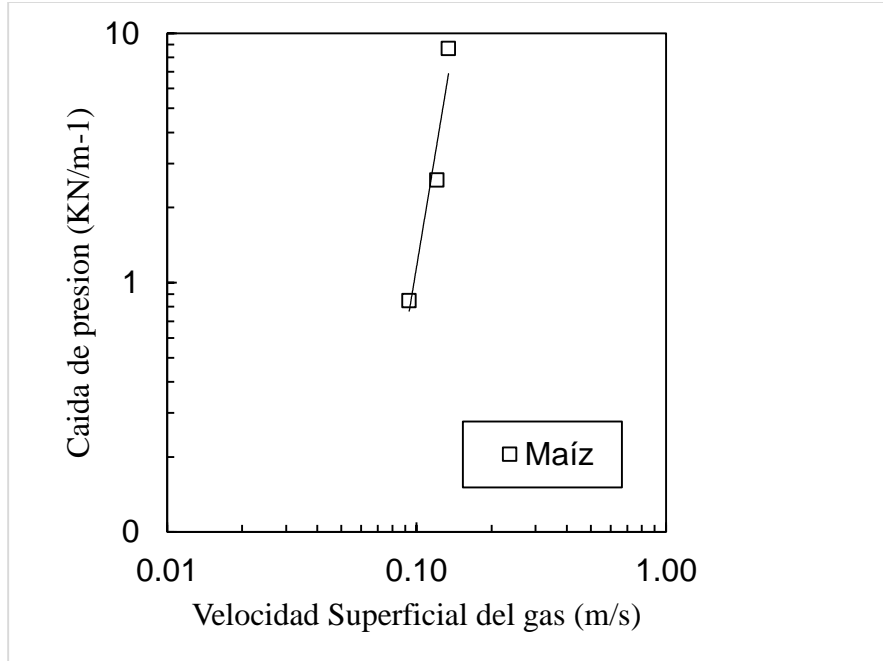


Figura 5.21 Curva de caída de presión del maíz con lecho de 3 cm

De las curvas de caída de presión de los cuatro granos, se puede deducir que para alcanzar la velocidad mínima de fluidización para un lecho de 3 cm de frijol o de arroz se requiere una velocidad superficial del aire mayor a 0.10 m/s. En el caso de lechos de 3 cm de sorgo o de maíz, se requiere una velocidad superficial del aire mayor de 0.13 m/s.

### 5.2.3 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD MÍNIMA DE CHORRO Y CAÍDA DE PRESIÓN

Para medir la velocidad de chorro se midió por medio del procedimiento abordado en la Sección 4.2.3. Inicialmente, se calculó el número de Arquímedes,  $Ar$ , mediante la Ecuación 3.4. Seguidamente, se calculó la altura máxima del lecho,  $H_{max}$  utilizando la Ecuación 3.14. Posteriormente se calcularon las alturas del lecho con las cuales se pretendía realizar los experimentos, utilizando la Ecuación 4.10, partiendo de 0.6 veces la  $H_{max}$  e incrementando en 0.2 hasta que ya no se observó formación de la fuente. Las alturas de lecho propuestas para realizar experimentos se muestran en la Tabla 5.4 columnas 4 a 7. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que el lecho de granos debía ser colocado suelto y a la azar, por lo tanto la altura de lecho trabajadas no resultaban precisamente iguales a las trabajadas.

Tabla 5.4 Cálculos de número de Arquímedes,  $H_{max}$  y altura del lecho.

Grano	Ar, Adim	Hmax , m	H(m)			
			<b>0.6</b>	<b>0.8</b>	<b>1</b>	<b>1.2</b>
Sorgo	373042	0.73	0.44	0.59	0.73	0.88
Frijol	4464082174	0.31	0.18	0.25	0.31	0.37
Arroz	469125	0.64	0.38	0.51	0.64	0.76
Maíz	5167014	0.30	0.18	0.24	0.30	0.36

Para el caso del sorgo, de acuerdo a la Tabla 5.4, el primer experimento requería una altura de 0.44 m. Para esta altura no se observó formación de chorro, por lo cual se procedió a realizar experimentos disminuyendo gradualmente 0.03 m la altura del lecho. Siguiendo esta lógica, se realizaron experimentos a 0.41, 0.38 y 0.35 m de altura, siendo esta última altura la altura máxima a la cual se logró la formación de la fuente. Posteriormente se realizaron dos experimentos adicionales reduciendo cada vez en 0.1 m la altura del lecho.

Las caídas de presión en el lecho y las velocidades medidas, así como la velocidad superficial del aire en la columna (calculada con la Ecuación 4.5) y la altura de la fuente observada en los experimentos para las tres alturas de lecho de sorgo (0.35, 0.25 y 0.15 m), todos realizados por triplicado, se presentan en formato digital en la carpeta “Anexo G digital” en el archivo Excel “Anexo G1 Sorgo.xlsx”.

Para la altura de 0.35 m de lecho de sorgo, primero se observó movimiento de los granos en la parte inferior del lecho. Al aumentar la velocidad del aire, se redujo el movimiento de los granos en la parte inferior, pero se presentó movimiento en la parte superior del lecho. Posteriormente, se formó la fuente a una velocidad del aire aproximada de 2.55 m/s y al mismo tiempo se observó una pequeña caída de presión así como un aumento de la velocidad del aire. La altura máxima de la fuente fue de 0.07 m. Al disminuir gradualmente la velocidad del aire, la fuente colapsó a una velocidad del aire aproximada de 2.22 m/s.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.35 m se muestran en la Figura 5.22. Al comparar esta grafica con la Figura 3.14 luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión debería decrecer, sin embargo, esta continúa aumentando. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó la disminución gradual de la caída de presión, pero sin tener un incremento de la presión drástica al colapso de la fuente como lo sugiere la teoría, por lo cual es difícil determinar la velocidad mínima de chorro en la gráfica.

Sin embargo, no se logra alcanzar un buen desarrollo de la fuente debido a la baja capacidad del ventilador.

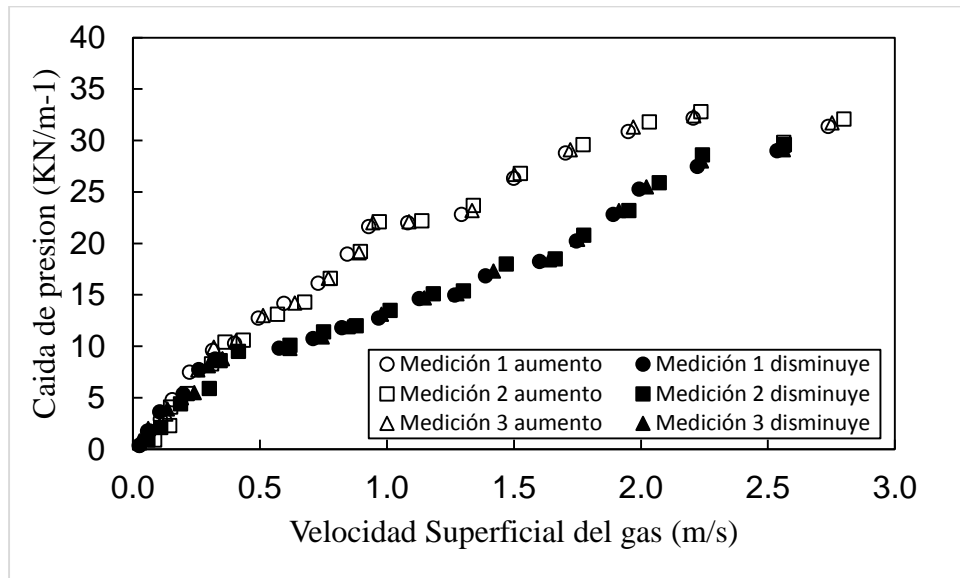


Figura 5.22 Velocidad de chorro del sorgo con lecho de 0.35 m de altura

Por su parte el lecho de sorgo con altura de lecho de 0.25 m tuvo un comportamiento un poco diferente. En este lecho se observó movimiento en la parte inferior al aumentar la velocidad del aire. Posteriormente se observó la formación de la fuente a una velocidad del aire aproximada de 2.22 m/s, acompañada de caída de presión y aumento de la velocidad del gas. La altura de la fuente que se logró con esta altura de lecho fue de 0.25 m. Se observó un aumento de la presión al momento del colapso de la fuente a una velocidad del aire aproximada de 1.43 m/s Esto ocurrió al disminuir la velocidad del aire.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.25 m se muestran en la Figura 5.23. Al comparar esta grafica con la literatura, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión decrece, pero luego continúa aumentando lo cual no debería pasar. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó un ligero aumento de presión al colapso de la fuente. Al continuar la disminución de la velocidad del gas la caída de presión disminuye gradualmente. Ambos comportamientos en la disminución son similares a los mencionados en la literatura.

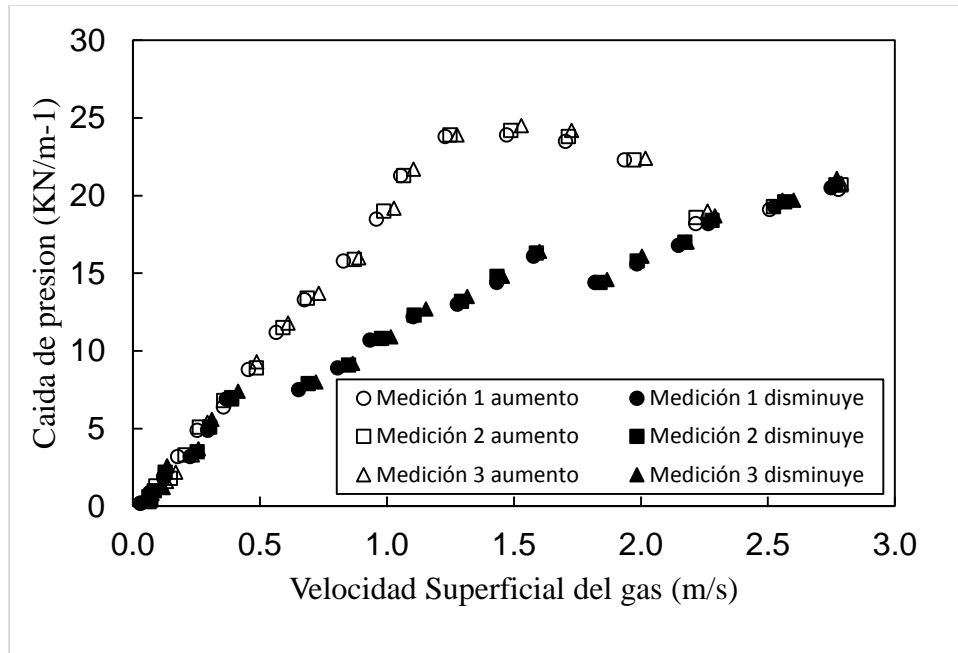


Figura 5.23 Velocidad de chorro del sorgo con lecho de 0.25 m de altura.

En el caso del lecho de sorgo con altura de lecho de 0.15 m (Figura 5.24), se observó movimiento en la parte inferior al aumentar la velocidad del aire. Posteriormente se formó la fuente a una velocidad del aire de 1.56 m/s, en este caso se ve claramente una caída de presión y aumento de la velocidad del gas. La altura de la fuente que se logró con esta altura de lecho fue de 0.33 m, en este momento también se observó el arrastre de los granos en el lecho. Al disminuir la velocidad del aire, el lecho mostró un aumento de la presión al momento del colapso de la fuente a una velocidad de aire aproximada de 1.16 m/s.

En la Figura 5.24, se muestran los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.15 m. Al comparar esta grafica con la literatura, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión decrece, pero luego continúa aumentando lo cual no debería pasar. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó al colapsar la fuente un ligero aumento de presión. Al continuar disminuyendo la velocidad del gas, la caída de presión disminuye gradualmente.

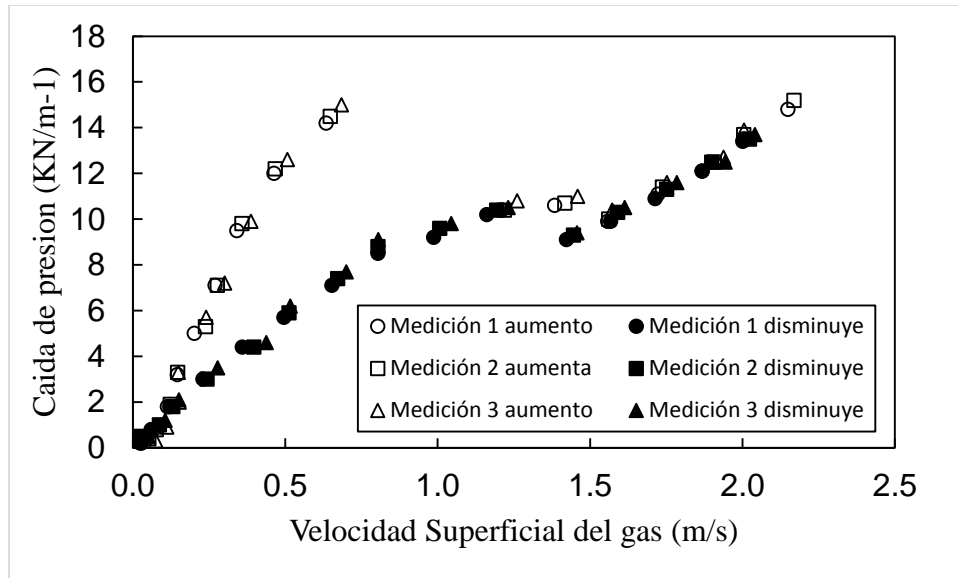


Figura 5.24 Velocidad de chorro del sorgo con lecho de 0.15 m de altura.

La velocidad mínima de chorro del sorgo, tal como se menciona en la Sección 3.6.2 corresponde a la velocidad medida al colapsar la fuente. En la Tabla 5.5 se muestran la velocidad mínima de chorro y su caída de presión para cada uno de las alturas de lecho con que se trabajó.

Tabla 5.5 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del sorgo

Altura de lecho, m	Velocidad mínima de chorro $U_{ms}$ , m/s	Caída de presión en el lecho DP, $KN/m^{-1}$
0.35	2.22	21.8
0.25	1.87	14.6
0.15	1.44	9.4

En el caso del frijol, de acuerdo a la Tabla 5.4, el primer experimento requería una altura de 0.18 m. Para esta altura no se observó formación de chorro, por lo cual se procedió a realizar experimentos disminuyendo gradualmente 0.03 m la altura del lecho. Siguiendo esta lógica, se realizó un experimento con una altura de 0.15 m de altura, donde se formó el chorro, siendo esta altura la máxima a la cual se logró la formación de la fuente. Posteriormente se realizaron dos experimentos adicionales reduciendo en 0.03 m la altura del lecho para el primero y en 0.06 para el segundo.

Las caídas de presión en el lecho y las velocidades medidas, así como la velocidad superficial del aire en la columna (calculada con la Ecuación 4.5) y la altura de la fuente observada en los experimentos para las tres alturas de lecho de frijol (0.15, 0.12 y 0.09 m), todos realizados por triplicado, se presentan en formato digital en la carpeta “Anexo G digital” en el archivo Excel “Anexo G2 Frijol.xlsx”.

Por su parte el lecho de frijol, para una altura de lecho de 0.15 m, a medida que aumentó la velocidad del aire, se observó primero movimiento en la parte inferior del lecho. Posteriormente se observó movimiento en la parte superior del lecho hasta que apareció la fuente a una velocidad del aire aproximada de 1.50 m/s, momento en el cual fue apreciable la caída de presión y aumento de la velocidad del aire. La fuente se logró formar alcanzando una altura de 0.085 m. Al disminuir la velocidad se observa el colapso de la fuente a una velocidad de 1.29 m/s.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.15 m para el frijol se muestran en la Figura 5.25. Al comparar esta grafica con la literatura, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión decrece, pero luego continúa aumentando, cosa que no sucede en la literatura. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó la disminución gradual de la caída de presión hasta alcanzar el reposo. No se observó aumento de presión como dice la literatura y es prácticamente imposible leer la velocidad mínima de chorro en la gráfica.

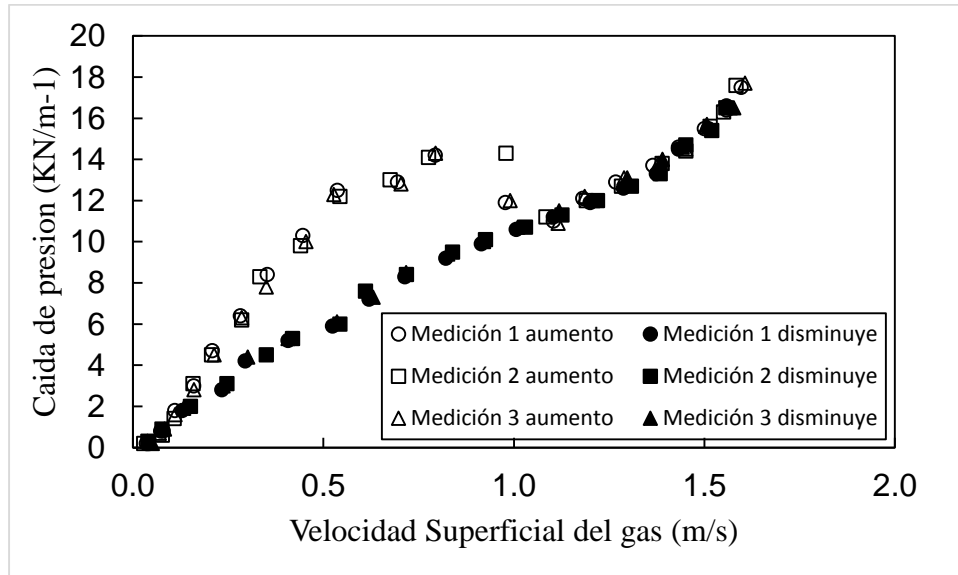


Figura 5.25 Velocidad de chorro del frijol con lecho de 0.15 m de altura

En el caso del lecho de frijol, para una altura de lecho de 0.12 m al aumenta la velocidad del aire, se observó movimiento en la parte inferior del lecho. Seguidamente se observó movimiento en la parte superior hasta que apareció la fuente a una velocidad del aire aproximada de 1.26 m/s, momento en el cual se apreció caída de presión y aumento de la velocidad. La fuente se logró formar alcanzando una altura de 0.17 m. Luego al disminuir la velocidad del aire se observó el colapso de la fuente a una velocidad del aire de aproximadamente 1.11 m/s

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.12 m para el frijol se muestran en la Figura 5.26. Al comparar esta grafica con la literatura, al llegar a  $U_m$ , la caída de presión decrece, pero luego continúa aumentando lo cual no sucede según la literatura. En el caso de la disminución de la velocidad del gas, no se observó aumento de presión como dice la literatura. La caída de presión disminuyó gradualmente hasta alcanzar el reposo. En esta gráfica es difícil leer la velocidad mínima de chorro.

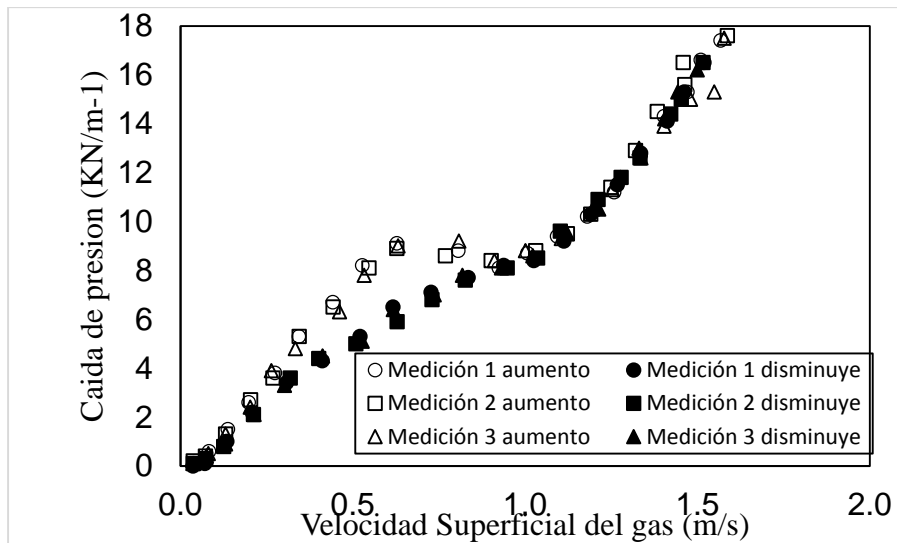


Figura 5.26 Velocidad de chorro del frijol con lecho de 0.12 m de altura

Por su parte el lecho de frijol, para una altura de lecho de 0.06 m, a medida que aumenta la velocidad del aire, se observó primero movimiento en la parte inferior del lecho. Posteriormente se observa movimiento en la parte superior hasta que comienza a aparecer la fuente a una velocidad del aire aproximada de 0.94 m/s, momento en el cual fue aprecia caída de presión y aumento de la velocidad del aire. La fuente se logró formar alcanzando una altura de 0.26 m. Al disminuir la velocidad del aire se observó el colapso de la fuente a una velocidad de 0.87 m/s.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.06 m para el frijol se muestran en la Figura 5.27. Al comparar esta grafica con la literatura, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión decrece, sin embargo, esta luego continúa aumentando lo cual no debería suceder. En el caso de la disminución de la velocidad del aire, la caída de presión disminuye gradualmente. No se observó aumento de presión y es muy difícil leer la velocidad mínima de chorro en la gráfica.

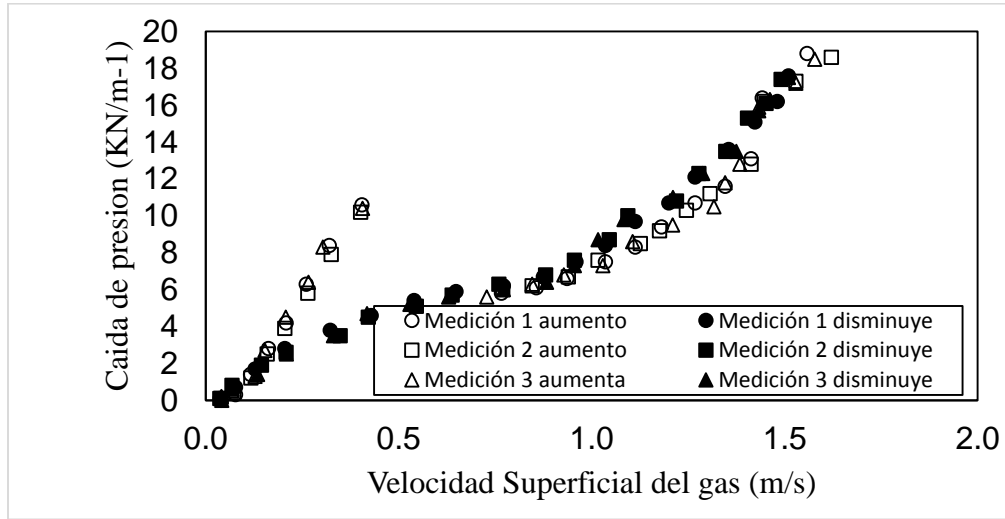


Figura 5.27 Velocidad de chorro del frijol con lecho de 0.06 m de altura

La velocidad mínima de chorro del frijol, corresponde a la velocidad medida al colapsar la fuente tal como se menciona en la Sección 3.6.2. En la Tabla 5.6 se muestran la velocidad mínima de chorro y su caída de presión para cada uno de las alturas de lecho con que se trabajó.

Tabla 5.6 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del frijol

Altura de lecho, m	Velocidad mínima de chorro $U_{ms}$ , m/s	Caída de presión en el lecho DP, $KN/m^{-1}$
0.15	1.29	13.1
0.12	1.26	11.3
0.06	0.87	6.5



Por su parte, en el caso del arroz (primer grano utilizado para los experimentos en lecho fluidizado), de acuerdo a la Tabla 5.4, el primer experimento requería una altura de lecho de 0.38 m. Para esta altura de lecho no se observó formación de chorro, por lo cual se procedió a hacer otro experimento con una altura de lecho de 0.4 veces la  $H_{max}$ , siendo esta altura la altura máxima a la cual se logró la formación de la fuente. Posteriormente se hicieron dos experimentos adicionales disminuyendo gradualmente la altura del lecho en 0.07 m.

Las caídas de presión en el lecho y las velocidades medidas, así como la velocidad superficial del aire en la columna (calculada con la Ecuación 4.5) y la altura de la fuente observada en los experimentos para las tres alturas de lecho de arroz (0.25, 0.18 y 0.11 m), todos realizados por triplicado, se presentan en formato digital en la carpeta “Anexo G digital” en el archivo Excel “Anexo G3 Arroz.xlsx”.

Para una altura de lecho de arroz de 0.25 m al aumentar la velocidad del aire, se observó movimiento en la parte inferior del lecho. También se observaron pequeñas canalizaciones y tapones en los costados, es posible que por este motivo tanto el chorro como la fuente se veían inestables en ocasiones. La fuente se formó a una velocidad de aire de 1.50 m/s. La fuente se logró formar alcanzando una altura de 0.15 m. Al disminuir la velocidad del aire se observa el colapso de la fuente a una velocidad de 1.47 m/s.

En la Figura 5.28, se muestran los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de arroz de 0.25 m. Al comparar esta gráfica con la literatura, se observa que al incrementar la velocidad del aire, la caída de presión no decrece como en el caso de la Figura 3.14. Al disminuir la velocidad del aire, no se mostró incremento de la presión como sugiere la teoría, por lo cual difícil leer la velocidad mínima de chorro en la gráfica. Sin embargo, la caída de presión disminuye gradualmente hasta detener el experimento.

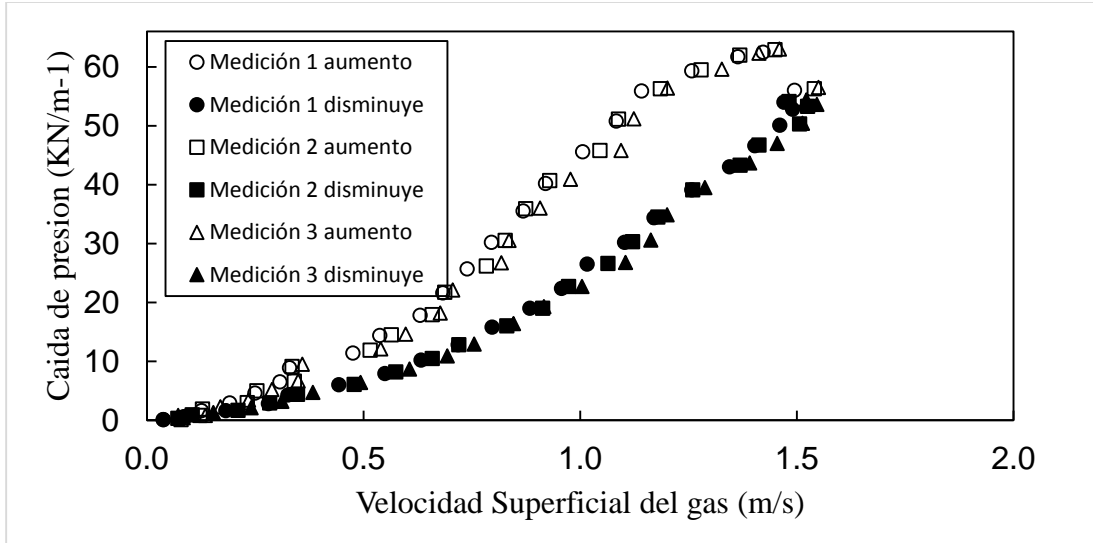


Figura 5.28 Velocidad de chorro del arroz con lecho de 0.25 m de altura

En el caso del lecho de arroz para una altura de lecho de 0.18 m, al aumentar la velocidad del aire, se observó movimiento en la parte inferior del lecho. También se observan pequeñas canalizaciones y tapones en los costados, creando inestabilidad en la fuente. La fuente se formó a una velocidad de aire de 1.47 m/s, acompañada de una pequeña caída de presión y aumento de la velocidad del aire. La fuente alcanzó una altura de 0.22 m. Al disminuir la velocidad del aire se observó el colapso de la fuente a una velocidad del aire de 1.27 m/s.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de arroz de 0.18 m se muestran en la Figura 5.29. Al comparar esta grafica con la Figura 3.14 luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión debería decrecer, sin embargo, esta continúa aumentando. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó la disminución gradual de la caída de presión. No se observó un incremento de la presión drástica al colapsar la fuente, como lo sugiere la teoría. En esta grafica es muy difícil leer la velocidad mínima de chorro.

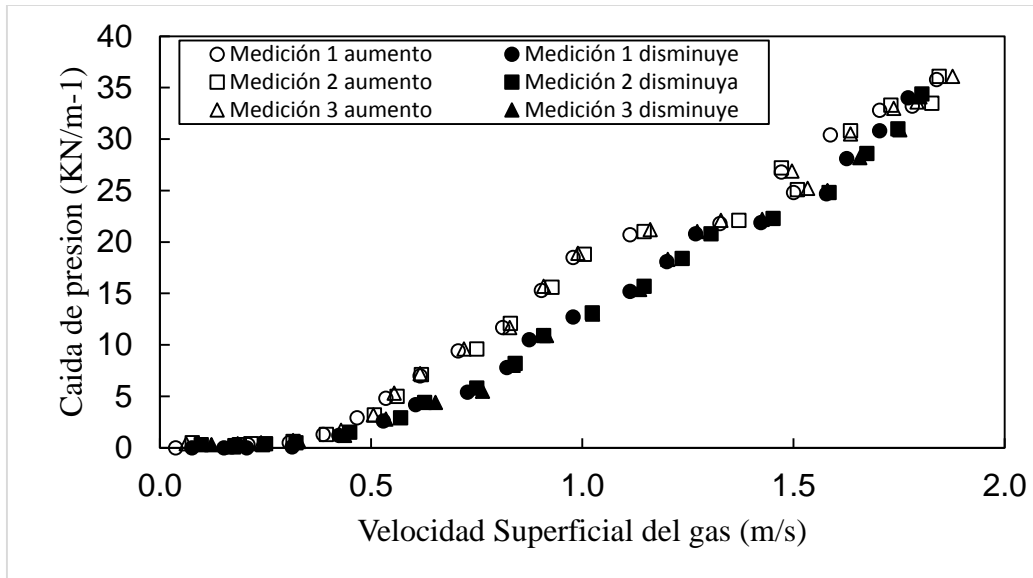


Figura 5.29 Velocidad de chorro del arroz con lecho de 0.18 m de altura

Por su parte, para el lecho de arroz para una altura de lecho de 0.11 m, al aumentar la velocidad del aire, se observó movimiento en la parte inferior del lecho. La fuente se formó a una velocidad de aire de 1.26 m/s, acompañada de una caída de presión y aumento de la velocidad. La fuente alcanzó una altura máxima de 0.48 m, donde se presentó arrastre de los granos. Al disminuir la velocidad del aire se observó el chorro inclinado e inestable hasta el colapso de la fuente a una velocidad de aire de 0.95 m/s.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.11 m se muestran en la Figura 5.30. Al comparar esta grafica con la teoría, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión debería decrecer, sin embargo, esta continúa aumentando. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó un ligero aumento de la presión al momento del colapso de la fuente, pero sin tener un incremento de la presión drástica como lo sugiere la teoría.

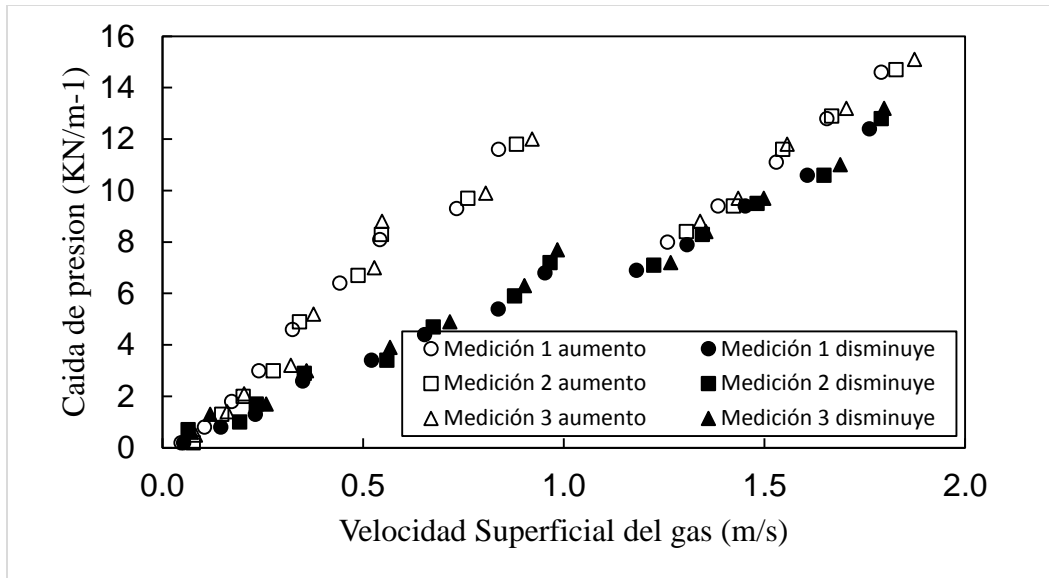


Figura 5.30 Velocidad de chorro del arroz con lecho de 0.11 m de altura.

La velocidad mínima de chorro del arroz, tal como se menciona en la Sección 3.6.2 corresponde a la velocidad medida al colapsar la fuente. En la Tabla 5.7 se muestran la velocidad mínima de chorro y su caída de presión para cada uno de las alturas de lecho con que se trabajó.

Tabla 5.7 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del Arroz

Altura de lecho, m	Velocidad mínima de chorro $U_{ms}$ , m/s	Caída de presión en el lecho DP, KN/m <sup>-1</sup>
0.25	1.47	63
0.18	1.27	21
0.11	0.95	7.1

En el caso del maíz, de acuerdo a la Tabla 5.4 el primer experimento requería una altura de 0.18 m. Para esta altura no se observó formación de chorro, por lo cual se procedió a realizar experimentos disminuyendo gradualmente 0.04 m la altura del lecho, ya que el maíz es el más grande de los granos con los que se trabajó. Siguiendo esta lógica, se realizaron experimentos a 0.14, 0.10 y 0.06 m de altura, siendo 0.14 m la altura máxima a la cual se logró la formación de la fuente.

Las caídas de presión en el lecho y las velocidades medidas, así como la velocidad superficial del aire en la columna (calculada con la Ecuación 4.5) y la altura de la fuente observada en los experimentos para las tres alturas de lecho de maíz (0.14, 0.10 y 0.06 m), todos realizados por triplicado, se presentan en formato digital en la carpeta “Anexo G digital” en el archivo Excel “Anexo G4 Maíz.xlsx”.

Para el lecho de maíz para una altura de lecho de 0.14 cm, al aumentar la velocidad del aire, se observó movimiento en la parte inferior del lecho. Seguidamente se formó la fuente a una velocidad de aire de 1.11 m/s y al mismo tiempo se observó una caída de presión y aumento de la velocidad del aire. La fuente alcanzó una altura de 0.15 m. Al disminuir la velocidad del aire se observó el colapso de la fuente a una velocidad del aire de aproximadamente 1.13 m/s.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.14 m para el maíz se muestran en la Figura 5.31. Al comparar esta grafica con la literatura, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión decrece por un instante, sin embargo, esta continúa aumentando. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó disminuir la caída de presión gradualmente, sin ninguna disminución drástica al momento del colapso de la fuente, por lo cual no fue posible observar la velocidad mínima de chorro.

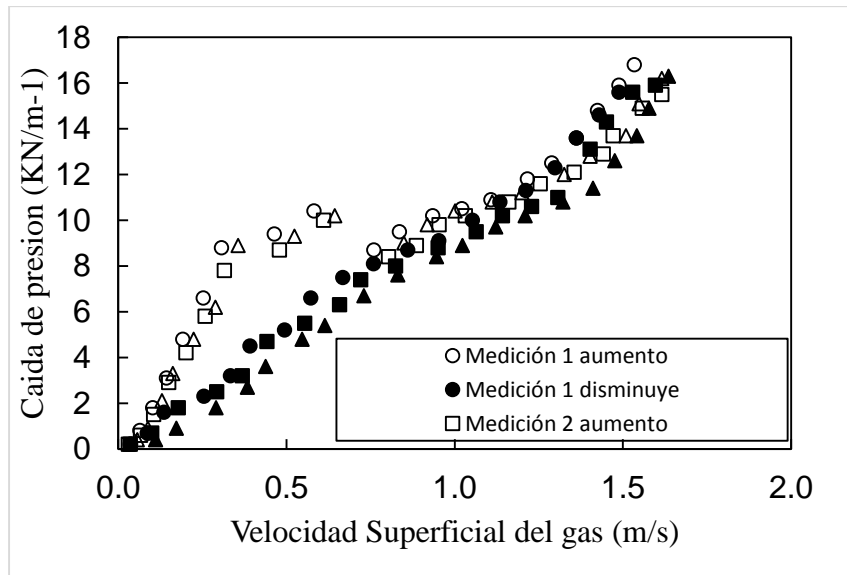


Figura 5.31 Velocidad de chorro del maíz con lecho de 0.14 m de altura

En el caso, del lecho de maíz para una altura de lecho de 0.10 m, al aumentar la velocidad del aire, se observó movimiento en la parte inferior del lecho. Al formarse la fuente a una velocidad de 0.65 m/s, se observó una abrupta caída de presión y aumento de la velocidad del aire. La fuente alcanzó una altura máxima de 0.21 m, acompañada de arrastre del grano. Al disminuir la velocidad del aire se observó el colapso de la fuente a una velocidad de 0.98 m/s, acumulación de aire y burbujas atrapadas.

En la Figura 5.32, se muestran los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de maíz de 0.10 m. Al comparar esta grafica con la literatura, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión decrece, pero luego continúa aumentando lo cual no sucede en la literatura. En el caso de la disminución de la velocidad del gas, no se observó incremento de la presión al momento del colapso de la fuente como lo sugiere la teoría. La caída de presión disminuye gradualmente hasta el final del experimento y no es posible leer la velocidad mínima de chorro.

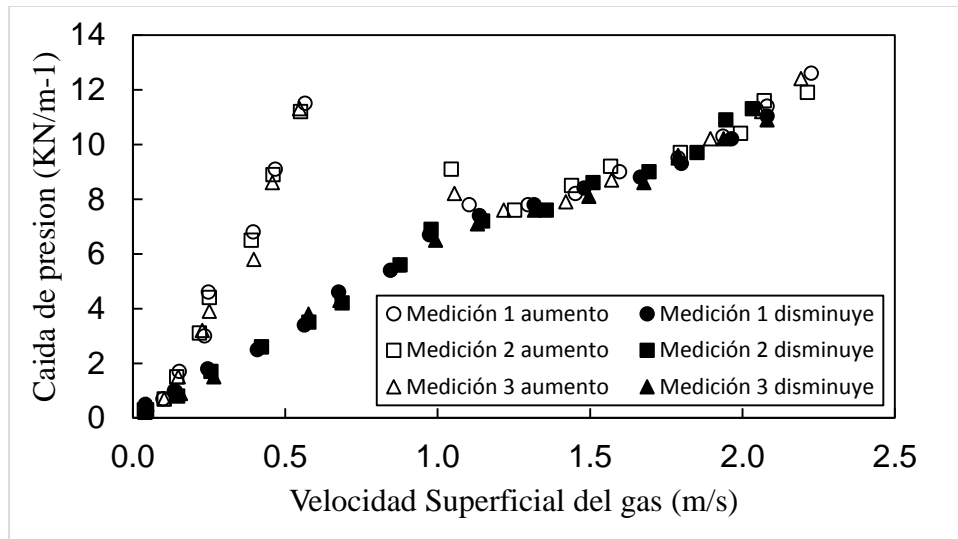


Figura 5.32 Velocidad de chorro del maíz con lecho de 0.10 m de altura

Por su parte, en el lecho de maíz para una altura de lecho de 0.06 m, al aumentar la velocidad del aire, se observó movimiento en la parte inferior del lecho. Un poco antes de la aparición de la fuente se logra apreciar con claridad el anillo con una pequeña fluidización del chorro. La fuente se formó a una velocidad del aire de 0.45 m/s y presentó caída de presión y aumento de la velocidad del aire. La fuente alcanzó una altura de 0.10 m acompañada de arrastre de los granos. Al disminuir la velocidad del aire se observó el colapso de la fuente a una velocidad del aire de 0.83 m/s, en este punto hubo fluidización ocasional.

Los resultados de caída de presión del lecho contra velocidad del aire en la columna para el lecho de chorro de 0.06 m para el maíz se muestran en la Figura 5.33. Al comparar esta grafica con la literatura, luego de que llega a la  $U_m$ , la caída de presión decrece, pero luego continúa aumentando lo cual difiere de la teoría. En el caso de la disminución de la velocidad del gas se observó un leve aumento en la presión al colapsar la fuente. Al continuar la disminución de la velocidad del gas la caída de presión disminuye gradualmente hasta terminar el experimento.

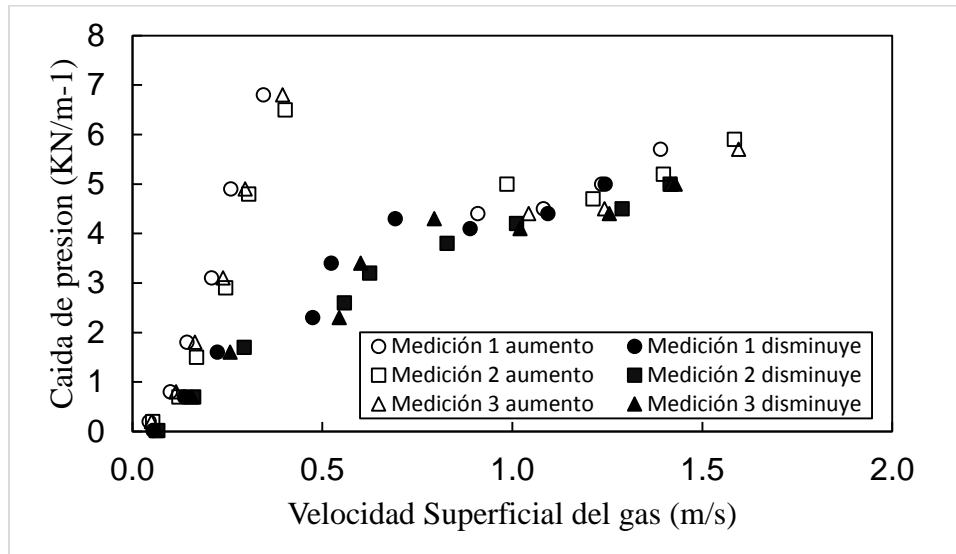


Figura 5.33 Velocidad de chorro del maíz con lecho de 0.06 m de altura.

La velocidad mínima de chorro del Maíz, corresponde a la velocidad medida al colapsar la fuente tal como se menciona en la Sección 3.6.2. En la Tabla 5.8 se muestran la velocidad mínima de chorro y su caída de presión para cada uno de las alturas de lecho con que se trabajó.

Tabla 5.8 Velocidad mínima de chorro y su caída de presión del maíz

Altura de lecho, m	Velocidad mínima de chorro $U_{ms}$ , m/s	Caída de presión en el lecho DP, KN/m <sup>-1</sup>
0.14	1.13	10.1
0.1	0.98	6.9
0.06	0.83	3.8

### 5.3 SIMULACION DEL SECADO DE LOS GRANOS BASICOS

Como se mencionó anteriormente, la simulación de secado fue un complemento a los estudios fluido dinámicos para evaluar la posibilidad de una alternativa al secado de granos artesanal. La simulación se realizó únicamente para el grano de maíz en el secador de lecho de chorro, ya que tal como se menciona en la Sección 4.3, la simulación se haría para los granos y secadores que presentaran una buena calidad de fluidización y que además se contara con todas sus propiedades termodinámicas pertinentes en su variedad de cultivo local, como fue el caso del maíz.

Dicha simulación se realizó usando las condiciones ambientales del departamento de Jinotega, siendo éste uno de los mayores productores de maíz a nivel nacional y en temporada lluviosa (julio), período en el cual la humedad del aire asciende hasta un 85% (INETER, 2005a). De esta forma se obtuvo una simulación de secado en una de las condiciones ambientales más adversas del país.

Adicionalmente, se desea reducir la humedad base seca del grano de maíz desde 33% hasta 13.6% que corresponde con un 12% de humedad base húmeda tal como se menciona en la Tabla 3.1 de la Sección 3.2. Seguidamente, se calcularon tanto las humedades del aire como la del maíz en base seca ya que estos fueron calculados en base húmeda y el modelo a utilizar requiere estos valores en base seca.

Para conocer la humedad más baja que se puede obtener secando con aire natural a 40°C, se utilizó la curva de equilibrio determinada por Floripe (1998), donde se observó el rango de secado admisible, siendo la humedad de equilibrio de 11% base seca, un valor por debajo del valor al que se desea llegar.

El modelo matemático propuesto por Spreutels *et al* (2004) corresponde al nivel 1 de modelos matemáticos para lecho de chorro. Su balance de masa está basado en la difusión pero también se puede resolver utilizando un modelo cinético alternativo tal como se hizo en este trabajo. Este procedimiento consistió en utilizar la ecuación de secado obtenida de la curva de secado para el maíz determinada por Ohlsson (1994), la cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$X = 0.08644249 + \frac{0.3303079 - 0.08644249}{1 + \left[ \frac{t}{10541.34} \right]^{0.9384727}} \quad (5.2)$$

La curva de trabajo propuesta por Ohlsson permite conocer la humedad del grano en rangos de humedad desde 70% hasta 17% base húmeda para la temperatura de trabajo de 40°C. Se tomaron solo los valores correspondientes al rango de trabajo, es decir desde 33% de humedad base seca hasta 13.62%.



La simulación se realizó utilizando el programa informático EES.9.944 y las Ecuaciones 4.11 y 4.14 con las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Para reducir la humedad en base seca del maíz de 33% hasta 13.62% se requirió un tiempo correspondiente a 45,000 segundos, correspondiente alrededor de 12 horas y 30 min. En la Figura 5.34 se muestra el comportamiento de la humedad en base seca del maíz contra el tiempo.

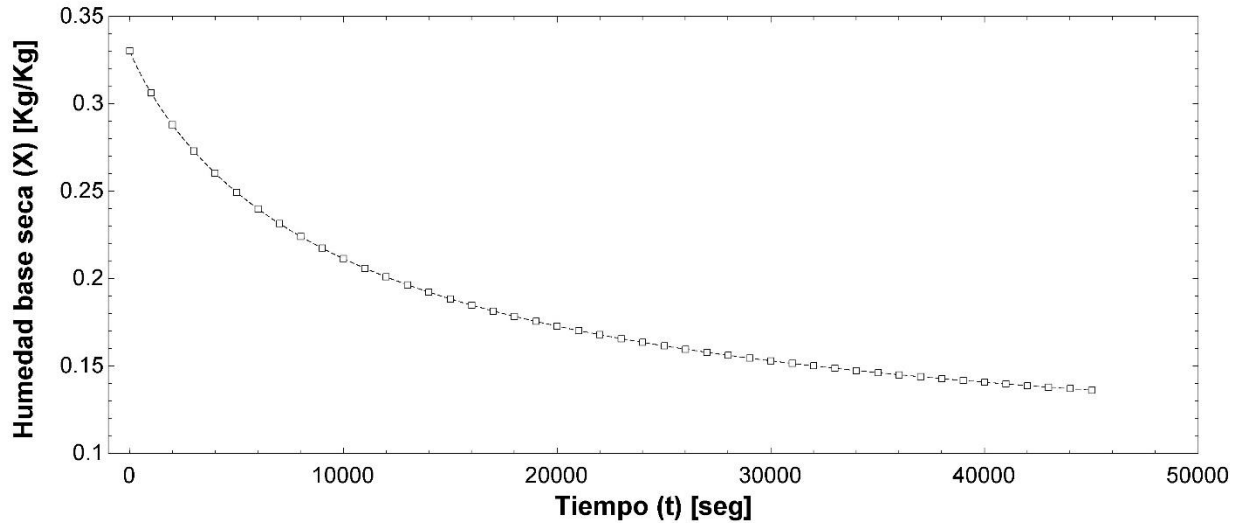


Figura 5.34 Variación de la humedad base seca del maíz contra tiempo en Jinotega.

El contenido de humedad del aire en el sistema disminuye de 1.77% a 1.6% aproximadamente en un tiempo de 45,000 segundos. El comportamiento de la humedad del sistema contra el tiempo se observa en la Figura 5.35.

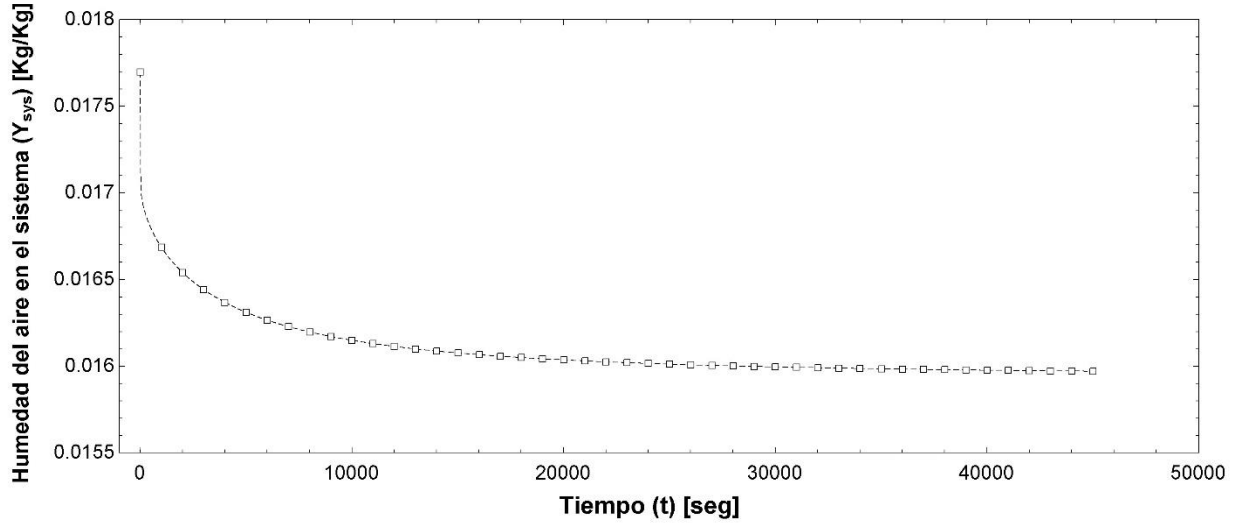


Figura 5.35 Variación de la humedad del aire en el sistema contra el tiempo en Jinotega.

En el caso de la temperatura del sistema, se estableció una temperatura inicial de los granos de 290 K, valor que aumenta al ingresar el aire caliente al sistema hasta alcanzar rápidamente una temperatura aproximada de 306.5 K a la cual se mantiene durante el resto del secado. En la figura 5.36 se muestra la variación de la temperatura del sistema contra el tiempo.

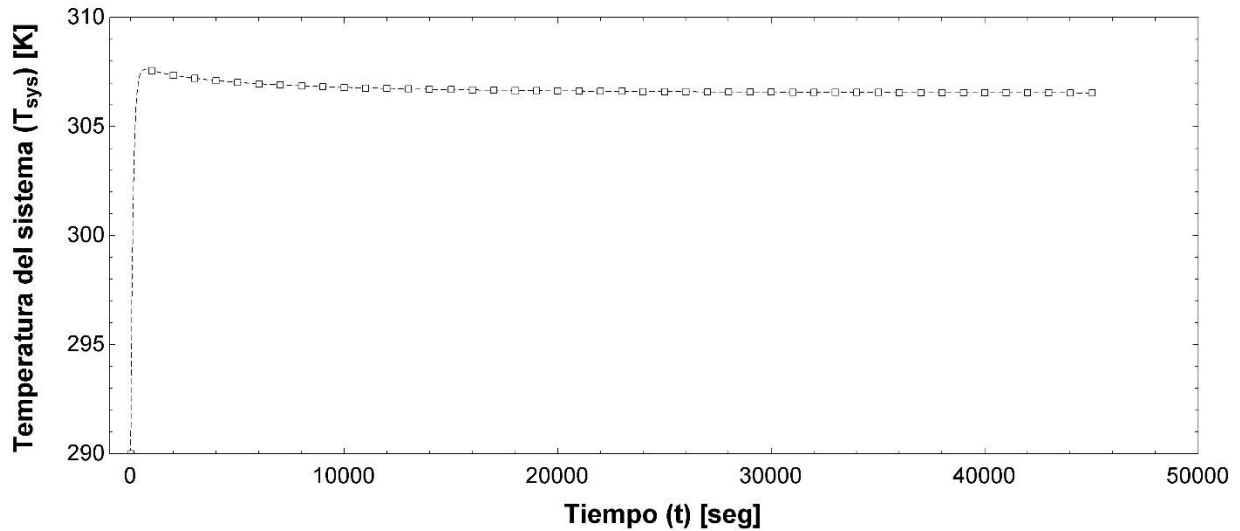


Figura 5.36 Variación de la temperatura del sistema contra el tiempo en Jinotega.

Por su parte, la variación de la humedad con respecto al tiempo  $dX/dt$  disminuye de  $-0.00005$  a  $-8.256E^{-7}$  aproximadamente para el tiempo de 45,000 segundos. La variación de  $dX/dt$  contra el tiempo se muestra en la Figura 5.37.

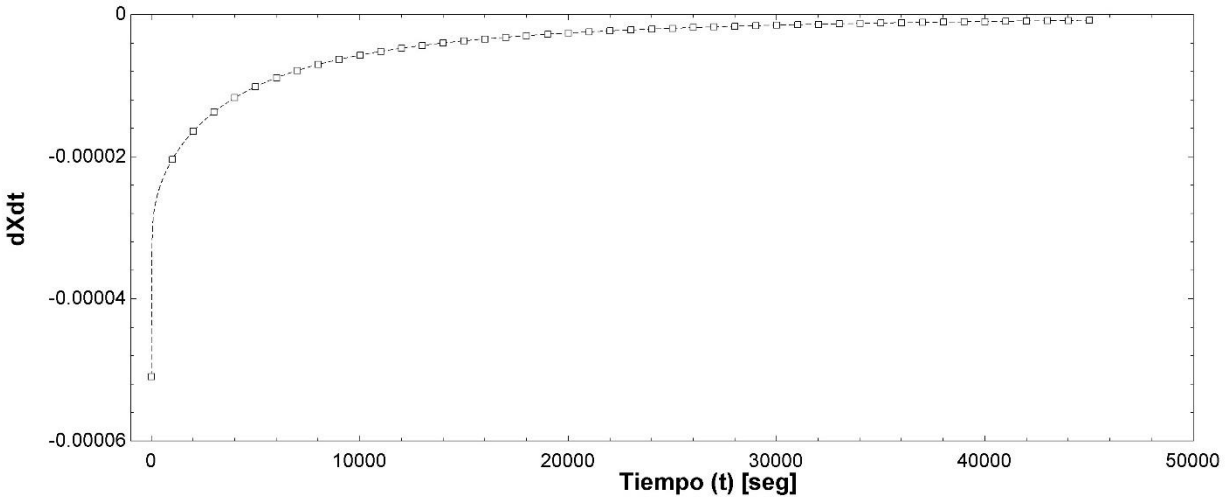


Figura 5.37 Variación de  $dX/dt$  contra el tiempo en Jinotega.

Así mismo se logró calcular el cambio de  $dX/dt$  de  $-8.256E^{-7}$  a  $-0.00005$  con respecto a la humedad en base seca de 13.62% a 33%. En la Figura 5.38 se observa la variación de  $dX/dt$  con respecto a la humedad base seca del maíz.

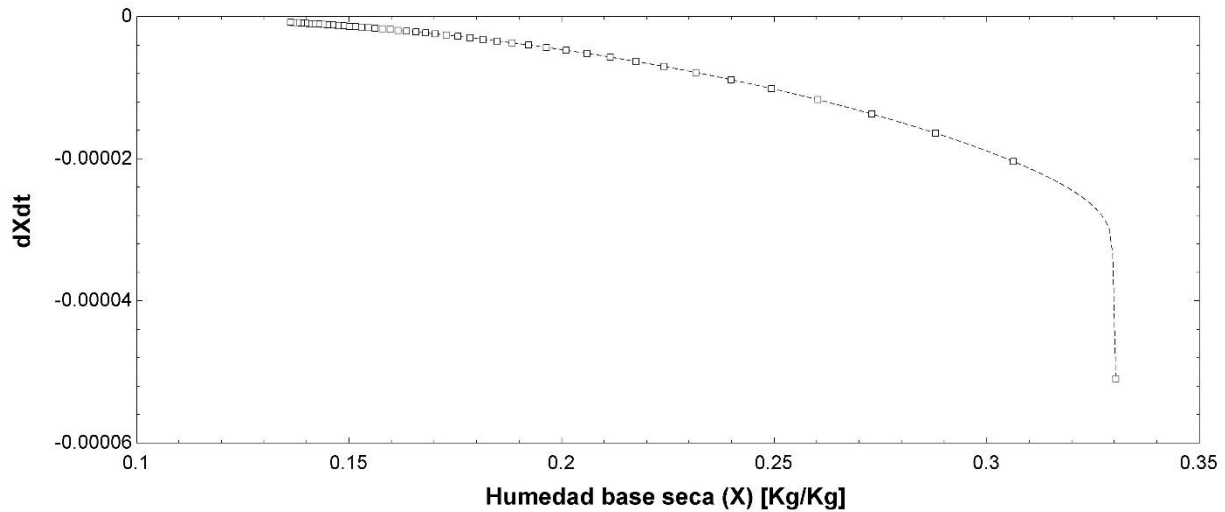


Figura 5.38 Variación de dX/dt contra humedad base seca del maíz en Jinotega.

Para observar el comportamiento del modelo de Spreutels et al (2014) en condiciones favorables, se decidió realizar una segunda simulación para el maíz. Esta simulación se realizó usando las condiciones ambientales del departamento de Chinandega en temporada de verano (Abril), período en el cual la humedad del aire es de aproximadamente 48% (INETER, 2005b).

En esta ocasión, también se desea reducir la humedad base seca del grano de maíz desde 33% hasta 13.6%. Para la modelación del secado de maíz a condiciones más favorables se utilizó la ecuación de secado obtenida de la curva de secado para el maíz determinada por Momenzadeh et al (2011), la cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$X = 0.07323 + \frac{0.3199 - 0.07323}{\left[1 + \left(\frac{t}{7.92614 \times 10^7}\right)^{0.7723}\right]^{1834}} \tag{5.2}$$

La curva de trabajo propuesta por Momenzadeh et al (2011) permite conocer la humedad del grano en rangos de humedad desde 26% hasta 12% base húmeda para la temperatura de trabajo de 30, 40, 50 y 60°C. Se tomaron solo los valores correspondientes al rango de trabajo, es decir desde 33% de humedad base seca hasta 13.62%.

La simulación se realizó utilizando el programa informático EES.9.944 y las Ecuaciones 4.11 y 4.14 con las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Para reducir la humedad en base seca del maíz de 33% hasta 13.62% se requirió un tiempo correspondiente a 7,197 segundos, correspondiente alrededor de 2 horas. En la Figura 5.39 se muestra el comportamiento de la humedad en base seca del maíz contra el tiempo.

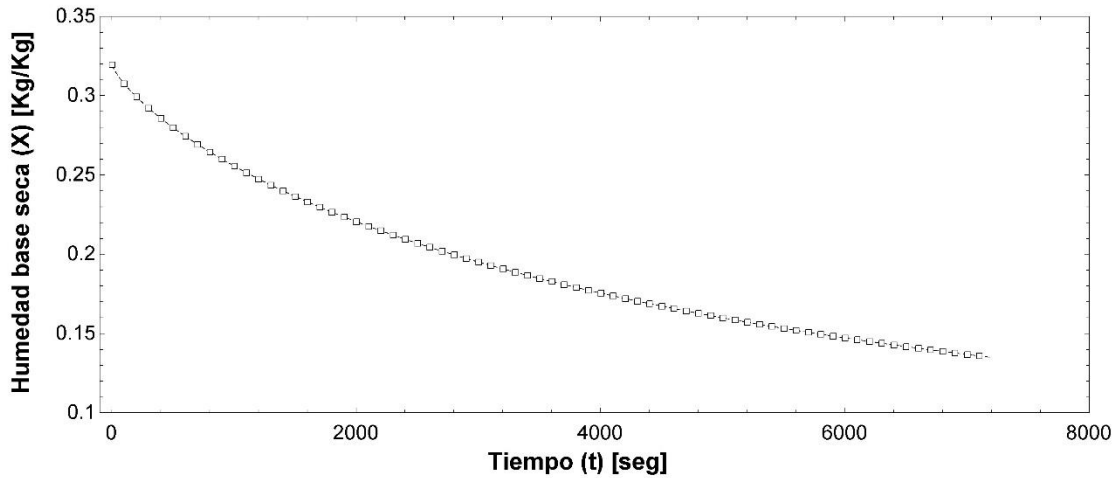


Figura 5.39 Variación de la humedad base seca del maíz contra tiempo en Chinandega.

El contenido de humedad del aire en el sistema disminuye de 0.02289% a 0.1342% aproximadamente en un tiempo de 7,197 segundos. El comportamiento de la humedad del sistema contra el tiempo se observa en la Figura 5.40.

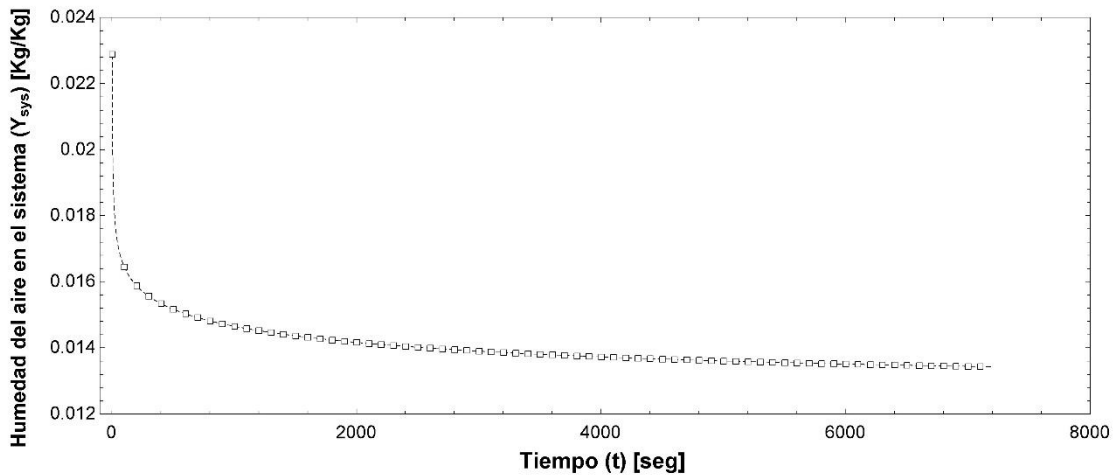


Figura 5.40 Variación de la humedad del aire en el sistema contra el tiempo en Chinandega.

En el caso de la temperatura del sistema, se estableció una temperatura inicial de los granos de 300 K, valor que aumenta al ingresar el aire caliente al sistema hasta alcanzar rápidamente una temperatura aproximada de 309.4 K a la cual se mantiene durante el resto del secado. En la figura 5.41 se muestra la variación de la temperatura del sistema contra el tiempo.

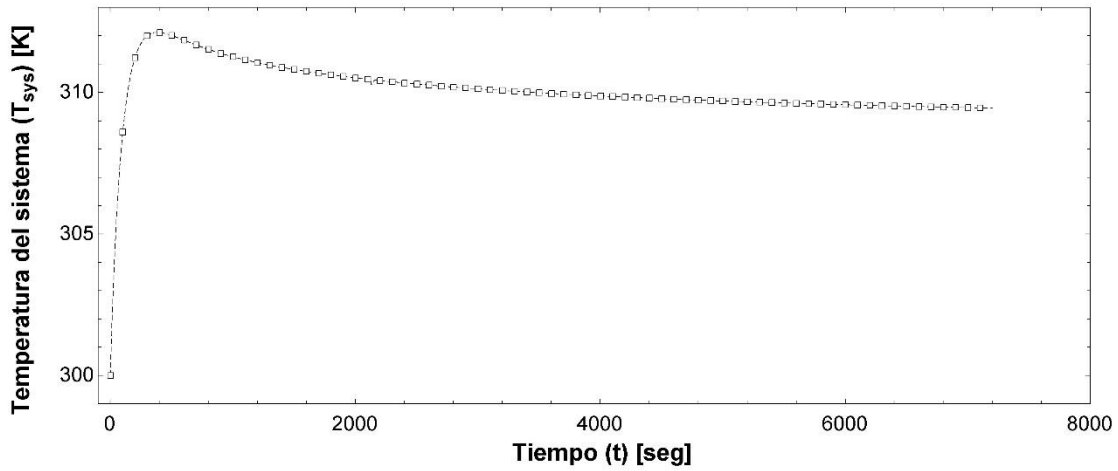


Figura 5.41 Variación de la temperatura del sistema contra el tiempo en Chinandega.

Por su parte, la variación de la humedad con respecto al tiempo  $dX/dt$  disminuye de 0.0002769 a -0.000009165 aproximadamente para el tiempo de 7,197 segundos. La variación de  $dX/dt$  contra el tiempo se muestra en la Figura 5.42.

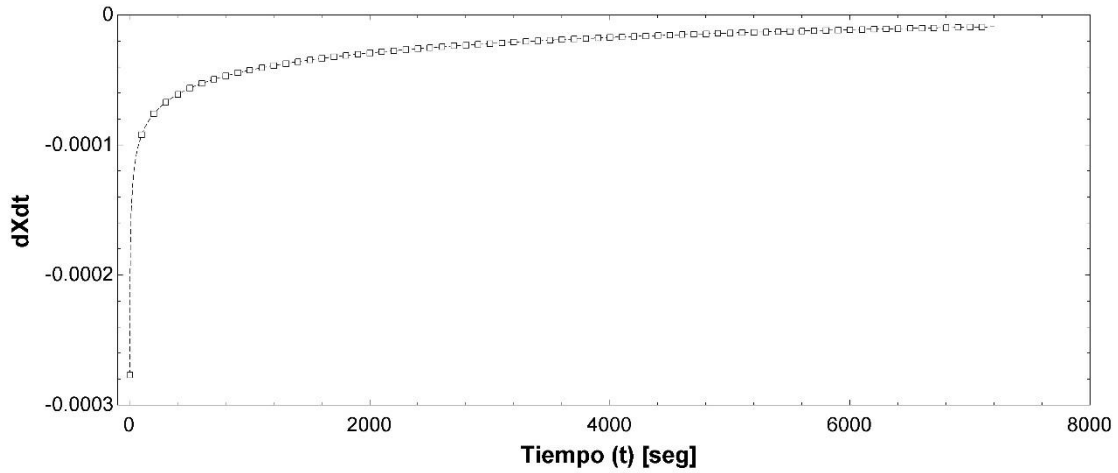


Figura 5.42 Variación de  $dX/dt$  contra el tiempo en Chinandega.

Así mismo se logró calcular el cambio de  $dX/dt$  de -0.000009165 a -0.0002769 con respecto a la humedad en base seca de 13.5% a 33%. En la Figura 5.43 se observa la variación de  $dX/dt$  con respecto a la humedad base seca del maíz.

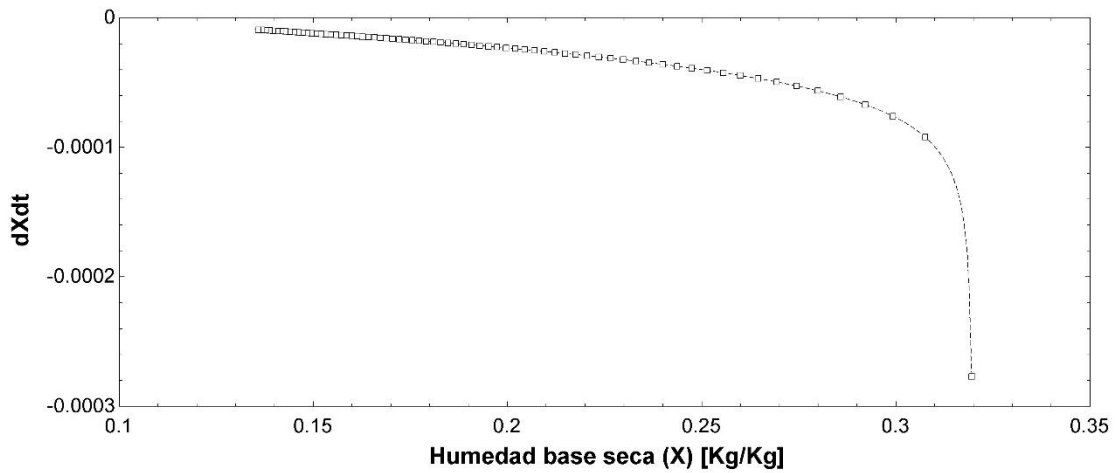


Figura 5.43 Variación de  $dX/dt$  contra humedad base seca del maíz en Chinandega.

Al comparar los datos obtenidos para las simulaciones para el secado del maíz en Jinotega (Condición adversa) con los datos de Chinandega (Condiciones favorables), se observa q las gráficas presentan un comportamiento similar. Sin embargo debido a que las condiciones de humedad relativa en el ambiente es menor y la temperatura es mayor para el departamento de Chinandega se observa que el tiempo de secado es mucho menor para alcanzar la misma humedad final.

El programa escrito en EES para la simulación del secado del maíz en el secador de lecho de chorro para el departamento de Jinotega y Chinandega se presenta en el Anexo H.



## **VI CONCLUSIONES**

De acuerdo a los resultados obtenidos y el análisis que se realizó se puede concluir lo siguiente:

La variación del diámetro promedio contra el porcentaje de humedad de base húmeda para todos los granos fue muy pequeña, comprobando que el porcentaje de humedad en los granos no influye apreciablemente el diámetro promedio de estos.

La variación de la esfericidad contra el porcentaje de humedad de base húmeda para todos los granos fue muy pequeña, comprobando que el porcentaje de humedad en los granos no influye apreciablemente la esfericidad de estos.

La variación de la densidad contra el porcentaje de humedad de base húmeda para todos los granos fue baja, comprobando que el porcentaje de humedad en los granos no influye apreciablemente la densidad de estos.

En el caso del lecho fluidizado con el distribuidor de aire de plato perforado, debido a que este se comporta similar al lecho de chorro y que ofrece una caída de presión adicional, se concluyó que este no era adecuado para distribuir el flujo de aire homogéneamente en la torre.

En el caso del lecho fluidizado con el distribuidor de aire de plato perforado y lecho fijo partículas inertes, se requiere más potencia del ventilador para alcanzar el régimen de fluidización.

Aunque en la columna de lecho fluidizado no se alcanzó la fluidización con ninguno de los granos, la gráfica de la variación de la caída de presión contra la velocidad superficial del aire del arroz (Figura 5.20), presentó una ligera curvatura, lo cual indica que presentaba tendencia a la fluidización.

Tal como se menciona en la Sección 3.3.2 se ha logrado comprobar mediante los experimentos llevados a cabo en esta tesis que para los cereales (partículas de Geldart D) se obtiene una mejor fluidización en un lecho de chorro que en un lecho fluidizado.

## VII RECOMENDACIONES

De los dos modelos de secadores estudiados se recomienda únicamente el uso del secador de lecho de chorro para el sacado de los granos de sorgo, frijol, arroz y maíz, ya que en este modelo se consiguió una fluidización completa de acuerdo a los regímenes de fluidización presentados en la literatura. No se recomienda el uso del secador de lecho fluidizado convencional ya que requiere mayores velocidad de aire para alcanzar la fluidización de partículas de Geldart tipo D, tales como los granos básicos que se estudiaron. Esto a su vez se corresponde con la información obtenida de la bibliografía en relación al manejo de partículas del tipo D y granos en general.

Si se desea medir las dimensiones de otros granos usando el software Grainscan se recomienda colocar encima del vidrio una caja con un fondo de color diferente al del grano, de esta forma se reducen las posibilidades de que la forma del grano no sea interpretada correctamente. Así mismo se recomienda escanear las muestras en una resolución de entre 96dpi y 150dpi para reducir el costo computacional.

Al medir la densidad se recomienda verter el líquido y la muestra lentamente, debido a que es muy fácil que se formen burbujas dentro del aparato que induzcan un error en la medición. En caso de formarse burbujas se recomienda girar el aparato hasta que hayan salido todas por la tapa superior y luego introducir cuidadosamente la muestra.

En cuanto a los estudios de fluidización, se recomienda el diseño de equipos con diámetros de columna menores al utilizado en este trabajo siempre que se respete el criterio de  $D/d_p > 15$ , de esa forma se pueden alcanzar mayores alturas de lecho y velocidades de operación más altas utilizando los mismos ventiladores con los que se cuenta.

Al hacer una modelación para el diseño de un equipo para el secado de estos granos, debido a la baja dependencia de las propiedades físicas de estos con respecto a la humedad se recomienda usar los valores promedios de dichas propiedades.

Se propone desarrollar trabajos futuros para estos cuatro granos básicos ya que se ha comprobado que no existe suficiente información de propiedades de secado como curvas características de secado y de equilibrio a las condiciones que se trabaja ambientalmente en el país. Hacer experimentos de secado en una columna de lecho de chorro de vidrio que admita aire caliente para comprobar el modelo matemático utilizado en este trabajo.

En cuanto a la simulación se recomienda, realizar como futuros trabajos de obtención de las curvas características de secado y curvas de equilibrio, para complementar la base de datos presentada en este trabajo, con las propiedades termodinámicas de los granos de mayor consumo en el país.

## VIII NOMENCLATURA

$A_1$	Área transversal de la manguera de goma traslúcida	$m^2$
$A_2$	Área transversal de la columna de fluidización	$m^2$
$Ar$	Número de Arquímedes	adim
$A_s$	Área transversal al chorro	$m^2$
$a_w$	Actividad del agua	adim
$b$	Constante perteneciente a la Ecuación 3.15	adim
$B$	Parámetro de ajuste para la Ecuación 3.16	adim
$C, C_1, C_2$	Constantes	adim
$C_p$	Calor específico	$Jkg^{-1}K^{-1}$
$d_p$	Tamaño medio de partícula en una mezcla	m
$d'_p$	Dimensión característica de la partícula	m
$\bar{d}_p$	Diámetro promedio equivalente de las partículas	m
$D$	Diámetro de la columna	m
$d_{bb}$	Diámetro de la burbuja	m
$D_c$	Diámetro interno de la columna	m
$D_i$	Diámetro de la entrada del gas	m
$D_s$	Diámetro promedio del chorro	m
$e$	Espesor de la partícula	m
$G$	Flujo de aire en base seca por unidad de volumen del lecho	$m^3/m^3s$
$g$	Aceleración de la gravedad	$9.80665 m/s^2$
$H_c$	Altura de la base cónica	m
$H_f$	Altura de la fuente	m
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección	$W/m^2K$
$H_{max}$	Altura máxima del lecho	m
$\Delta H_{vap}$	Entalpía de vaporización del agua	$kJ/K$
$h_{\Omega}$	coeficiente de transferencia combinado para las paredes externas del secador	$KJ/s-K$
$K, K_1, K_2$	Constante	adim

$l$	Longitud de la partícula	m
$L$	Altura del lecho	m
$\dot{m}$	Flujo másico de aire seco	Kg/s
$m_1$	Masa del recipiente será pesado vacío	kg
$m_2$	Masa del recipiente con agua	kg
$m_3$	Masa del recipiente con granos	kg
$m_4$	Masa del recipiente con los granos y el agua	kg
$M_{dry}$	Masa seca de los granos	Kg
$m_{grano}$	masa de una cantidad de granos previamente pesada	kg
$m_{prob}$	Masa de la probeta	kg
$P_f$	Peso de la muestra después del secado	Kg
$p_i$	Peso de la muestra antes del secado	Kg
$\Delta P_M$	Caída de presión máxima	kPa
$\Delta P_S$	Caída de presión constante	kPa
$Re$	Número de Reynolds	adim
$t$	tiempo	s
$T$	Temperatura	K
$T_{ag}$	Temperatura del gas en el anulo	K
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	K
$T_{g,in}$	Temperatura de entrada del aire	K
$T_{sg}$	Temperatura del gas en el chorro	K
$T_{sys}$	Temperatura dentro del sistema	K
$U$	velocidad superficial de fluidización	m/s
$U_B$	Velocidad de la burbuja	m/s
$U_c$	Velocidad de transición entre los regímenes de fluidización burbujeante y turbulento	m/s
$U_{eg}$	Velocidad de escape del aire del chorro hacia el ánulo	m/s
$U_i$	Velocidad superficial del gas en la entrada, basada en la Sección transversal de parte superior de la columna	m/s
$U_k$	Velocidad de transición entre los regímenes regímenes de fluidización burbujeante y turbulento	m/s
$U_M$	Velocidad máxima del gas	m/s

$U_{mb}$	Velocidad mínima de burbujeo	m/s
$U_{mf}$	Velocidad mínima de fluidización	m/s
$U_{ms}$	Velocidad mínima de chorro	m/s
$U_{msl}$	Velocidad mínima de taponado	m/s
$U_t$	Velocidad terminal de una partícula	m/s
$U_t^*$	Velocidad terminal adimensional de la partícula	adim
$V$	Volumen	$m^3$
$V_1$	Velocidad de flujo de aire medida con el medidor de flujo	m/s
$V_2$	Velocidad promedio del aire en la columna de fluidización	m/s
$V_b$	Volumen del gas en la fase de burbujas	$m^3$
$V_{desp}$	Volumen desplazado por los granos	$m^3$
$V_{ev}$	Volumen de espacios vacíos	$m^3$
$V_{lecho}$	Volumen del lecho	$m^3$
$w$	Ancho de la partícula	m
$X_{cr1}$	primer valor de humedad crítica	kg/kg
$X_{cr2}$	Segundo valor de humedad crítica	kg/kg
$X_{eq}$	Valor de humedad de equilibrio	kg/kg
$X$	Contenido de humedad del sólido	kg de agua/kg de sólido seco
$X(\%)$	Contenido de humedad en porcentaje	%
$X^*$	Contenido de humedad de equilibrio en la base seca	kg de agua/kg de sólido seco
$X'$	Humedad adimensional del sólido	adim
$\bar{X}$	Contenido promedio de humedad en la fase densa	kg de agua/kg de sólido seco
$Y$	Humedad absoluta del aire	kg de agua/kg de aire seco
$Y_{in}$	Humedad de entrada del aire	kg de agua/kg de aire seco
$Y_{out}$	Humedad de salida del aire	kg de agua/kg de aire seco
$Y_s$	Humedad del aire en la región del chorro	kg de agua/kg de aire seco
$Y_{sys}$	Humedad del aire en el sistema	kg de agua/kg de aire seco
$Z$	Posición vertical con respecto a la entrada del gas	m

### Letras griegas

$\alpha$		0.005-0.01 K <sup>-1</sup>
$\gamma$	Angulo de la base cónica	grados
$\varepsilon$	Porosidad del lecho	adim
$\varepsilon_{bb}$	Fracción de burbujas en el lecho	adim
$\varepsilon_{mf}$	Porosidad del lecho a la velocidad mínima de fluidización	adim
$\varepsilon_s$	Porosidad en la región del chorro	adim
$\theta$	Coordenada polar; incluida en el ángulo de la burbuja; o la mitad-ángulo del chorro	grados
$\mu$	Viscosidad dinámica del fluido	Pa-s
$\rho_a$	Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	Densidad del gas	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_m$	Densidad de la mezcla aire-vapor de agua	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_p$	Densidad de la partícula	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{ss}$	Densidad de sólido seco	kg/m <sup>3</sup>
$\phi$	Esfericidad de la Partícula	adim

### Subíndices

a	Región del ánulo
air	aire
d	En o para la fase densa
s	Región del chorro
g	De la fase gaseosa
z	A la altura z
IN	A la entrada del equipo
OUT	A la salida

## IX BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, I. (2008). *Reviviendo a ENABAS. El Observador Económico*. Recuperado de <http://www.elobservadoreconomico.com/articulo/585> el 10/10/15.
- ANAR. (s.f.). *¿Que es el arroz?* . Recuperado de [www.anar.com.ni/arroz/que-es-el-arroz](http://www.anar.com.ni/arroz/que-es-el-arroz) el 05/10/15.
- Ateres, L. (2015). *Determinación de Porosidad*. Universidad Politecnica de Valencia. Recuperado de <https://riunet.upv.es/handle/10251/52102> el 11/10/15.
- Bakalis, S., Knoerzer, K. & Fryer, P. J. (2015) *Modeling Food Processing Operations*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition.
- Barreira, V. (2007). *Estudio Hidrodinámico de un Lecho Fluidizado*. (Ingeniería Industrial ), Universidad Carlos III de Madrid, España. Recuperado de [http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/1161/pfc\\_lecho\\_fluidizado.pdf?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/1161/pfc_lecho_fluidizado.pdf?sequence=1) el 10/10/15.
- Becker, H.A. (1961). *An investigation of laws governing the spouting of coarse particles*. Chemical Engineering Science, 13(4), 245-262. doi: 10.1016/0009-2509(61)80021-3.
- Białobrzewski I., Zielinska, M., Mujumdar, A.S. & Markowski, M. (2008). *Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier*. Elsevier, International Journal of Heat and Mass Transfer. 50, 4704-4716. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031.
- Bonner, I. J. & Kenney, K. L. (2013). *Moisture Sorption Characteristics and Modeling of Energy Sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench)*. Journal of Stored Products Research, 52, 128–136. doi:10.1016/j.jspr.2012.11.002.
- Bravo y Canales (1 de Octubre 2015). *Frijol Negro se Hunde. La Prensa*. Recuperado de: <http://www.laprensa.com.ni/2015/10/01/economia/1911026-frijol-negro-se-hunde>.
- Campos, E.G & Carranza, L.A. (2015). *Producción y Comercialización de Sorgo en Nicaragua*. Tesis de grado de Licenciatura en Economía Agrícola. Universidad Nacional Autónoma. Managua, Nicaragua.
- Carlén, M. (1994). *Drying Rice in a Moving Bed Dryer with Control Air Distribution*. Tesis de MSc en Ingeniería Química, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Catipovic, N. M., Jovanovic, G. N. & Fitzgerald, T. J. (1978). *Regimes of fluidization for large particles*. AIChE Journal, 24(3), 543-547. doi: 10.1002/aic.690240324.
- CETREX (s.f.). *Exportaciones Autorizadas de los 20 Principales Productos, Periodo: 2000-2015*. Recuperado de <http://www.cetrex.gob.ni/website/servicios/princproductos.jsp>. 29/09/2016.
- Chakraverty, A., Mujumdar, A. S., Raghavan, G. S. & Ramaswamy, H. S. (2003). *Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices*: CRC Press.
- Coumans W. J. (1999). *Models for drying kinetics based on drying curves of slabs*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 39(1), 53–68. doi: 10.1016/S0255-2701(99)00084-7.

- Daud, W. R. W. (2008). *Fluidized Bed Dryers — Recent Advances*. *Advanced Powder Technology*, 19(5), 403-418. doi: 10.1016/S0921-8831(08)60909-7.
- Di Felice, R., & Gibilaro, L. G. (2004). *Wall effects for the pressure drop in fixed beds*. *Chemical Engineering Science*, 59(14), 3037-3040. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2004.03.030>.
- Dotto, G. L., Souza, V. C., & Pint, L. A. (2011). *Drying of chitosan in a spouted bed: The influences of temperature and equipment geometry in powder quality*. *Food Science and Technology*, 44(8), 1786–1792. doi:10.1016/j.lwt.2011.03.019.
- Doymaz, I. & Pala, M (2003). *The Thin-Layer Drying Characteristics of Corn*. *Journal of Food Engineering*, 60(2), 125-130. doi: 10.1016/S0260-8774(03)00025-6.
- Dunstan, E.R., Chung, D.S. & Hodges, T.O. (1973) *Adsorption and desorption characteristics of grain sorghum*. *Transactions of the ASAE*, 16 (4). 667-670. doi: 10.13031/2013.37598.
- Enabas. (sf) Recuperado de [www.enabas.gob.ni/enabas](http://www.enabas.gob.ni/enabas) 20/10/15.
- Epstein, N., & Grace, J. R. (2010). *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*: Cambridge University Press.
- Escudero, D. (2010). *Bed height and material density effects on fluidized bed*. *Bed height and material density effects on fluidized bed*. *Chemical Engineering Science*, 66(16), 3648-3655. Doi: 10.1016/j.ces.2011.04.036.
- FAO (1993). *Manual de manejo post-cosecha de granos a nivel rural*. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S05.htm>.
- FAO (2001). *El maíz en los trópicos*. Recuperado de: [www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s07.htm](http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s07.htm).
- FAO (2012). *Análisis de la cadena de valor de frijol rojo y negro en Nicaragua con enfoque en Seguridad Alimentaria y Nutricional*. Recuperado de [https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/14/13540579183450/libro\\_frijol\\_30-07-2012-2.pdf](https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/14/13540579183450/libro_frijol_30-07-2012-2.pdf).
- Fernandez, J. O. (2001). *Estudio de la Cinética del Proceso de Secado de Granos por Contacto en un Lecho Agitado*, Tesis de BSc en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.
- Floripe, R. M. M. (1998). *Determinación de las Isotermas de equilibrio para los Granos de Maíz, Sorgo y Nim*. Tesis de BSc en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.
- Fogler, S. H. (2006). *Elements of Chemical Reaction Engineering (4<sup>th</sup> ed )*. Prentice-Hall International Edition.
- Fujita A., Borges K., Correia R., Gombossy, B. D. & Genovese, M. I. (2013). *Impact of Spouted Bed Drying on Bioactive Compounds, Antimicrobial and Antioxidant Activities of Commercial Frozen Pulp of Camu-Camu (Myrciaria dubia Mc. Vaugh)*. *Food Research International*, 54(1), 495–500. doi:10.1016/j.foodres.2013.07.025.



Gamero, R. (1993). *Evaluación experimental de algunos parámetros que influyen en el proceso de secado de granos por contacto en un medio particulado caliente*. Tesis de BSc en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua.

Ghalavand, Y. , Rahimi, A. & Hatamipour, M.S. (2012). *Experimental Study and Mathematical Modeling of Green Pea Drying in a Spouted Bed*. *Drying Technology: An International Journal*, 30:2, 128-137. DOI: 10.1080/07373937.2011.624286.

Ghodsvali, A. (2012). *Effect of moisture content on some physical properties of white maize seeds*. Recuperado de [www.sciencedirect.com/.../pii/S0189724115300072](http://www.sciencedirect.com/.../pii/S0189724115300072) ek 7/11/15.

Gómez, O. (2009). *Producción Agrícola en Nicaragua es 18% de PIB, El Nuevo Diario*. Recuperado de [www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/60456/](http://www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/60456/) el 15/11/15.

Gupta, C. K., & Sathiyamoorthy, D. (1998). *Fluid Bed Technology in Materials Processing*: Taylor & Francis.

Haider, A and Levenspiel, O. (1989). *Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles*. *Powder Technology*. 58(1), 63-70. doi:10.1016/0032-5910(89)80008-7.

Hajidavalloo, E. (1998). *Hydrodynamic and Thermal Analysis of a Fluidized Bed Drying System*. (Phd), DalTech. Recuperado de [https://books.google.com/books?id=xx\\_oSgAACAAJ](https://books.google.com/books?id=xx_oSgAACAAJ) 7/10/15.

He, Y. L., Qin, S. Z., Lim, C. J. & Grace, J. R (1994). *Particle Velocity Profiles and Solid Flow Patterns in Spouted Beds*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 72(4), 561-568. Doi:10.1002/cjce.5450720402.

He, Y.L., Lim, C.J. & Grace, J.R. (1997) *Scale-up studies of spouted beds*. *Chemical Engineering Science*. 52(2), 329-339. doi:10.1016/S0009-2509(96)00378-8.

Heldman, D. R. (2003). *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*: Taylor & Francis.

Iglesias, H. (2012). *Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters For Food And Food Components*: Elsevier Science.

INETER. (2005a). *Comportamiento de HR Media Julio*. Recuperado de [https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/mapas/Nicaragua/clima/atlas/Humedad%20Relativa/HR\\_media\\_Julio.jpg](https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/mapas/Nicaragua/clima/atlas/Humedad%20Relativa/HR_media_Julio.jpg). 15/01/2020.

INETER. (2005b). *Comportamiento de HR Media Abril*. Recuperado de [https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/mapas/Nicaragua/clima/atlas/Humedad%20Relativa/HR\\_media\\_Abril.jpg](https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/mapas/Nicaragua/clima/atlas/Humedad%20Relativa/HR_media_Abril.jpg). 5/2/2020.

INIDE. (2011). *Anuario Estadístico 2011*. Recuperado de <http://www.inide.gob.ni/bibliovirtual/anuarios/ANUARIO11/anuario11.html>. 05/11/15.

INIDE. (2012). *Anuario Estadístico 2012*. Recuperado de <http://www.inide.gob.ni/Anuarios/Anuario%202012.pdf> 08/09/16.

INTA. (2009a). *Guia tecnologia (Cultivo del sorgo)*. Recuperado de <http://www.magfor.gob.ni> 05/11/15.

INTA. (2009b). *Guia tecnologica (Cultivo de Arroz)*. Recuperado de <http://www.magfor.gob.ni> 05/11/15.

INTA. (2009c). *Guia tecnologica (Cultivo de maiz)*. Recuperado de <http://www.magfor.gob.ni> 05/11/15.

INTA. (2009d). *Guia tecnologica (Cultivo del frijol)*. Recuperado de <http://www.magfor.gob.ni> 28/09/15.

INTA. (2012a). *Guia Tecnologica del Cultivo del Arroz*. Recuperado de <http://www.inta.gob.ni/biblioteca/images/pdf/guias/Guia%20Tecnica%20de%20ARROZ%202012.pdf> 02/10/16.

INTA. (2013a). *Variedad Mejorada Sorgo INTA-Forrajero*. Recuperado de <http://www.inta.gob.ni/biblioteca/images/pdf/plegables/Brochure%20Sorgo%20INTA-Forrajero%202013.pdf> 28/02/15.

INTA. (2013b). *Variedad de Frijol INTA-Rojo*. Recuperado de <http://www.inta.gob.ni/biblioteca/images/pdf/plegables/Brochure%20Frijol%20INTA%20Rojo%202013.pdf> 05/10/16.

Jittanit, W., Srzednicki, G. & Driscoll, R. (2010). *Seed Drying in Fluidized and Spouted Bed Dryers*. *Drying Technology*, 28(10), 1213-1219. doi: 10.1080/07373937.2010.483048.

Kemp I. C., Fyhr, B. C., Laurent, S., Roques, M. A., Groenewold, C. E., Tsotsas, E., Serano, A. A. Bonazzi C. B., Bimbenet, J. J. & Kind, M. (2001). *Methods for Processing Experimental Drying Kinetics Data*. *Drying Technology*, 19(1), 15-34, doi: 10.1081/DRT-100001350.

Khanali, M., Rafiee, Sh., Jafari, A., Hashemabadi, S. H. & Banisharif, A. (2012). *Mathematical Modeling of Fluidized Bed Drying of Rough Rice (Oryza sativa L.) grain*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Alireza\\_Banisharif/publication/235897712\\_Mathematical\\_modeling\\_of\\_fluidized\\_bed\\_drying\\_of\\_rough\\_rice\\_Oryza\\_sativa\\_L\\_grain/links/0c960518e9426b2f13000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alireza_Banisharif/publication/235897712_Mathematical_modeling_of_fluidized_bed_drying_of_rough_rice_Oryza_sativa_L_grain/links/0c960518e9426b2f13000000.pdf) 21/11/15.

Khazaei, N. & Jouki, M. (2012). *Some Physical Properties of Rice Seed (Oryza sativa)*. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*.

Kiani Deh Kiani<sup>1</sup>, Minaei<sup>1</sup>, S., Maghsoudi<sup>1</sup>, H., & Ghasemi Varnamkhasti, M. (2008). *Moisture dependent physical properties of red bean (Phaseolus vulgaris L.) grains*. *International Agrophysics* 22(3), 231-237. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/26552046\\_Moisture\\_dependent\\_physical\\_properties\\_of\\_red\\_bean\\_Phaseolus\\_vulgaris\\_L\\_grains](https://www.researchgate.net/publication/26552046_Moisture_dependent_physical_properties_of_red_bean_Phaseolus_vulgaris_L_grains). 23/09/2016.

Kunii, D., & Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*: Butterworth-Heinemann.

- Lagerstedt, J. & Nyman, T. (1997). *Drying of Ground Neem Seeds in Fluidised Bed Dryers in Nicaragua*. (Master in Sciences), Royal Institute of Technology, Nicaragua.
- Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2006). *Fluidized Bed Dryers*. En A. S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying* (3ra ed.): Taylor & Francis.
- Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2014). *Fluidized Bed Dryers*. En A. S. Mujumdar (Ed). *Handbook of Industrial Drying* (4<sup>th</sup>): Taylor & Francis.
- Levenspiel, O. & López, J. C. (1993). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*: Reverté.
- Liu, X., Shao, Y., Zhong, W., Grace, J., Epstein, N. & Jin, B. (2013). *Prediction of minimum spouting velocity by CFD-TFM: Approach development*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 91.DOI: 10.1002/cjce.21865
- López, E. (2006). *Secado de café en lecho fluidizado*. *Universidad nacional de Colombia, Colombia*. Recuperado de [http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326102\\_05/01/16](http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64326102_05/01/16).
- Mathur, K. B. & Epstein N. (1974) *Spouted beds*. Vacouver, Canada. Academic Press, Inc.
- McCabe, W; Smith, J & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7ma ed.). McGraw Hill.
- Michailidis, P.A., Krokida, m.k., Bisharat, G.I., Marinos-Kouris, D & Shafiur, M. (2009). *Measurement of Density, Shrinkage, and Porosity*. En Shafiur, M. (Ed). *Food Properties Hamdbook* (2<sup>nd</sup>): Taylor & Francis.
- MIFIC. (2015). *Informe Anual Comercio Exterior de Nicaragua 2015*. Recuperado de <http://www.mific.gob.ni/Portals/0/Documentos%20Politica%20Comercial/Boletines/Informe%20Anual%202015%20Rev2.pdf>. 30/09/2016.
- Moline, C., Marchelli, F., Spanachi, N., Martínez, A., Bosio, B. & Arato, E. (2019). *CFD simulation of a Spouted Bed: comparison between the Discrete Element Method (DEM) and the Two Fluid Method (TFM)*. *Chemical Engineering Journal*. 377. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.164>
- Momenzadeh, L., Zomorodian, A. & Mowla, D. (2011). *Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using Artificial Neural Network*. *Food and Bioproducts Processing*. 89(1). DOI: 10.1016/j.fbp.2010.03.007
- Mori, S. & Wen, C.Y. (1975). *Estimation of Bubble Diameter in Gaseous Fluidized Beds*. *AIChE Journal*, 21(1), 109-115. doi:10.1002/aic.690210114:
- Mousa, W., Ghazali, F. M., Jinap, S., Ghazali, H. M. & Radu, S. (2014). *Sorption Isotherms and Isothermic Heats of Sorption of Malaysian Paddy*. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2656-2663. doi: 10.1007/s13197-012-0799-4.
- Mujumdar, A. S. (2011). *ME5202 Industrial Transfer Processes*. Recuperado de [http://www.arunmujumdar.com/file/Publications/books/ME5202\\_2011\\_Mujumdar.pdf](http://www.arunmujumdar.com/file/Publications/books/ME5202_2011_Mujumdar.pdf) 20/11/14.
- Ng, P. P., Law, C. L., Tasirin, S. M. & Daud, R. W. (2005). *Drying Characteristics of Malaysian Paddy: Kinetics & Grain Cracking Quality*. *Drying technology*, 23(12), 2447-2489. doi:10.1080/07373930500341724.

- Ng, P. P., Tasirin, S. M. & Law, C. L. (2006). *Thin Layer Method Analysis Of Spouted Bed Dried Malasyan Paddy-Characteristic Drying Curves*. Journal of Food Process Engineering, 29(4), 414–428. doi: 10.1111/j.1745-4530.2006.00068.x.
- Niksiar, A., Sohrabi, B. & Rahimi, A. (2013a). *Comparative Evaluation of Existing Correlations to Predict Spouted Bed Hydrodynamics*. Drying Technology, 31(9), 975-989. doi: 10.1080/07373937.2013.769450.
- Niksiar, A., Sohrabi, B. & Rahimi, A. (2013b). *A Model for the Dynamics of Spouted Bed Dryers*. Drying Technology: An International Journal, 31(3), 295-307, doi: 10.1080/07373937.2012.729768.
- Ohlsson, Y. (1994). *The Drying of Corn in a Moving Bed Column Dryer*. Tesis de MSc en Ingeniería Química, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Oakley, D (2004) *Spray Dryer Modeling in Theory and Practice*. Drying Technology, 22:6, 1371-1402. DOI: 10.1081/DRT-120038734.
- Olivares, I. (4 de Julio 2014). *Lanzan plan para impulsar producción nacional de sorgo*. Confidencial. Recuperado de: <http://confidencial.com.ni/archivos/articulo/18295/lanzan-plan-para-impulsar-produccion-nacional-de-sorgo>.
- Olowson, P. A., & Almstedt, A. E. (1991). *Influence of pressure on the minimum fluidization velocity*. Chemical Engineering Science. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(91\)80023-R](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(91)80023-R) 12/12/15.
- Passos, M. L., Mujumdar, A. S. & G. S: Raghavan (1989). *Spouted and Spout-Fluidized Beds for Fram Drying*. Drying. Drying Technology, 7(4), 663-696. doi: 10.1080/07373938908916621.
- Patel, Bridwater, Baker & Birmingham, (1985), *Spouting behaviour of wet solids*, Drying '86.
- Pell, M. (1990). *Handbook of Powder Technology* (vol. 8): Elsevier.
- Pereira, N. R., Godoi, F. C. & Rocha C: S: (2010). *Drying of Starch Suspension in Spouted Bed with Inert Particles: Physical and Thermal Analysis of Product*. . Drying Technology, 28(11), 1288-1296. doi: 10.1080/07373937.2010.49089.
- Poomsa-ad, N. & Wiset, L. (2013). *Effect of Moisture Content on Physical and Aerodynamic Properties of Sorghum*. Journal of medical and Bioengineering. Recuperado de <http://www.jomb.org/uploadfile/2014/0113/20140113051626891.pdf> 20/01/16.
- Rao, A., Curtis, J. S., Hancock, B. C. & Wassgren, C. (2010) *The Effect of Column Diameter and Bed Height on Minimum Fluidization Velocity*. AIChE Journal, 56(9), 2304-2311. doi: 10.1002/aic.12161.
- Rahman, M. S., & Ahmed, J. (2012). *Handbook of Food Process Design*: Wiley.
- Ramirez, M. R. (2003). *Reducción de muestras por el método del cuarteo*. Universidad de Sonora. Recuperado de <http://documentos.dicym.uson.mx/resp2008/acreditacion%20civil%202008/5.-%20proceso%20de%20ense%C3%B1anza%20aprendizaje/5.1/archivos%20en%20PDF/UNI-IT-CO-23%20CUARTEO%20DE%20AGREGADOS.pdf> 21/11/15.
- Rennie, T. J., Mercer, D. G. & Tubeileh, A. (2011). *Drying Characteristics of Forage Sorghum*. Recuperado de <http://www.csbe-scgab.ca/docs/meetings/2011/CSBE11512.pdf> 05/11/15.

- Rojas, A. F. (2010). *Caracterización Físico-Mecánica de la semilla de Vitabosa (Magister en Ciencia y Tecnología de los Alimentos)*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1855/1/87571797.2010.pdf> 17/11/15.
- Roman, M. G. (s.f). *Tecnología de cereales*. Artículo presentado en 2º Curso de Ciencias y Tecnología de los Alimentos.
- Sandino, N. (6 de Febrero 2016). *Cargill inaugura moderna planta secadora de sorgo en Chinandega. El 19 Digital*. Recupado de: <http://www.el19digital.com/articulos/ver/titulo:38577-cargill-inaugura-moderna-planta-secadora-de-sorgo-en-chinandega>.
- Samapundo, S., Devlieghere, F., Meukenaer, B., Atukwase, A., Lamboni, Y. & Debevere, J. H. (2006). *Sorption Isotherms and Isothermic Heats of Sorption of Whole Yellow Dent Corn*. Journal of Food Engineering, 79(1), 168–175. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.040.
- Schreil, M. G. A. (1996). *Dispersion and Transfer Coeficients in Moving Bed Dryers*. Tesis de MSc en Ingeniería Química, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Seville, J. P. K., U. Tuzun & R. Clift, (1997) . *Processing of Particulate Solids* (1<sup>st</sup> ed). Chapman & Hall.
- Smith, P. (2007). *Applications of Fluidization to Food Processing* (1<sup>st</sup> ed.): Wiley.
- Soponronnarit, S. & Prachayawarakorn, S. (1994) *Optimum Strategy for fluidized Bed Paddy Drying*. Drying Technology, 12(7), 1667-1686. doi: 10.1080/07373939408962192.
- Soponronnarit, S., Swasdisevi, T., Wetchacama, S., & Wutiwiwatchai, W. (2001). *Fluidised bed drying of soybeans*. Journal of Stored Products Research, 37(2), 133-151. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-474X\(00\)00015-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-474X(00)00015-1).
- Spreutels, L., Debaste, F., Legros, R., & Haut, B. (2013). *Experimental characterization and modeling of Baker's yeast pellet drying*. Food Research International, 52(1), 275–287. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.038>.
- Spreutels, L., Debaste, F., Legros, R., & Haut, B. (2014). *Conical spouted bed drying of Baker's yeast: Experimentation and multi-modeling*. Food Research International, 62, 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.027>.
- Strumillo, C. & Kudra, T. (1986) *Drying: Principles, Applications and desings*. Gordon and Breach Science Publisher.
- Sun, D. W. (2004). *Selection of emc/erh Isotherm Equations for Shelled Corn \_Based on Fitting to Available Data*. Drying Technology, 16(3-5), 779-797. doi: 10.1080/07373939808917435.
- Sutar, H., & Sahoo, A. (2011). *Effect of Distributor-Orifice on Drying Kinetics in a Fluidized Bed Drier*. International Journal of Chemical engineering and aplicaciones. Recuperado de <http://www.ijcea.org/papers/132-A635.pdf> 10/12/15.
- Szafran, R. & Kmiec, A. (2004). *CFD Modeling of Heat and Mass Transfer in a Spouted Bed Dryer*. Industrial & Engineering Chemistry Research. 43, 1113-1124. DOI: 10.1021/ie0305824.
- Szekely, J., & Poveromo, J. J. (1975). *Flow maldistribution in packed beds: A comparison of measurements with predictions*. AIChE Journal, 21(4), 769-775. doi: 10.1002/aic.690210419.

- Tester, J. W. & Modell, M. (1997) *Thermodynamics and its Applications* (3 ed). Prentice Hall PTR.
- Treybal, R. E (1988) *Operaciones de Transferencia de Masa* (2 ed). McGraw Hill.
- Valdivia, R. (s.f.). *Manual postcosecha para granos basicos*. Catholic Relief Services (CRS Nicaragua).
- Vázquez, L., & Vizcarra, M. (2008). *Secado por lecho fluidizado del trigo y su calidad*. Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, Mexico. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v7n2/v7n2a5.pdf> 05/11/15.
- Wormsbecker, M., Pugsley, T. S., & Tanfara, H. (2007). *The Influence of Distributor Design on Fluidized Bed Dryer Hydrodynamics*. Engineering Conferences International. Recuperado de [http://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1022&context=fluidization\\_xii](http://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1022&context=fluidization_xii) 05/11/15.
- Yang, W. (Ed.) (2003). *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. Marcel Dekker Incorporated.
- Zahed, A. H., & Epstein, N. (1992). *Batch and continuous spouted bed drying of cereal grains: The thermal equilibrium model*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 70(5), 945-953. doi: 10.1002/cjce.5450700517.
- Zahed, A. H., Zhu, J. X. & Grace, J. R. (1995). *Modelling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers*. Drying Technology, 13(1-2), 1-28. doi: 10.1080/07373939508916940.
- Zenz, F. A., (1968). *Bubble formation and grid design*. Institute of Chemical Engineering Symposium series., Ser. 30, 136-139.
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B. & Marinou-Kouris D., (1994). *Densities, Shrinkage and Porosity of some vegetables during air drying*. Drying Technology, 12:7, 1653-1666. DOI:10.1080/07373939408962191.

# Anexo

## Anexo A

### Método Gravimétrico

#### A.1 Método Gravimétrico o de la estufa.

Para determinar la humedad de los granos se somete una muestra de granos de peso conocido al secado y se calcula el porcentaje de humedad a través del peso que se pierde durante el secado. Para obtener el porcentaje de humedad se divide la pérdida de peso de la muestra entre el peso original de ella y el resultado se multiplica por 100 como se muestra en la Ecuación (A.1).

$$X(\%) = \frac{P_i - P_f}{P_f} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

$P_i$  = peso de la muestra antes del secado

$P_f$  = peso de la muestra después del secado

Con relación a la temperatura y tiempo de secado de las muestras existen diversos métodos cuyas referencias se encuentran en la bibliografía especializada. Los métodos se diferencian, sobre todo, en lo que concierne a la temperatura de la estufa, al período de secado y al estado físico de la muestra (granos enteros o molidos).

En el Brasil, el método oficial del Ministerio de Agricultura para la determinación de humedad en las semillas se basa en las Reglas Internacionales aprobadas por el ISTA (International Seed Testing Association). En este método se recomienda el secado de algunos granos a  $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  por un período de 17 horas, o a una temperatura de  $130^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  por un período de cuatro horas para el caso del maíz, dos horas para los demás cereales y una hora para otros granos. Las reglas internacionales especifican cuáles granos deben molerse. Para todas las especies de semillas, este Reglamento recomienda también el método de la estufa a  $105^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  por un período de 24 horas, sin moler el grano.

<http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S02.htm>

Recuperado el 23/11/17



## Anexo B

### Humedad y densidad promedio de los granos

Tabla B.1 Humedad y densidad promedio del sorgo

Tiempo min	Masa inicial x10 <sup>3</sup> kg	Masa final x10 <sup>3</sup> kg	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Volumen desplazado de agua x10 <sup>3</sup> lt	Masa de grano x10 <sup>3</sup> kg	Densidad x10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>3</sup>
0	15	13.50	9.977	8.3	10.01	1.201
7	15.01	12.61	15.989	8.4	9.98	1.19
14	15.03	12.36	17.723	8.4	10.02	1.193
21	15.00	12.18	18.795	7.9	9.95	1.254
30	14.99	12.02	19.791	7.7	10.06	1.307
60	15.01	11.79	21.408	7.8	10.03	1.291
90	15.05	11.52	23.411	7.6	9.97	1.311
120	15.06	11.24	25.343	7.6	9.99	1.308

Tabla B.2 Humedad y densidad promedio del Frijol

Tiempo min	Masa inicial x10 <sup>3</sup> kg	Masa final x10 <sup>3</sup> kg	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Volumen desplazado de agua x10 <sup>3</sup> lt	Masa de grano x10 <sup>3</sup> kg	Densidad x10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>3</sup>
0	15.03	13.30	11.532	8.3	10.03	1.214
30	15.04	12.54	16.599	8.9	9.96	1.116
60	15.05	11.88	21.041	8.9	10.00	1.119
90	15.04	10.87	27.7099	8.8	9.99	1.141
120	14.99	9.44	37.0292	8.6	10.02	1.161

Tabla B.3 Humedad y densidad promedio del Arroz

Tiempo min	Masa inicial $\times 10^3$ kg	Masa final $\times 10^3$ kg	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Volumen desplazado de agua $\times 10^3$ lt	Masa de grano $\times 10^3$ kg	Densidad $\times 10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup>
0	15.02	13.69	8.85	9.0	9.97	1.11
30	15.09	13.12	13.07	9.1	9.95	1.09
60	15.04	12.41	17.49	9.1	10.05	1.10
90	15.02	11.84	21.17	9.3	10.01	1.08
120	15.04	11.83	21.36	9.3	10.11	1.09
150	15.00	11.75	21.65	9.2	10.04	1.09
180	14.98	11.64	22.27	9.4	9.98	1.07
210	14.95	11.64	22.13	9.2	9.95	1.09

Tabla B.4 Humedad y densidad promedio del Maíz

Tiempo min	Masa inicial $\times 10^3$ kg	Masa final $\times 10^3$ kg	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Volumen desplazado de agua $\times 10^3$ lt	Masa de grano $\times 10^3$ kg	Densidad $\times 10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup>
0	15.03	13.26	11.817	7.1	10.07	1.412
30	15.06	12.65	16.042	7.3	10.05	1.387
60	15.01	12.24	18.437	7.7	10.00	1.299
90	15.04	11.9	20.895	7.5	9.99	1.332
120	15.02	11.66	22.353	7.5	9.92	1.317
150	15.02	11.25	25.094	7.8	10.02	1.280

## Anexo C

### Medición de las propiedades de los granos y error

Tabla C.1 Medición de las propiedades del Sorgo y cálculo de error

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	L_pro m	w_prom x10 <sup>-3</sup> m	e_prom x10 <sup>-3</sup> m	L_err	w_err	e_err	L_err_%	w_err_%	e_err_%	Dp_prom x10 <sup>-3</sup> m	Dp_err_%	Dp_err
0	9.80	4.2105	3.7639	2.47	0.5443	0.3856	0.2662	0.1292	0.1024	0.1078	3.3952	0.0656	0.2230
7	15.81	4.2032	3.6463	2.55	0.1074	0.5179	0.2250	0.0255	0.1420	0.0881	3.3948	0.0563	0.1913
14	17.79	4.1234	3.7577	3.08	0.0688	0.3138	0.3126	0.0167	0.0835	0.1014	3.6282	0.0441	0.1601
21	18.53	4.0895	3.6254	2.56	0.0839	0.4572	0.2601	0.0205	0.1261	0.1015	3.3611	0.0544	0.1828
30	18.96	4.2274	3.8152	2.59	0.0546	0.3483	0.2273	0.0129	0.0913	0.0879	3.4677	0.0424	0.1472
60	21.25	4.1997	3.6588	2.60	0.0557	0.5125	0.2489	0.0132	0.1400	0.0956	3.4193	0.0567	0.1939
90	22.56	4.3624	3.6955	2.65	0.0791	0.5202	0.2433	0.0181	0.1407	0.0919	3.4943	0.0563	0.1969
120	24.89	4.3433	3.7086	2.65	0.0918	0.5658	0.2596	0.0211	0.1525	0.0980	3.4942	0.0608	0.2126

Tabla C.2 Medición de las propiedades del Frijol y cálculo de error

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	L_prom x10 <sup>-3</sup> m	w_pro m x10 <sup>-3</sup> m	e_pro m x10 <sup>-3</sup> m	L_err	w_err	e_err	L_err_ %	w_err_ %	e_err_ %	Dp_prom x10 <sup>-3</sup> m	Dp_err_ %	Dp_err
0	11.53	11.4539	6.8400	4.6325	1.8436	0.6233	0.6404	0.1610	0.0911	0.1382	7.1330	0.0770	0.5490
30	16.60	11.6699	7.4533	5.3285	2.0303	1.1841	0.9054	0.1740	0.1589	0.1699	7.7388	0.0968	0.7493
60	21.04	12.1237	7.3926	5.5532	2.0536	1.2298	0.7029	0.1694	0.1664	0.1266	7.9249	0.0897	0.7107
90	27.71	12.3294	7.6046	5.6445	2.0960	0.9696	0.6894	0.1700	0.1275	0.1221	8.0887	0.0817	0.6609
120	37.03	12.4647	7.7756	5.9342	2.3507	0.9658	0.6190	0.1886	0.1242	0.1043	8.3162	0.0829	0.6895

Tabla C.3 Medición de las propiedades del Arroz y cálculo de error

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	L_pro m	w_pro m	e_pro m	L_err	w_err	e_err	L_err_%	w_err_%	e_err_%	Dp_prom x10 <sup>-3</sup> m	Dp_err_%	Dp_err
0	8.85	8.6199	2.6306	2.6306	0.8078	0.1885	0.1885	0.0937	0.0717	0.0717	3.9072	0.0460	0.1798
30	13.07	8.6690	2.6462	2.6462	0.3773	0.2053	0.2053	0.0435	0.0776	0.0776	3.9301	0.0393	0.1546
60	17.49	8.7812	2.7481	2.7481	0.3474	0.1244	0.1244	0.0396	0.0453	0.0453	4.0477	0.0251	0.1015
90	21.17	8.8987	2.6886	2.6886	0.2668	0.0804	0.0804	0.0300	0.0299	0.0299	4.0067	0.0173	0.0693
120	21.36	8.9127	2.6982	2.6982	0.2788	0.1046	0.1046	0.0313	0.0388	0.0388	4.0184	0.0210	0.0846
150	21.65	8.9045	2.6925	2.6925	0.3115	0.1171	0.1171	0.0350	0.0435	0.0435	4.0115	0.0236	0.0946
180	22.27	8.9230	2.6773	2.6773	0.3134	0.1173	0.1173	0.0351	0.0438	0.0438	3.9991	0.0237	0.0949
210	22.13	8.9073	2.6959	2.6959	0.3095	0.1247	0.1247	0.0348	0.0463	0.0463	4.0153	0.0247	0.0992

Tabla C.4 Medición de las propiedades del Maíz y cálculo de error

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	L_prom x10 <sup>-3</sup> m	w_prom x10 <sup>-3</sup> m	e_prom x10 <sup>-3</sup> m	L_err	w_err	e_err	L_err_%	w_err_%	e_err_%	Dp_prom x10 <sup>-3</sup> m	Dp_err_%	Dp_err
0	11.82	10.7209	9.0764	4.79	1.3356	1.0276	0.9939	0.1245	0.1132	0.2075	7.7526	0.0890	0.6906
30	16.04	11.2942	9.5346	4.92	1.4300	1.2511	0.9829	0.1266	0.1312	0.1998	8.0908	0.0901	0.7296
60	18.44	11.7164	9.7658	4.83	1.2182	0.8920	0.9988	0.1039	0.0913	0.2066	8.2086	0.0828	0.6804
90	20.89	11.3765	9.7913	4.87	1.3191	1.1013	0.8163	0.1159	0.1124	0.1676	8.1554	0.0776	0.6329
120	22.35	12.0701	10.0449	4.92	0.9356	0.9477	0.9092	0.0775	0.0943	0.1849	8.4153	0.0738	0.6217
150	25.09	12.1079	10.1573	4.9359	0.5834	0.5366	0.4733	0.0481	0.05282	0.0958	8.4672	0.0398	0.3376

## Anexo D

### Esfericidad de los granos

Tabla D.1 Esfericidad del sorgo

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Esfericidad adim
0	9.80	0.80642529
7	15.81	0.807623924
14	17.79	0.877502191
21	18.53	0.821845039
30	18.96	0.820270245
60	21.25	0.814173404
90	22.56	0.800939985
120	24.89	0.804513755

Tabla D.3 Esfericidad Maíz

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Esfericidad adim
0	11.8178164	0.72327544
30	16.0419787	0.71643356
60	18.4367667	0.7006345
90	20.895249	0.71759519
120	22.3528754	0.69721965
150	25.0941307	0.69929849

Tabla D.2 Esfericidad del Frijol

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Esfericidad adim
0	11.53	0.6227
30	16.60	0.6632
60	21.04	0.6537
90	27.71	0.6560
120	37.03	0.6672

Tabla D.4 Esfericidad del Arroz

Tiempo min	Porcentaje de humedad en base húmeda kg/kg	Esfericidad adim
0	8.85	0.4533
30	13.07	0.4533
60	17.49	0.4609
90	21.17	0.4503
120	21.36	0.4509
150	21.65	0.4505
180	22.27	0.4482
210	22.13	0.4508

## Anexo E

### Porosidad del lecho

Tabla E.1. Cálculo de la porosidad del lecho del sorgo (Humedad 24.9%)

Muestras	$m_1$ , kg	$m_2$ , kg	$m_3$ , kg	$m_4$ , kg	$V_{lecho}$ , (Ec 4.5) $m^3$	$\rho_{lecho}$ , (Ec 4.6) $kg/m^3$	$V_{ev}$ , (Ec 4.7) $m^3$	$\epsilon$ , (Ec 4.8) adim
Muestra 1	0.3115	0.7915	0.6911	0.8973	0.00048	788.46	0.00021	0.43
Muestra 2	0.3115	0.7915	0.6802	0.8863	0.00048	765.82	0.00021	0.43
Muestra 3	0.3115	0.7915	0.6891	0.8933	0.00048	784.31	0.00020	0.43
Promedio	0.3115	0.7915	0.6868	0.8923	0.00048	779.53	0.00021	0.43

Tabla E.2. Cálculo de la porosidad del lecho del frijol (Humedad 25.2%)

Muestras	$m_1$ , kg	$m_2$ , kg	$m_3$ , kg	$m_4$ , kg	$V_{lecho}$ , (Ec 4.5) $m^3$	$\rho_{lecho}$ , (Ec 4.6) $kg/m^3$	$V_{ev}$ , (Ec 4.7) $m^3$	$\epsilon$ , (Ec 4.8) adim
Muestra 1	0.3115	0.7915	0.6528	0.8522	0.00048	708.97	0.00020	0.42
Muestra 2	0.3115	0.7915	0.6624	0.8503	0.00048	728.92	0.00019	0.39
Muestra 3	0.3115	0.7915	0.6623	0.8502	0.00048	728.71	0.00019	0.39
Promedio	0.3115	0.7915	0.6592	0.8509	0.00048	722.20	0.00019	0.40



Tabla E.3. Cálculo de la porosidad del lecho del arroz (Humedad 20.0%)

Muestras	$m_1$ , kg	$m_2$ , kg	$m_3$ , kg	$m_4$ , kg	$V_{lecho}$ , (Ec 4.5) $m^3$	$\rho_{lecho}$ , (Ec 4.6) $kg/m^3$	$V_{ev}$ , (Ec 4.7) $m^3$	$\epsilon$ , (Ec 4.8) adim
Muestra 1	0.3115	0.7915	0.5818	0.8507	0.00048	561.49	0.00027	0.56
Muestra 2	0.3115	0.7915	0.5785	0.8315	0.00048	554.63	0.00025	0.53
Muestra 3	0.3115	0.7915	0.5835	0.8524	0.00048	565.02	0.00027	0.56
Promedio	0.3115	0.7915	0.5813	0.8449	0.00048	560.38	0.00026	0.55

Tabla E.4. Cálculo de la porosidad del lecho del maíz (Humedad 22.7%)

Muestras	$m_1$ , kg	$m_2$ , kg	$m_3$ , kg	$m_4$ , kg	$V_{lecho}$ , (Ec 4.5) $m^3$	$\rho_{lecho}$ , (Ec 4.6) $kg/m^3$	$V_{ev}$ , (Ec 4.7) $m^3$	$\epsilon$ , (Ec 4.8) adim
Muestra 1	0.3115	0.7915	0.3514	0.5611	0.00048	82.88	0.00021	0.44
Muestra 2	0.3115	0.7915	0.3519	0.5616	0.00048	83.92	0.00021	0.44
Muestra 3	0.3115	0.7915	0.3472	0.5569	0.00048	74.16	0.00021	0.44
Promedio	0.3115	0.7915	0.3502	0.5599	0.00048	80.32	0.00021	0.44

## Anexo F

### Experimentos lecho fluidizado

Tabla F.1 Corrida lecho fluidizado con cono relleno (Vacío)

Potencia Hz	Dp medido KN/m <sup>2</sup>	Velocidad medida m/s	Velocidad promedio, m/s	Velocidad en columna m/s	Comentarios
20	7.4	0.44	0.36	0.04	
30	15.8	0.74	0.61	0.07	
40	27.8	1.09	0.89	0.10	
50	42.7	1.44	1.18	0.13	
60	55	1.67	1.36	0.15	No se observó ningún movimiento en la muestra

Tabla F.2 Corrida lecho fluidizado con cono relleno con sorgo (lecho 3 cm)

Potencia Hz	Dp medido KN/m <sup>2</sup>	Dp columna KN/m <sup>2</sup>	Velocidad medida m/s	Velocidad promedio, m/s	Velocidad en columna m/s	Comentarios
20	7.9	1.26	0.4	0.33	0.04	
30	17	2.94	0.69	0.56	0.06	
40	29.9	4.45	1.03	0.84	0.09	
50	45.3	7.38	1.33	1.09	0.12	
60	56.2	8.71	1.53	1.25	0.14	Se observa leve burbujeo en la zona del centro y alrededores

Tabla F.3 Corrida lecho fluidizado con cono relleno con frijol (lecho 3 cm)

Potencia Hz	Dp medido KN/m <sup>2</sup>	Dp columna KN/m <sup>2</sup>	Velocidad medida m/s	Velocidad promedio, m/s	Velocidad en columna m/s	Comentarios
20	7.8	2.02	0.36	0.29412	0.0327	
30	16.9	5.10	0.61	0.49837	0.0554	
40	29.5	9.43	0.88	0.71896	0.0799	
50	45.6	19.00	1.06	0.86602	0.0962	
60	59.3	27.48	1.19	0.97223	0.1080	

Tabla F.4 Corrida lecho fluidizado con cono relleno con arroz (lecho 3 cm)

Potencia Hz	Dp medido KN/m <sup>2</sup>	Dp columna KN/m <sup>2</sup>	Velocidad medida m/s	Velocidad promedio, m/s	Velocidad en columna m/s	Comentarios
20	7.4	2.44	0.3	0.2613	0.0290	
30	16.9	7.12	0.5	0.4355	0.0484	
40	29.9	14.16	0.7	0.6097	0.0677	
50	45.2	22.73	0.89	0.77519	0.0861	Se ven canalizaciones en las zonas cercanas a la pared
60	56.2	25.54	1.09	0.94939	0.1055	hay una ligera expansión del lecho y las canalizaciones continúan

Tabla F.5 Corrida lecho fluidizado con cono relleno con maíz (lecho 3 cm)

Potencia Hz	Dp medido KN/m <sup>2</sup>	Dp columna KN/m <sup>2</sup>	Velocidad medida m/s	Velocidad promedio , m/s	Velocidad en columna m/s	Comentarios
20	5.6	-1.48	0.42	0.34	0.04	
30	13.6	-1.35	0.72	0.59	0.07	
40	26.3	0.85	1.03	0.85	0.09	
50	40.5	2.58	1.33	1.09	0.12	
60	53.7	8.70	1.48	1.21	0.13	No se observo ningun movimiento en la muestra

## **Anexo G**

### **Experimentos lecho de chorro**

Este Anexo se presenta únicamente en forma digital debido a que contiene muchas tablas y gráficos. En este Anexo se muestran los resultados para los experimentos del lecho de chorro de: caídas de presión en el lecho y las velocidades medidas, así como la velocidad superficial del aire en la columna y la altura de la fuente observada para los distintos lechos.

## Anexo H

### Simulación del secado de maíz en un lecho de chorro para el departamento de Jinotega

"Modelo de nivel 1 para simulación de secado en lecho de chorro para el maíz a 25% de humedad base húmeda, usando aire a 40°C en temporada lluviosa en el departamento de Jinotega, Nicaragua con una humedad relativa de 85% a 24°C de temperatura ambiente"  
\$UnitSystem SI Mass Deg kPa KJ K

"Se desea reducir la humedad base seca del grano de maíz desde 33% hasta 13.6% que corresponde a un 12% de humedad base húmeda tal como se recomienda en la tabla 3.1"

#### !"Condiciones iniciales y de entrada"

Temp\_in= 313.15 [K] "Temperatura de entrada del gas"  
T\_p0= 290[K] "Temperatura inicial de las partículas"  
m= 1.5 [kg] "masa del lecho de 14cm de maíz"  
m\_dry=m/(1+X\_0) "masa de sólido seco"  
X\_0 = 0.33 [kg/kg] "correspondiente a 25% de humedad base húmeda"  
hr=0.313 "<https://www.lenntech.com/calculators/humidity/relative-humidity.htm>"  
T\_amb=297 "Temperatura ambiente"  
Y\_in=0.01594 [kg/kg] "Humedad del aire a la entrada, 31.3%"  
Y\_sat= 0.048835 [kg/kg]  
m\_w= 18.01528 "peso molecular del agua"  
m\_a= 28.9647 "peso molecular del aire"

#### !"Propiedades relacionadas con el equipo"

U\_ms=1.134 [m/s] "velocidad mínima de chorro, obtenido experimentalmente"  
U\_w= 1.533 [m/s] "velocidad de operación"  
D\_c=0.15 [m] "Diámetro interno de la columna"  
D\_in=0.02 [m] "Diámetro de entrada"  
A\_in=PI\*((D\_in^2)/4) "Área de entrada al equipo"  
Q\_in=U\_in\*A\_in "Flujo volumétrico de Aire a la entrada del sistema"  
G\_in=Q\_in\*rho\_g "Flujo Másico a la entrada del sistema"  
A\_t\*U\_w=A\_in\*U\_in  
A\_t=PI\*((D\_c^2)/4)

$$h\_OMEGA=0.7*G\_in*Cp\_a$$

**"!Propiedades iterativas"**

cp\_w=CP(WATER,T=T\_sys,P=Po#) "calor específico del agua contenida en la partícula"

rho\_g=DENSITY(AIR,T=T\_sys,P=Po#)

DELTAH\_vap=ENTHALPY\_VAPORIZATION(WATER,T=T\_sys)

cp\_a=CP(AIRH2O,T=T\_sys,r=hr,P=Po#)

**"!Modelo cinético para el maíz, Ohlsson"**

$X = 0.08644249 + (0.3303079 - 0.08644249)/(1 + (t/10541.34)^{0.9384727})$

$dXd_t = -1364.43/((t^{0.938473} + 5961.81)^2 * t^{0.0615273})$

**"!Balance de calor en el secador, Spreutels et al 2014"**

$(Cp\_w*m\_dry*(1+X))*(dTsysdt)=G\_in*Cp\_a*(Temp\_in-T\_sys)-dXd_t*m\_dry*DELTAH\_vap + (h\_OMEGA*(T\_amb-T\_sys))$

**"!Balance de masa del gas en el secador, Spreutels et al 2014"**

$dXd_t=((Y\_in-Y\_sys)*G\_in)/(m\_dry)$

$T\_sys= T\_p0+INTEGRAL(dTsysdt,t,0.01,12200)$

$\$IntegralTable t:5,X,dXd_t,T\_sys,Y\_sys$

## Simulación del secado de maíz en un lecho de chorro para el departamento de Chinandega

"Modelo de nivel 1 para simulación de secado en lecho de chorro para el maíz a 25% de humedad base húmeda, usando aire a 40°C en temporada seca en el departamento de Chinandega, Nicaragua con una humedad relativa de 48% a 30°C de temperatura ambiente"

\$UnitSystem SI Mass Deg kPa KJ K

"Se desea reducir la humedad base seca del grano de maíz desde 33% hasta 13.6% que corresponde a un 12% de humedad base húmeda tal como se recomienda en la tabla 3.1"

### !"Condiciones iniciales y de entrada"

Temp\_in= 313.15 [K] "Temperatura de entrada del gas"

T\_p0= 300[K] "Temperatura inicial de las partículas"

m= 1.5 [kg] "masa del lecho de 14cm de maíz"

m\_dry=m/(1+X\_0) "masa de sólido seco"

X\_0 = 0.33 [kg/kg] "correspondiente a 33% de humedad base seca"

hr=0.257

"<https://www.lenntech.com/calculators/humidity/relative-humidity.htm>"

T\_amb=303 "Temperatura ambiente"

Y\_in=0.01309 [kg/kg] "Humedad del aire a la entrada, 31.3%"

Y\_sat= 0.048835 [kg/kg]

m\_w= 18.01528 "peso molecular del agua"

m\_a= 28.9647 "peso molecular del aire"

### !"Propiedades relacionadas con el equipo"

U\_ms=1.134 [m/s] "velocidad mínima de chorro, obtenido experimentalmente"

U\_w= 1.533 [m/s] "velocidad de operación"

D\_c=0.15 [m] "Diámetro interno de la columna"

D\_in=0.02 [m] "Diámetro de entrada"

A\_in=PI\*((D\_in^2)/4) "Área de entrada al equipo"



$Q_{in}=U_{in}*A_{in}$  "Flujo volumétrico de Aire a la entrada del sistema"

$G_{in}=Q_{in}*\rho_g$  "Flujo Másico a la entrada del sistema"

$A_t*U_w=A_{in}*U_{in}$

$A_t=PI*((D_c^2)/4)$

$h_{OMEGA}=0.7*G_{in}*Cp_a$

### "!Propiedades iterativas"

$cp_w=CP(WATER,T=T_{sys},P=Po\#)$  "calor específico del agua contenida en la partícula"

$\rho_g=DENSITY(AIR,T=T_{sys},P=Po\#)$

$DELTAH_{vap}=ENTHALPY\_VAPORIZATION(WATER,T=T_{sys})$

$cp_a=CP(AIRH2O,T=T_{sys},r=hr,P=Po\#)$

### "!Modelo cinético para el maíz, Momenzadeh et al 2011"

$X=0.0732295466300996+(0.319872286971293-0.0732295466300996)/(1+(t/79261370.7663657)^{0.772289302441839})^{1834.3475060596}$

$dXdt=-((0.00027731235121844)/((1 + 7.936686817087E-7*t^{0.772289302441839})^{1835.3475060596}*t^{0.227710697558161}))$

### "!Balance de calor en el secador, Spreutels et al 2014"

$(Cp_w*m_{dry}*(1+X))*(dTsysdt)=G_{in}*Cp_a*(Temp_{in}-T_{sys})-dXdt*m_{dry}*DELTAH_{vap} + (h_{OMEGA}*(T_{amb}-T_{sys}))$

### "!Balance de masa del gas en el secador, Spreutels et al 2014"

$dXdt=((Y_{in}-Y_{sys})*G_{in})/(m_{dry})$

$T_{sys}= T_{p0}+INTEGRAL(dTsysdt,t,1,7200)$

$\$IntegralTable t:1,X,dXdt,T_{sys},Y_{sys}$