



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS  
Y AMBIENTALES

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**

**“SECADO DE QUINUA *Chenopodium quinoa* (INIAP TUNKAHUAN) MEDIANTE  
LECHO FLUIDIZADO”**

**Tesis presentada como requisito para optar el Título en:**

**Ingeniero Agroindustrial**

**Autor:** Trujillo Vaca Hugo Enrique

**Director:** Dr. Ramón Cala Aiello PhD.

**IBARRA – ECUADOR**

**2017**

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

### ESCUELA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

#### “SECADO DE QUINUA *Chenopodium quinoa* (INIAP TUNKAHUAN) MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO”

Tesis revisada por los miembros del tribunal, por lo cual se autoriza su presentación como  
requisito parcial para obtener el título de:

#### INGENIERO AGROINDUSTRIAL

##### APROBADA:

Dr. Ramón Cala Aiello, PhD

**DIRECTOR DE TESIS**

Ing. Jimmy Cuarán.


**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Juan Carlos de la Vega, MSc

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Ing. Luis Armando Manosalvas

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**



FIRMA



FIRMA



FIRMA



FIRMA



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  
**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN**  
**A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

**IDENTIFICACION DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:



**DATOS DE CONTACTO**

<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100439430-8
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Trujillo Vaca Hugo Enrique
<b>DIRECCIÓN:</b>	Barrio Los Soles
<b>EMAIL:</b>	Truji_17@hotmail.es
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b> 0939214424

**DATOS DE LA OBRA**

<b>TÍTULO:</b>	<b>“SECADO DE QUINUA <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP TUNKAHUAN) MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO”</b>
----------------	---

<b>AUTOR:</b>	Trujillo Vaca Hugo Enrique
<b>FECHA:</b>	2017/01/30

**SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO**

<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO	<input type="checkbox"/> POSTGRADO
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Agroindustrial	
<b>ASESOR / DIRECTOR:</b>	Dr. Ramón Cala PhD	



## AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Hugo Enrique Trujillo Vaca, con cédula de identidad número 100439430-8, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

### CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 días del mes de enero de 2017

### EL AUTOR:



Trujillo Vaca Hugo-Enrique



## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, Hugo Enrique Trujillo Vaca, con cédula de identidad Nro. 100439430-8, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: **“SECADO DE QUINUA *Chenopodium quinoa* (INIAP TUNKAHUAN) MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO”**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERO AGROINDUSTRIAL** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 30 días del mes de enero de 2017

  
Trujillo Vaca Hugo Enrique

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Trujillo Vaca Hugo Enrique, bajo mi supervisión.



---

Dr. Ramón Cala PhD  
DIRECTOR DE TESIS

## DECLARACIÓN

Manifiesto que la presente obra es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros; por lo tanto, es original y que soy el titular de los derechos patrimoniales; por lo que asumo la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldré en defensa de la Universidad Técnica del Norte en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 30 días del mes de enero de 2017



---

Trujillo Vaca Hugo-Enrique

## **DEDICATORIA**

La vida está llena de sueños, metas y objetivos por cumplir y que grato es saber que cuentas con el apoyo de personas que contribuyen a alcanzarlo. Este trabajo se lo dedico a Dios por ser la luz que ilumina mi vida, por haberme ayudado a tomar cada decisión que me permitió llegar al lugar donde estoy, quien me permitió conocer personas esenciales que han sido el eje fundamental de mi formación personal y profesional.

En forma muy especial quiero dedicar este trabajo a mis padres José Trujillo y María Vaca porque creyeron en mí y porque me impulsaron a seguir adelante, por su noble dedicación y amor, por ser mis amigos, mis consejeros, y por siempre guiarme y ser la voz y bendición de Dios como prioridad en mi vida.

A mis hermanos por haberme soportado y estar conmigo en los buenos y malos momentos, compartiendo juntos gratos momentos de mi vida.

Finalmente a todos mis familiares, maestros y amigos que de una u otra forma me apoyaron durante mi formación personal.

Hugo Enrique Trujillo Vaca



## **AGRADECIMIENTO**

Como prioridad en mi vida agradezco a Dios por su infinita bondad, y por haber estado conmigo en los momentos que más lo necesitaba, por darme salud, fortaleza, responsabilidad y sabiduría, por haberme permitido culminar un peldaño más de mis metas, y porque tengo la certeza y el gozo de que siempre va a estar conmigo como una brújula que endereza nuestros rumbos.

A mis Padres, José y María, por haber estado conmigo apoyándome, por dedicar tiempo y esfuerzo para ser un hombre de bien, por enseñarme el más grande valor del ser humano, la humildad y darme excelentes consejos en mi caminar diario.

A mis queridos amigos y amigas de la facultad, quiero agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida y por todos aquellos momentos vividos que quedarán para siempre en mi memoria y en mi corazón sin importar en donde estén y donde vallan quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

A mi director de tesis, Dr. Ramón Cala Aiello por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

A mis asesores Ing. Jimmy Cuarán, Ing. Armando Manosalvas e Ing. Juan de la Vega por su orientación en el desarrollo de la presente investigación y por guiarme para la culminación exitosa de mi profesión.

Para todos ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	PAGINA
<b>1. CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
1.1. PROBLEMA.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.3.1. Objetivo general. ....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. HIPÓTESIS .....	3
<b>2. CAPITULO II.....</b>	<b>4</b>
2.1. QUINUA.....	4
2.1.1. TAXONOMÍA.....	5
2.1.2. Generalidades .....	6
2.1.2.1. Zona de cultivos .....	6
2.1.2.2. Altitud.....	7
2.1.2.3. Suelo .....	7
2.1.2.4. Variedades .....	7
2.1.2.5. Ciclo de cultivo.....	8
2.1.2.6. Rotación de cultivos .....	8
2.1.2.7. Siembra.....	8
2.1.2.8. Fertilización.....	9
2.1.2.9. Riego .....	9
2.1.2.10. Cosecha y trilla.....	9
2.1.2.11. Diámetro de grano .....	10
2.1.2.12. Almacenamiento.....	11
2.1.2.13. Desaponificación.....	11
2.1.2.14. Industrialización .....	11
2.1.2.15. Mercado demandante en el ecuador .....	12

2.1.3. Contenido nutricional de la quinua .....	12
2.2. ESTUDIO GASODINÁMICO DE LA QUINUA .....	14
2.2.1. Propiedades de las partículas y del lecho de partículas .....	14
2.2.1.1. Granulometría .....	14
2.2.1.2. Forma y tamaño .....	15
2.2.1.3. Densidad .....	16
2.2.1.4. Porosidad .....	16
2.2.1.5. Esfericidad o factor de forma .....	17
2.3. SECADO .....	19
2.3.1. OPERACIONES DE SECADO .....	19
2.3.2. MECANISMOS Y CINÉTICA DE SECADO, TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR.....	20
2.3.3. CURVAS FUNDAMENTALES DE SECADO .....	21
2.3.3.1. Curvas de velocidad de secado .....	21
2.3.4. Conversión de los datos a curva de velocidad de secado .....	21
2.3.5. Gráfica de la curva de velocidad de secado.....	23
2.3.6. Propiedades del aire de secado .....	24
2.3.7. Definición de términos psicométricos .....	25
2.3.7.1. Presión de Vapor .....	25
2.3.7.2. Humedad relativa.....	25
2.3.7.3. Humedad absoluta.....	26
2.3.7.4. Temperatura del Bulbo Seco.....	26
2.3.7.5. Temperatura del Punto de Roció .....	26
2.3.7.6. Temperatura del Bulbo Húmedo .....	26
2.3.7.7. Entalpia.....	27
2.3.7.8. Volumen Específico .....	27
2.3.7.9. Calor Específico .....	27
2.3.8. Cartas psicométricas .....	27
2.3.9. Acondicionamiento de granos .....	29
2.3.10. Temperaturas de secado.....	30
2.3.11. El sobresecado .....	31
2.3.12. Requisitos para el secado de granos .....	32
2.4. HUMEDAD .....	33

2.4.1. Humedad libre .....	33
2.4.2. Humedad ligada .....	33
2.4.3. Humedad desligada .....	34
2.4. HUMEDAD DE LA QUINUA .....	34
2.4.1. Análisis de humedad.....	35
2.4.2. Actividad de agua ( $A_w$ ).....	35
2.4.3. Preparación del material a secar .....	37
2.5. TÉCNICA DE SECADO POR FLUIDIZACIÓN.....	37
2.5.1. Fluidización y características del proceso .....	37
2.5.2. Tipos de fluidización por la naturaleza del fluido .....	38
2.5.3. Regímenes de fluidización en lechos fluidizados gas sólido.....	39
2.5.3.1. Fluidización sin arrastre de partículas (Régimen Burbujeante).....	39
2.5.4. Transferencia de calor en un lecho fluidizado.....	40
2.5.5. Velocidad mínima de fluidización.....	40
2.5.6. Velocidad de arrastre .....	42
2.5.7. Secado de quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) mediante lecho fluidizado.....	42
2.5.8. Modelado matemático de las cinéticas de secado .....	43
2.5.8.1. Modelo de Page .....	45
2.5.9. Breve descripción de la metodología operativa.....	45
2.5.10. Ventajas de la utilización de lecho fluidizado en la industria .....	46
2.5.11. Ventajas de la utilización de lecho fluidizado a nivel agroindustrial .....	46
<b>3. CAPÍTULO III .....</b>	<b>48</b>
3.1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	48
3.1.1. Ubicación del experimento.....	48
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.....	49
3.2.1. Materia prima. ....	49
3.2.2. Equipos e Instrumentos. ....	49
3.2.3. Maquinaria.....	49
2.2.3.1. Esquema de la instalación experimental .....	49
3.3. MÉTODOS .....	51

3.3.1.	Factores en estudio .....	51
3.3.2.	Tratamientos .....	51
3.3.3.	Diseño Experimental. ....	52
3.3.4.	Características del Experimento. ....	52
3.3.5.	Análisis Estadístico. ....	53
3.3.6.	Análisis Funcional .....	53
3.3.7.	Variables a Evaluarse. ....	53
3.3.7.1.	Variables Cuantitativas.....	53
3.4.	MANEJO ESPECÍFICO DEL EXPERIMENTO. ....	54
3.5.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE QUINUA CHENOPODIUM QUINOA (INIAP TUNKAHUAN) MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO.....	55
3.5.1.	Recepción .....	55
3.5.2.	Selección.....	55
3.5.3.	Pesado.....	56
3.5.4.	Lavado y desaponificado .....	56
3.5.5.	Ecurrido.....	57
3.5.6.	Secado.....	57
3.5.7.	Pesado.....	59
3.5.8.	Envasado.....	60
3.6.	MÉTODOS DE EVALUACIÓN .....	60
3.6.1.	Antes del Proceso .....	60
3.6.1.1.	Determinación de la velocidad mínima de fluidización .....	60
3.6.1.2.	Procedimiento para la determinación de la velocidad mínima de fluidización .....	61
3.6.1.3.	Tratamiento de datos .....	61
3.6.1.4.	Materia prima .....	62
3.6.1.5.	Humedad.....	62
3.6.2.	Durante el Proceso.....	62
3.6.2.1.	Humedad inicial.....	63
3.6.2.2.	Determinación del Tiempo de Secado.....	63
3.6.3.	Después del Proceso.....	63
3.6.3.1.	Análisis del producto terminado .....	63

3.6.3.2. Humedad.....	63
3.6.3.3. Proteína.....	64
3.6.3.4. Actividad de agua .....	64
3.6.3.5. Efectividad del Proceso. ....	65
<b>4. CAPÍTULO IV .....</b>	<b>66</b>
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA .....	66
4.2. VARIABLES EVALUADAS .....	67
4.2.1. Estudio gasodinámico de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	67
4.2.1.1. Granulometría.....	67
4.2.1.2. Diámetro medio .....	69
4.2.1.3. Determinación del volumen real y aparente .....	69
4.2.1.4. La densidad aparente y real .....	70
4.2.1.5. Determinación experimental de la porosidad real .....	71
4.2.1.6. Velocidad mínima de fluidización.....	73
4.2.2. Humedad final de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	79
4.2.3. Tiempo de secado quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) .....	83
4.2.4. Curvas características de Deshidratado para granos de quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	85
4.2.4.1. Curva de deshidratado para T1 (temperatura de secado 40°C y velocidad de secado 0,5 m/s).....	86
4.2.4.2. Curva de deshidratado para T2 (temperatura de secado 40°C y velocidad de secado 0,68 m/s).....	87
4.2.4.3. Curva de deshidratado para T3 (temperatura de secado 40°C y velocidad de secado 0,86 m/s).....	88
4.2.4.4. Curva de deshidratado para T4 (temperatura de secado 45°C y velocidad de secado 0,5 m/s).....	89
4.2.4.5. Curva de deshidratado para T5 (temperatura de secado 45°C y velocidad de secado 0,68 m/s).....	90
4.2.4.6. Curva de deshidratado para T6 (temperatura de secado 45°C y velocidad de secado 0,86 m/s).....	91

4.2.4.7. Curva de deshidratado para T7 (temperatura de secado 50°C y velocidad de secado 0,5 m/s).....	92
4.2.4.8. Curva de deshidratado para T8 (temperatura de secado 50°C y velocidad de secado 0,68 m/s).....	93
4.2.4.9. Curva de deshidratado para T9 (temperatura de secado 50°C y velocidad de secado 0,86 m/s).....	94
4.2.5. La velocidad de secado.....	95
4.2.6. Contenido de proteína.....	96
4.2.7. Actividad de agua (Aw).....	96
4.2.8. Efectividad del proceso .....	97
4.2.9. Balance de materiales para el mejor tratamiento.....	98
4.2.10. Cinética del secado .....	99
4.2.11. Efecto de la temperatura del aire caliente en las características de secado .	100
4.2.12. Modelos más utilizados en los procesos de secado de grano .....	101
4.2.12.1. Datos obtenidos de los Modelo matemático .....	102
4.2.12.2. Comportamiento de las constantes cinéticas de los modelos. ....	103
4.2.13. Homogeneidad de secado .....	105
<b>5. CAPITULO V.....</b>	<b>107</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>110</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>116</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PAGINA
Figura 1. Instalación experimental .....	50
Figura 2. Condiciones del aire de secado (Tabla psicrométrica) .....	58
Figura 3: Diagrama de bloques del mejor tratamiento .....	98

## ÍNDICE DE IMÁGENES

CONTENIDO	PAGINA
Imagen 1. Quinoa ( <i>Chenopodium quinoa</i> ). .....	4
Imagen 2. Distribución geográfica actual y potencial del cultivo de la quinoa en Ecuador. 6	
Imagen 3. Variedades INIAP Tunkahuan e INIAP Pata de Venado (precoz).....	7
Imagen 4. Cosecha manual y trilla con máquinas diseñadas para granos pequeños. ....	10
Imagen 5. Grano de quinoa perlada, lista para el consumo. ....	11
Imagen 6 Cultivo de la variedad de quinoa INIAP Tunkahuan. ....	12
Imagen 7. Los tamices estándar Tyler .....	15
Imagen 8. Representación en la carta psicrométrica de las propiedades del aire .....	29



## ÍNDICE DE FOTOS

CONTENIDO	PAGINA
Foto 1. Partículas finas expulsadas del sistema por la velocidad de arrastre .....	42
Foto 2. Recepción de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	55
Foto 3. Los tamices estándar Tyler.....	56
Foto 4. Balanza analítica .....	56
Foto 5. Lavado y desaponificado.....	57
Foto 6. Ecurrido .....	57
Foto 7. Secado en el reactor de fluidización.....	59
Foto 8. Balanza analítica .....	59
Foto 9. Tamices estándares.....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

CONTENIDO	PAGINA
Gráfico 1. Gráfica de los datos como humedad libre en función del tiempo. ....	22
Gráfico 2. Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre. ....	23
Gráfico 3. Representación gráfica sobre la carta psicométrica del proceso de secado. ....	30
Gráfico 4. Curva de equilibrio de humedad en el diagrama .....	33
Gráfico 5. Contenido de humedad versus Actividad de agua para diferentes tipos de alimentos .....	36
Gráfico 6. Comportamiento teórico de un lecho formado por partículas esféricas de un mismo diámetro bajo el filtrado de un gas a través del lecho. 1 y 2 Comportamiento del lecho de manera directa; 3- Comportamiento del lecho de manera inversa.....	41
Gráfico 7. Distribución de los granos de quinua por su diámetro .....	68

Gráfico 8. Porosidad contra altura del lecho .....	72
Gráfico 9. Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 18 cm y altura de 18cm. ....	74
Gráfico 10. Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 18 cm y una altura de 9 cm. ....	75
Gráfico 11. Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 13 cm y una altura de 13 cm. ....	76
Gráfico 12. Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 13 cm y una altura de 6,5 cm. ....	77
Gráfico 13. Interacción de los factores: A (temperatura de secado) y B (velocidad de flujo de aire) para la variable humedad final de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	82
Gráfico 14. Humedad final de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	82
Gráfico 15. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T1. ....	86
Gráfico 16. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T2. ....	87
Gráfico 17. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T3. ....	88
Gráfico 18. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T4. ....	89
Gráfico 19. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T5. ....	90
Gráfico 20. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T6. ....	91
Gráfico 21. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T7. ....	92
Gráfico 22. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T8. ....	93
Gráfico 23. Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T9. ....	94

Gráfico 24. Curva de velocidad de secado contra humedad en base seca de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T9.....	95
Gráfico 25. Cuevas de secado experimental.....	99
Gráfico 26. Humedad versus tiempo para tres temperaturas de aire de secado. ....	100
Gráfico 27. Diagrama de Pareto estandarizado para Tau .....	104
Gráfico 28: Dependencia de TAU en velocidad y temperatura usando Statgraphics .....	105

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>CONTENIDO</b>	<b>PAGINA</b>
Tabla 1. Clasificación botánica de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> .....	5
Tabla 2. Variedades de quinua <i>Chenopodium quinoa</i> .....	7
Tabla 3. Tabla de composición química de alimentos ecuatorianos, FDA .....	13
Tabla 4. Comparación de aminoácidos esenciales de la quinua, huevo y FAO .....	13
Tabla 5. Temperatura de funcionamiento de un secador.....	31
Tabla 6. Ubicación y datos meteorológicos del área de experimentación.....	48
Tabla 7. Descripción de los rangos de temperatura (A) y velocidad de flujo de aire (B). ..	52
Tabla 8. Características del experimento.....	52
Tabla 9. Análisis de la Varianza.....	53
Tabla 10. Características del aire desecante .....	58
Tabla 11. Condiciones ambientales de la Ciudad de Ibarra. ....	66
Tabla 12. Distribución de los granos de quinua por tamices.....	67
Tabla 13. Valores de porosidad en función de la altura del lecho.....	72
Tabla 14. Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.....	73
Tabla 15. Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.....	74
Tabla 16. Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.....	75

Tabla 17. Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.....	76
Tabla 18. Valores de la velocidad mínima de fluidización (vmf) para la quinua en comparación a la cascara de arroz.....	78
Tabla 19. Velocidad mínima de fluidización (vmf) encontrada.....	78
Tabla 20. Valores de la velocidad de arrastre.....	78
Tabla 21. Velocidad de arrastre y separación de partículas. ....	79
Tabla 22. Humedad final de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) expresado en porcentaje (%). ....	79
Tabla 23. Análisis de varianza para la humedad final de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	79
Tabla 24. Prueba de Tukey para tratamientos de la variable humedad final de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan). ....	80
Tabla 25. Diferencia mínima significativa para el factor A (temperatura de secado) de la variable humedad de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan). ....	81
Tabla 26. Diferencia mínima significativa para el factor B (velocidad del aire) de la variable humedad final de la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan). ....	81
Tabla 27. Tiempo de Secado de quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan) expresado en (h) .....	84
Tabla 28. Análisis de varianza del tiempo de secado de quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	84
Tabla 29. Prueba de Tukey para tratamientos de la variable tiempo de secado de quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan). ....	85
Tabla 30. Valor de humedad para el tratamiento T1 (A1B1).....	86
Tabla 31. Valor de humedad para el tratamiento T2 (A1B2).....	87
Tabla 32. Valor de humedad para el tratamiento T3 (A1B3).....	88
Tabla 33. Valor de humedad para el tratamiento T4 (A2B1).....	89
Tabla 34. Valor de humedad para el tratamiento T5 (A2B2).....	90
Tabla 35. Valor de humedad para el tratamiento T6 (A2B3).....	91
Tabla 36. Valor de humedad para el tratamiento T7 (A3B1).....	92
Tabla 37. Valor de humedad para el tratamiento T8 (A3B2).....	93
Tabla 38. Valor de humedad para el tratamiento T9 (A3B3).....	94

Tabla 39. Modelos más utilizados en los procesos de secado de grano .....	101
Tabla 40. Valores de los parámetros cinéticos y empíricos de los modelos propuestos para las curvas de secado en lecho fijo a velocidad constante $V=0,5$ m/s.....	103
Tabla 41. Matriz del diseño experimental del secado de Quinoa en lecho fluidizado .....	104
Tabla 42. Humedad de las tres muestras aleatorias .....	106
Tabla 43. Testigo 1 .....	116
Tabla 44. Testigo 2 .....	117
Tabla 45. Testigo 3 .....	119

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>CONTENIDO</b>	<b>PAGINA</b>
ANEXO 1. Uniformidad del contenido de humedad del Testigo .....	116
ANEXO 2. Análisis de actividad de agua .....	120
ANEXO 3. Reglamento técnico ecuatoriano 1673.....	121
ANEXO 4. Análisis microbiológicos para la quinua <i>Chenopodium quinoa</i> (INIAP Tunkahuan).....	128
ANEXO 5. Fotos .....	130

## **RESUMEN**

Este artículo trata el secado de quinua en lecho fluidizado y su comparación con otros métodos tradicionales. Se utilizó un reactor de 0,1m de diámetro y la altura se mantuvo constante e igual a un diámetro. El equipo experimental es controlado por la Unidad de la National Instruments NI cDAQ-9139 de captura, almacenamiento y procesamiento de datos, la cual realiza la inter fase con el reactor y su computador interno a través del Software LabVIEW. Se diseñó un experimento 2 factoriales donde las variables independientes fueron la temperatura y velocidad del aire y la dependiente el tiempo de secado. Se realizó el procesamiento de los datos experimentales obtenidos las curvas características del secado y los modelos que las describen. El procesamiento estadístico dio valores significativos tanto para la velocidad como para la temperatura del aire. Como resultado de este proceso se logró disminuciones del tiempo de secado hasta 4 minutos con valores bajos de temperatura de 45<sup>0</sup> C, siendo 20 veces menores que los valores obtenidas en secadores de bandejas y aun superiores en comparación con los métodos tradicionales de secado intensivo solar, evitar la pérdida de masa por sobre secado y garantiza un secado más homogéneo.

Palabras clave: Reactor, Lab View software, Secado

## **SUMMARY**

This study examines the drying of quinoa by means of a fluidized bed as compared with other traditional methods. A reactor of 0,1 m in diameter was used, in which the height was kept constant and equal to the diameter. The experimental equipment is controlled by the National Instruments Unit NI cDAQ-9139 for data collection, storage and processing, which creates an interface between the reactor and the internal computer through Lab VIEW software. Two factorial experiments were designed, in which the temperature and the air speed were independent variables and the drying time was a dependent variable. The processing of the experimental data depicted characteristic drying curves and also models that describe them. The statistical processing showed significant values for both speed and air temperature. A drying-time reduction to as little as 4 minutes with temperatures as low as 45 degrees Celcius was achieved as a final result of this process, this being 20 times lower than the values obtained by tray-type dryers and superior even to traditional drying methods, such as intensive solar exposure, by avoiding the loss of mass caused by over-drying and thus guaranteeing a more homogenous drying.

Keywords: Reactor, Lab View software, Drying

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1. PROBLEMA**

En Ecuador la producción de quinua se ve limitada por los altos costos de la maquinaria especializada para el procesamiento de la quinua y los precios de los materiales, insumos agrícolas y mano de obra que han sido afectados negativamente por la dolarización. Todo esto hace que la quinua ecuatoriana no sea competitiva en lo referente a costos. Sin embargo, su alta calidad le da una ventaja comparativa frente a la competencia, razón por la cual es necesario desarrollar nuevas tecnologías que permitan obtener mejores precios que los que recibidos por la producción de quinua de otros países.

Uno de los problemas más visibles en el secado de la quinua y otros granos es el control de la temperatura y tiempo de secado, donde el objetivo principal es la prolongación de la vida del producto mediante la eliminación de la humedad natural del grano, pero; a temperaturas adecuadas y que al final del proceso posea una humedad de 12%, ya que a temperaturas de secado elevadas se puede causar daños térmicos acentuados en los granos alterando sus propiedades nutricionales y organolépticas.

En los equipos destinados para el secado de quinua uno de los problemas más latentes está en la movilidad de los granos, muchos de estos métodos de secado son estacionarios, con bajos coeficientes de intercambio de calor y masa y el secado no es homogéneo, existiendo



gradientes de temperatura dentro de la masa a secar. Estos métodos emplean grandes áreas de secado por lo que es necesario el uso de mano de obra para mantener la quinua en movimiento y así la transferencia de calor sea más uniforme.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Resulta de vital importancia eliminar la humedad del grano para garantizar éxito en su almacenamiento por ciertos períodos de tiempo o su posterior uso en la alimentación o con fines de semilla para la siembra, es por ello que resulta importante el estudio del proceso de secado, evitando así que los granos húmedos constituyan un medio ideal para el desarrollo de microorganismos, insectos y ácaros, además de conservar las propiedades germinativas del mismo.

El presente proyecto constituye un estudio necesario para dar soluciones a una realidad presente, ya que los métodos tradicionales de secado de quinua más utilizados como el solar no brindan una garantía de inocuidad y depende totalmente de las condiciones climáticas.

Con los resultados de esta investigación basada en la aplicación de un lecho fluidizado y respaldado por investigación empírica en laboratorio y pruebas de campo en un prototipo piloto, se quiere demostrar que el producto final garantice seguridad y confianza, sea un alimento sano, seguro, también se probará con resultados verdaderos que es posible evitar pérdidas, gasto de energía y tiempo, empleo de mucha mano de obra etc.

Las ventajas que ofrece un secador de lecho fluidizado a la investigación es:

- Menor cantidad de energía térmica necesaria para el proceso en cuestión, es decir, alto rendimiento energético.
- Posibilidad de llevar a cabo el secado y el enfriamiento en el mismo equipo.
- Proteger las aromas.

- Cortos tiempos de secado.
- Secado eficiente (NEOTEC, 2010)

Para resolver problemas presentes en el secado de la quinua, la investigación propuesta desarrollará un novedoso proceso de secado de granos de quinua, basado en la aplicación de un lecho fluidizado que ya ha sido probado con otros tipos de productos como el arroz, café y cacao, bajo los principios de Producción Limpia (Cala & Riera , 2010).

### **1.3.OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

- Establecer parámetros de secado para la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) mediante lecho fluidizado.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- Realizar el estudio gasodinámico de la quinua para el proceso de secado.
- Evaluar los parámetros de temperatura y flujo de aire en el secado de la quinua.
- Establecer las curvas de secado.
- Evaluar el grado de eficiencia del proceso de secado.

### **1.4.HIPÓTESIS**

**Ho:** La temperatura y flujo de aire, no tienen influencia sobre el tiempo de secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) mediante lecho fluidizado.

**Hi:** La temperatura y flujo de aire, tienen influencia sobre el tiempo de secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) mediante lecho fluidizado.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1. QUINUA

Las excepcionales propiedades de la Quinoa (*Chenopodium quinoa*) como suplemento alimentario rico en proteínas, vitaminas, otros componentes beneficiosos para el organismo humano y por sus aplicaciones en la industria médica, hacen que las perspectivas para su producción a nivel agroindustrial sea una meta a corto y largo plazo en las Regiones Andinas y otras partes del planeta (network, 2015).



**Imagen 1.** Quinoa (*Chenopodium quinoa*).

**Fuente:** (Mazón & Peralta, 2014).

La quinoa puede proporcionar alimentos de alta calidad, aumenta la seguridad alimentaria y reducir la desnutrición, pero el gran potencial de este cultivo aún no ha sido plenamente explotado, principalmente debido a la falta de investigación en cuanto a las limitaciones de producción (Mazón & Peralta, 2014).

El valor nutricional de los granos y/o semillas de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es conocido y de menor cuantía se conoce sus características físicas, siendo fundamental para un adecuado diseño y desarrollo de maquinarias y procesos que permitan incrementar el desarrollo productivo (Cervilla et al., 2012).

Actualmente en el Ecuador están vigentes solamente dos variedades de quinua: INIAP Tunkahuan (Peralta, 2013) e INIAP pata de venado (Mazón et al, 2013), obtenidas mediante selección del banco de germoplasma. Aunque el número de estudios dedicados a la Quinua es alto, existe un número muy limitado de artículos dedicados al tratamiento pos cosecha y en particular al estudio del lavado, desaponificado y secado de la quinua, encontrando mayor información en páginas web e informes de organismos gubernamentales de Bolivia, Perú y Ecuador.

Del material publicado se puede concluir que los métodos más difundidos para el procesamiento pos cosecha de la quinua continúan siendo los tradicionalmente utilizados por años por los productores de las zonas andinas (López, Capparelli, & Nielsen, 2012).

### 2.1.1. Taxonomía

La clasificación taxonómica de la quinua *Chenopodium quinoa* se describe en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Clasificación botánica de la quinua *Chenopodium quinoa*

Reino	Vegetal
División	Espermatofita
Subdivisión	Angiosperma
Clase	Dicotiledónea
Subclase	Archiclamidea
Orden	Centrosperma
Familia	Chenopodiaceae
Genero	Chenopodium
Especie	Chenopodium Quínoa Willd

Fuente: (Mazón & Peralta, 2014).

## 2.1.2. Generalidades

De acuerdo a Peralta (2013) en su investigación: “*Variedad mejorada de quinua de contenido de saponina*” presenta las siguientes generalidades de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

### 2.1.2.1. Zona de cultivos

En Ecuador, la quinua se puede producir en las 10 provincias de la Sierra (Imagen 2), con un área potencial de cien mil hectáreas.

**Imagen 2.** Distribución geográfica actual y potencial del cultivo de la quinua en Ecuador.



Fuente: (Mazón & Peralta, 2014).

La Sierra de Ecuador es la región que se ha caracterizado por la producción de alimentos para el consumo nacional. Hasta finales de los 90, la quinua no aparecía entre los cultivos más importantes, sino en la lista de productos destinados al autoconsumo local (comunidades, parroquias o cantones de la misma región) (Mazón & Peralta, 2014).

### 2.1.2.2. Altitud

- 3000 a 3400 msnm, para INIAP Tunkahuan
- 3000 a 3800 msnm, para INIAP Pata de Venado

### 2.1.2.3. Suelo

Franco, franco arenoso, negro andino, con buen drenaje con un pH: entre 5.5 a 8.

### 2.1.2.4. Variedades

**Tabla 2.** Variedades de quinua *Chenopodium quinoa*

QUINUA							
VARIEDAD	ALTURA DE LA PLANTA	DIAS DE FLORACION	DIAS DE COSECHA	COLOR GRANO	CONTENIDO DE SAPONINA	RENDIMIENTO kg/ha	ALTITUD OPTIMA
INIAP TUNKAHUAN	150	109	180	blanco	0,06%	2000	2600-3200
INIAP PATA DE VENADO	75	73	150	Blanco crema	0,05%	1400	3000-3600

**Fuente:** Tabla de variedades de quinua en el Ecuador.



**Imagen 3.** Variedades INIAP Tunkahuan e INIAP Pata de Venado (precoz).

**Fuente:** (Mazón & Peralta, 2014).

Según Mazón & Peralta (2014), en 1986, se crea el Programa de Cultivos Andinos y en agosto de este mismo año se liberan las primeras variedades mejoradas de quinua amarga: INIAP Cochasqui e INIAP Imbaya, en 1992 se liberaron las variedades INIAP Tunkahuan e INIAP Ingapirca de bajo contenido de saponina. De estas variedades liberadas solo está vigente INIAP Tunkahuan hasta la fecha, las otras desaparecieron o se mezclaron con variedades criollas.

La FAO conjuntamente con el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca MAGAP desde el 2005 viene impulsando proyectos de fomento de la producción de quinua en las provincias de Carchi, Cotopaxi, Bolívar, Pichincha e Imbabura, en los cantones Pimampiro, Otavalo, Cotacachi, Ibarra, Cayambe y Tabacundo. Especialmente la producción de la variedad INIAP Tunkahuan de bajo contenido de saponina (Peralta, 2013).

En el transcurso del proyecto se trabajara con la variedad INIAP Tunkahuan ya que según Peralta (2013) esta variedad es de origen ecuatoriano, colectada en la provincia del Carchi desde 1985, con una altura de planta entre 90 y 180 cm, de color verde cuando joven y rosado-amarillo a la cosecha; el grano es de tamaño mediano, de forma redonda y aplanado, de bajo contenido de saponina (0,06%).

#### **2.1.2.5. Ciclo de cultivo**

Tunkahuan: de 150 a 170 días

Pata de Venado: de 130 a 150 días

#### **2.1.2.6. Rotación de cultivos**

Se recomienda rotar con papa, arveja, haba, chocho, trigo, cebada, maíz, fréjol arbustivo.

#### **2.1.2.7. Siembra**

Época: Noviembre a febrero con suficiente humedad a la siembra (de preferencia en días muy buenos o buenos, de acuerdo con el calendario lunar). De noviembre a febrero con

suficiente humedad a la siembra (de preferencia en días muy buenos o buenos, de acuerdo al calendario lunar) una cantidad entre 12 a 16 kg por hectárea (Peralta, 2013).

#### **2.1.2.8. Fertilización**

En suelos de baja fertilidad se recomienda aplicar 80-40 kg por hectárea de N y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente; que se cubre con 100 kg por hectárea de 18-46-00 aplicados a la siembra, más 150 kg de urea o 200 kg de nitrato de amonio por hectárea a la deshierba (Peralta, 2013).

En suelos fértiles o después del cultivo de papa, no se recomienda usar fertilizante completo a la siembra, pero sí aplicar 100 kg de urea o 200 kg de nitrato de amonio por hectárea, en cobertera al aporque.

#### **2.1.2.9. Riego**

En áreas con disponibilidad de agua de riego se puede regar por gravedad o surcos; el volumen de entrada del agua no debe ser abundante. Se debe poner énfasis en floración y llenado de grano (Peralta, 2009).

#### **2.1.2.10. Cosecha y trilla**

La cosecha manual (con hoz) debe realizarse cuando se detecta que el grano ofrece resistencia a la presión entre las uñas. La trilla se la ejecuta golpeando las gavillas con una vara sobre carpas o plásticos. Se debe evitar la contaminación con piedras, tierra o semillas de malezas. Después de la cosecha, para la trilla mecánica se utilizan trilladoras estacionarias de cereales o máquinas combinadas.





**Imagen 4.** Cosecha manual y trilla con máquinas diseñadas para granos pequeños.

**Fuente:** (Mazón & Peralta, 2014).

Para la cosecha con máquinas combinadas, el lote de quinua debe estar libre de malezas, en especial las de semillas pequeñas, de difícil separación en el proceso de selección. La limpieza y clasificación del grano o semilla se puede realizar con zarandas manuales o con máquinas clasificadoras de semillas (Peralta, 2009).

#### **2.1.2.11. Diámetro de grano**

El rango de variación del diámetro del grano en el germoplasma de quinua varía desde 1.03 mm a 2,66 mm, disponiéndose de suficiente variabilidad que podría ser muy bien explotada a través del mejoramiento genético (Rojas, Pinto y Camargo 2003). Las quinuas con granos pequeños proceden principalmente del Altiplano Norte, y también por la mayoría de las accesiones que proceden de los valles interandinos y de nivel de mar (Vargas, 2013).

Según la norma NTE INEN 1673:2013(Primera revisión), el grano de quinua por su diámetro se clasifica en cuatro categorías: tamaño ‘extra grande’ (mayores a 2,00 mm), tamaño ‘grande’ (1,70 a 2,00 mm), tamaño ‘mediano’ (1,40 a 1,70 mm) y tamaño ‘pequeño’ (menores a 1,40 mm). En la categoría ‘extra grande’ se encuentran la ‘Quinua INIAP Tunkahuan’, cuya característica principal es el tamaño grande de sus granos.

#### **2.1.2.12. Almacenamiento**

El grano seco y limpio debe ser almacenado en recipientes cerrados o costales de tejido estrecho, en bodegas limpias, secas, protegidas del ataque de roedores e insectos, con circulación de aire y con un contenido inferior al 13% de humedad en el grano (Peralta, 2009).

#### **2.1.2.13. Desaponificación**

El grano de las variedades “dulces” o libres de saponina requiere un lavado rápido con agua limpia o un escarificado ligero, a diferencia de variedades amargas que requieren ser lavadas en abundante agua o recibir un fuerte escarificado (cepillado vía seca); antes de ser cocidas o procesadas (Peralta, 2014).

#### **2.1.2.14. Industrialización**

Se puede transformar en grano perlado (grano entero lavado y seco o escarificado), harina, hojuela (grano aplastado), y en mezclas con harina de trigo para fideos, pan, galletas, etc. (Peralta, 2009).



**Imagen 5.** Grano de quinua perlada, lista para el consumo.

**Fuente:** (Mazón & Peralta, 2014).

### 2.1.2.15. Mercado demandante en el Ecuador

El mercado nacional, principalmente la Sierra es demandante de quinua en grano entero y perlado (Peralta, 2013).

### 2.1.3. Contenido nutricional de la quinua



**Imagen 6** Cultivo de la variedad de quinua INIAP Tunkahuan.

**Fuente:** (Mazón & Peralta, 2014).

La quinua es un producto autóctono que es cultivada en la zona interandina rico en nutrientes necesario para la alimentación humana. Su consumo se recomienda en vista de que posee los nutrientes necesarios para la alimentación humana, sobre todo de niños y ancianos. Se presenta a continuación un comparativo entre los contenidos nutreicos de la quinua, el trigo y la cebada, en el cual se aprecia que la quinua supera en la mayoría de las categorías de comparación (Alberto et al., 2014).

En la Tabla 3 se presenta la composición en macronutrientes de la quinua y los tres cereales de mayor consumo. Puede apreciarse que la quinua tiene más proteínas y grasa, donde el maíz es el más pobre (Naranjo, 2010).

**Tabla 3.** Tabla de composición química de alimentos ecuatorianos, FDA

ELEMENTO		QUINUA	TRIGO	MAÍZ BLANCO DE LA SIERRA	CEBADA CRUDA	
HUMEDAD	g	13,1	14,2	12,8	10,7	
CALORÍAS	g	353	354	357	350	
PROTEÍNA	g	14,2	13	7,7	10	
EXTRACTO ETÉREO	g	4,1	1,7	4,8	2,1	
	totales	g	66,2	69,6	73,3	75,3
CARBOHIDRATOS	Fibra	g	3,9	2,9	1,6	3,3
CENIZAS	g	2,4	1,5	1,4	1,9	
CALCIO	mg	68	54	8	37	
FOSFORO	mg	430	340	93	318	
HIERRO	mg	6,6	3,7	2,4	5,6	
CAROTENO	mg	0,03	0,01	0,06	0	
TIAMINA	mg	0,35	0,56	0,36	0,35	
RIBOFLAY	mg	0,25	0,05	0,07	12	
NIACINA	mg	1,54	4,96	2,36	13,96	
ÁCIDO ASCÓRBICO	mg	-	-	-	-	

Fuente: (Mazón &amp; Peralta, 2014).

En la Tabla 4 se detalla la composición en aminoácidos esenciales de la quinua, en comparación con el huevo y el llamado "patrón FAO", que establece las necesidades humanas para la dieta balanceada. Puede apreciarse que la quinua tiene una composición muy cercana al "patrón FAO" y al huevo, que es considerado como una buena proteína. (Naranjo, 2010).

**Tabla 4.** Comparación de aminoácidos esenciales de la quinua, huevo y FAO

	QUINUA %	HUEVO %	FAO %
Fenilalanina	4,7	5,8	3,5
Histidina	3,5	2,4	2,5
Isoleucina	6,4	6,6	5,1
Leucina	6,9	8,8	5,5
Lisina	7,1	6,6	6,3
Metionina	3,4	3,1	2,2
Treonina	5,0	5,0	4,2
Triptófano	1,0	1,7	1,1
Valina	4,1	7,4	4,1

Fuente: Revista cultural de nuestra América

En razón del buen balance en aminoácidos de la quinua, el organismo humano aprovecha, aproximadamente, el 80% de lo que se ingiera, proporción que es bastante semejante al aprovechamiento de carne, huevo y leche (Naranjo, 2010).

El comportamiento de la quinua en el lecho fluidizado es esencial para el cálculo y el diseño fiable de reactores para el secado y la desaponificación del grano. Desde este punto de vista, la composición granulométrica, porosidad del lecho, propiedades físicas de la quinua, la velocidad mínima de fluidificación y la velocidad de arrastre son los parámetros más importantes (Jiliang, Xiaoping, & Daoyin, 2013).

## **2.2. ESTUDIO GASODINÁMICO DE LA QUINUA**

Durante la operación de un sistema fluidizado se pueden presentar varios tipos de contacto fluido - sólido que dependen de los siguientes factores: propiedades de las partículas y del lecho, naturaleza del fluido y la velocidad del mismo Gupta y Sathiyamoorthy (1999).

Se iniciará con el estudio de las propiedades de las partículas y del lecho que influyen en la fluidización.

### **2.2.1. Propiedades de las partículas y del lecho de partículas**

Según Gupta y Sathiyamoorthy (1999), las propiedades que se deben ser consideradas en la interacción fluido-partícula son: el tamaño, la densidad, la esfericidad y la fracción de vacío del lecho.

#### **2.2.1.1. Granulometría**

La determinación de la granulometría de la quinua resulta fundamental para la determinación del llamado diámetro equivalente del grano, debido fundamentalmente por el hecho que la

quinua presenta un grano con cierta multidispersión respecto a su diámetro, encontrando una distribución de granos con diferentes valores de diámetro que representan fracciones de granos de baja dispersos Gupta y Sathiyamoorthy (1999).

Para tamaños intermedios se hace una distribución de partículas mediante el empleo de tamizado. Los más comunes son los tamices estándar Tyler, Imagen 7. El tamaño de partículas retenido por una bandeja del tamiz, poseerá un diámetro medio entre la apertura del tamiz que lo deja pasar y aquel que lo retiene (Miranda, 2010).



**Imagen 7.** Los tamices estándar Tyler

**Fuente:** (Miranda, 2010).

### **2.2.1.2. Forma y tamaño**

Los granos de quinua tienen formas diferentes: cónicos, cilíndricos y elipsoidales, tamaños por debajo de 2,6 mm de diámetro, y pueden ser de diferente color: blanco, amarillo, rosado, café, negro. En este pseudocereal se puede identificar el endosperma (cotiledones y radícula), el perisperma (granos de almidón) y el episperma (capas externas que recubren la semilla) (Miranda, 2010).

De acuerdo a Machado & Ernesto (2002), esta característica varía de manera significativa según cada especie de grano; hay once órdenes de magnitud de diferencia en tamaño entre las semillas más pequeñas y las más grandes. Las grandes y pesadas producen plántulas fuertes, con un satisfactorio desarrollo de raíces y tallos, por tener una reserva mayor de

nutrientes con los que la planta vive en su etapa inicial. El tamaño pequeño es típico de algunas variedades e indica un menor vigor en la planta al tener menos 28 nutrientes, lo que no constituye una gran desventaja.

### **2.2.1.3.Densidad**

Se define como la relación entre la masa del producto y el volumen del mismo, hay dos clases la aparente y la real.

- Aparente. Es la relación entre la masa y el volumen total del cereal, incluyendo los espacios intersticiales que dejan los granos entre sí, varía con el contenido de impureza y humedad Gupta y Sathiyamoorthy (1999).

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{masa de la muestra}}{\text{volumen aparente}} \quad (1)$$

- Real. Es la relación entre la masa y el volumen real ocupado por los granos, es decir excluyendo los espacios vacíos. La densidad real de las partículas está definida como el peso del material por unidad de volumen, cuando este se considera libre de poros, grietas o fisuras ( Pujos, 2015).

$$\text{Densidad Real} = \frac{\text{masa de la muestra}}{\text{volumen real}} \quad (2)$$

### **2.2.1.4.Porosidad**

Según Torrecilla (2000) la porosidad es una propiedad del sólido que depende tanto de las propiedades fluidodinámicas del lecho (compactación del lecho, velocidad de mínima fluidización, distribución de tamaños, etc.) como de las características del sólido (tamaño y forma de las partículas, tipo de partículas, humedad interparticular, etc.).

Torrecilla (2000) menciona que para velocidades superiores a la mínima de fluidización la porosidad aumenta con la velocidad del aire en el lecho puesto que al aumentar la fuerza de arrastre del fluido las partículas están más separadas entre sí. Cuando se alcanza la velocidad de mínima fluidización se alcanza el estado denominado de porosidad de mínima fluidización. En este estado, las partículas se encuentran suspendidas en el fluido ascendente, presentando una porosidad mayor que en el estado fijo anterior y por ello el contacto sólido-gas es mejor y mejoran la transferencia de energía y de materia.

De acuerdo a Guarneros (2015) la porosidad es una propiedad física que depende de la forma y tamaño de la semilla, debido a la naturaleza coloidal y a los espacios intergranulares, el volumen de aire intersticial es del orden del 35% al 40%, esta característica permite al aire entrar y circular a través de la masa de granos, mientras mayor porosidad haya más fácil es la conservación del producto.

Con el valor de la densidad aparente y la real se puede determinar valores de la porosidad inicial de la capa antes de la fluidización o capa inerte utilizando la ecuación 3.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (3)$$

Donde:

$\rho_a$  = porosidad aparente

$\rho_r$  = porosidad real

#### **2.2.1.5. Esfericidad o factor de forma**



Según Pujos (2015), define a la esfericidad como el factor de semejanza a la geometría de una esfera. Para esferas su tamaño está dado directamente por su diámetro.

Para otras geometrías irregulares el tamaño de diámetro promedio se determina:

a) Para partículas grandes  $> 1\text{mm}$ :

- Se pesa un número de partículas dado y mediante su densidad se determina el diámetro equivalente de las mismas.
- Se determina el volumen desplazado de fluido en un cilindro al introducir un número conocido de partículas no porosas.
- Se mide directamente con un vernier o micrómetro.

b) Para todos los casos se determina un diámetro equivalente a una esfera para un mismo volumen de esfera y de partícula utilizando la ecuación 4.

$$V_{ESF} = \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{\pi D^3}{6} \quad (4)$$

Despejando:

$$D_{ESF} = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (5)$$

Donde el diámetro promedio es igual al diámetro de la esfera.

$$D_P = D_{ESF} \quad (6)$$

No todos los cereales tienen formas esféricas la mayoría son irregulares; una manera de medir la esfericidad del grano es con el factor de forma), el cual comprende la relación entre el área de una esfera y la del grano, los dos con el mismo volumen constante (Pujos, 2015).

### **2.3. SECADO**

Según Tabar (2011), una de las primeras operaciones posteriores a la cosecha, destinadas a mantener la calidad de los productos agrícolas es el proceso de secado. El secado consiste en la eliminación parcial del agua libre contenida en estos productos hasta que llegan a un contenido de agua que permite el almacenamiento por mucho tiempo, sin que ocurra el deterioro de estos productos.

El secado es un proceso fundamental para el almacenamiento y conservación de la calidad de los alimentos. Cuando el grano contiene una humedad superior a 12,5% existe riesgos de deterioro microbiológico por hongos y bacterias, daño físico, sabores sucios, mohosos, terroso y de reposo. El proceso de secado se realiza para disminuir el contenido de agua inicial desde 35% presente en la quinua húmeda hasta 10 – 12% siendo una etapa crítica que requiere control ya que cualquier daño ocurrido es irreversible (Tabar, 2011).

El secado depende de muchos factores, de los cuales uno de los más importantes lo constituyen las condiciones ambientales predominantes durante el proceso; pero también de la calidad de la quinua a secar, de la capacidad del secador y de los controles de proceso como el espesor y las practicas aplicadas (Puerta, 2013).

#### **2.3.1. Operaciones de secado**

De modo general se pueden clasificar las operaciones de secado en continuas y discontinuas. En las operaciones continuas pasan a través del equipo tanto la sustancia a secar como el gas. La operación discontinua en la práctica se refiere generalmente a un proceso en el que se expone una cierta cantidad de sustancia a secar a una corriente de gas que fluye a través en la que se evapora la humedad (Gungor et al., 2013).

### **2.3.2. Mecanismos y cinética de secado, transferencia de masa y calor**

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa en el mismo. Para esto es necesario conocer los elementos más útiles de la transferencia de calor y masa que funcionen en los secaderos de contacto directo, según Bubnovich, Villarreal, & Reyes, (2008), esta depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del gas y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del gas, la cual se comporta como una superficie libre de agua (Bubnovich, Villarreal, & Reyes, 2008).

De acuerdo a Chao & Juan, (2013), las condiciones internas están definidas, por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del gas, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante será las propiedades del sólido. Cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, lo que esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior. También se ha reportado otro tipo de secado llamado secado por sublimación (Perussello et al., 2014).

### 2.3.3. Curvas fundamentales de secado

#### 2.3.3.1. Curvas de velocidad de secado

Para determinar la velocidad de secado de un material, se procede colocando una muestra en una bandeja. Si se trata de material sólido, debe llenar por completo la base de la bandeja de tal manera que sólo quede expuesta a la corriente de aire de secado la superficie de dicho sólido. La pérdida en peso de humedad durante el secado puede determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación, colgando la bandeja en una balanza adaptada a un gabinete o a un ducto a través del cual fluye el aire de secado (Geankoplis, 2006).

La muestra no debe ser demasiado pequeña y debe introducirse en una bandeja similar a la que se usará en producción. La relación de superficie de secado a superficie de no secado (superficie aislada) así como la profundidad del lecho del sólido deben ser idénticas, la velocidad, la humedad, la temperatura y la dirección del aire deben ser los mismos y constantes para simular un secado en condiciones invariables (Geankoplis, 2006).

#### 2.3.4. Conversión de los datos a curva de velocidad de secado

Según Geankoplis (2006), los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes generalmente se expresan como peso total ( $X$ ) del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos en el periodo de secado. Estos valores pueden convertirse a datos de velocidad de secado con los siguientes procedimientos. Primero se recalculan los datos. Si ( $X$ ) es la masa del sólido húmedo en (Kg) totales de agua más sólido seco y ( $X_s$ ) es la masa del sólido seco en Kg tal como se muestra en la ecuación 7.

$$X^* = \frac{X - X_s \text{ kg totales de agua}}{X_s \text{ kg solido seco}} \left( \frac{\text{kg totales de agua}}{\text{kg sólido seco}} \right) \quad (7)$$

Habiendo establecido las condiciones de secado constante, se determinan el contenido de humedad de equilibrio, ( $X^*$ ) [Kg humedad de equilibrio / kg de sólido seco]. Con esto se

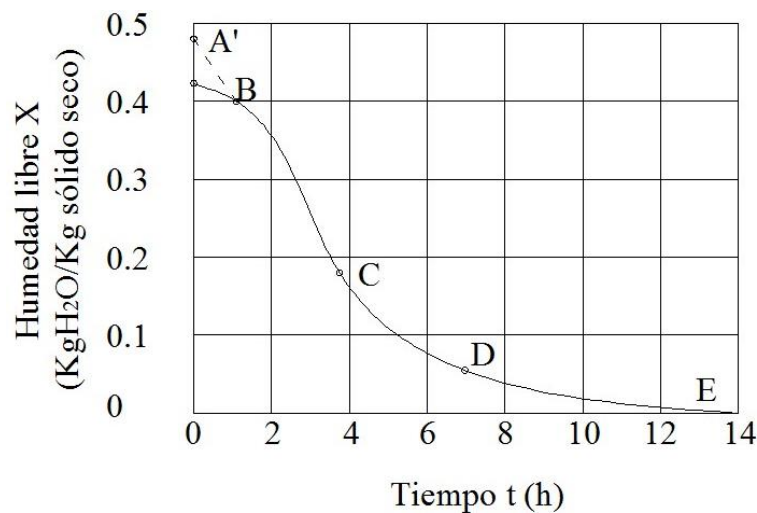
procede a calcular el valor del contenido de humedad libre (X) en [Kg de agua libre / kg de sólido seco] (ecuación 8) para cada valor de (X<sub>t</sub>) (Geankoplis, 2006).

$$X = X_t - X^* \quad (8)$$

Usando los datos calculados con la anterior ecuación, se traza una gráfica del contenido de humedad libre (X) en función del tiempo (t) en [h]. Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes de la curva, lo cual proporciona valores de dX/dt para ciertos valores de (t). Se calcula entonces, la velocidad (W) para cada punto con la expresión 9:

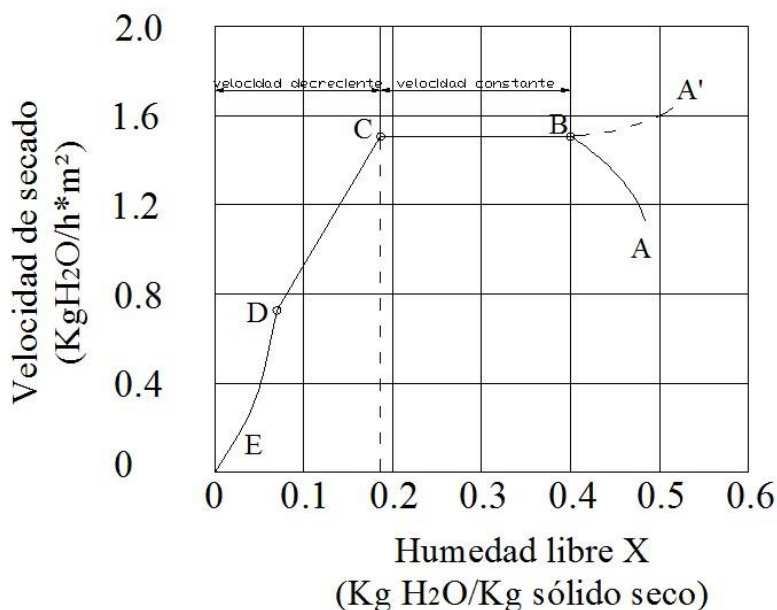
$$W = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (9)$$

Donde W es la velocidad de secado en [kg H<sub>2</sub>O/h m<sup>2</sup>], (L<sub>s</sub>) es [kg de sólido seco usado], y (A) es el área superficial expuesta al secado en [m<sup>2</sup>]. Entonces, la curva de velocidad de secado se obtiene graficando (W) en función del contenido de humedad (Geankoplis, 2006).



**Gráfico 1.** Gráfica de los datos como humedad libre en función del tiempo.

Fuente: (Geankoplis, 2006).



**Gráfico 2.** Velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.

Fuente: (Geankoplis, 2006).

### 2.3.5. Gráfica de la curva de velocidad de secado

En la gráfica 2 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando con un tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto (A). Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior a la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación irá en aumento. Al llegar al punto (B), la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principiar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto (A).

Este periodo inicial de ajuste con estado inestable suele ser bastante corto y generalmente se ignora en el análisis de los tiempos de secado. La curva de la gráfica 1 es recta entre los puntos (B) y (C), por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este período de velocidad constante de secado corresponde a la línea (BC) en la gráfica 2.

En el punto (C) de ambas gráficas, la velocidad de secado, comienza a disminuir durante el periodo de velocidad, decreciente, hasta llegar al punto D. En este primer periodo de

velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea (CD) en la gráfica 2, y por lo general, es lineal.

En el punto (D), la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto (E), donde el contenido de humedad de equilibrio es ( $X^*$ ), y  $X = X^* - X^* = 0$ . En el secado de algunos materiales, la región (CD) puede no existir o bien constituir la totalidad del periodo de velocidad decreciente.

### **2.3.6. Propiedades del aire de secado**

Durante el secado de un sólido húmedo en atmosfera de aire caliente, el aire proporciona a la humedad el calor sensible y latente de evaporación y, a la vez, actúa como transportador para la separación del vapor de agua formado, alejándolo de la proximidad de la superficie de evaporación. La cantidad de agua extraída durante este proceso puede seguirse a través del estudio de la psicrometría del aire (Brennan et al., 1970).

La psicrometría se define como "aquella rama de la física relacionada con la medición o determinación de las condiciones del aire atmosférico, particularmente respecto de la mezcla de aire seco y vapor de agua", o bien "aquella parte de la ciencia que está íntimamente ligada a las propiedades termodinámicas del aire húmedo". Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de pos cosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos.

El medio de secado es aire húmedo, que consiste en una mezcla de aire seco y vapor de agua. El aire seco está compuesto de varios gases y una cantidad variable de vapor de agua. Aunque la fracción de peso del vapor de agua en el aire usado para el secado de granos es siempre menor a un décimo, la presencia de moléculas de vapor de agua tiene un marcado efecto sobre el proceso de secado. Se usan varios términos para expresar la cantidad de vapor de agua en aire húmedo. Estos y otros términos termodinámicos empleados en la descripción de las propiedades del aire húmedo se definen a continuación (Goff, 1945).

### **2.3.7. Definición de términos psicométricos**

Tres propiedades hacen referencia a la cantidad de vapor de agua retenida en el aire de secado: presión de vapor, humedad relativa y humedad absoluta. Otras tres propiedades están en relación a la temperatura del aire: temperaturas del bulbo seco, del bulbo húmedo, y del punto de rocío. Dos propiedades adicionales frecuentemente usadas en cálculos de secado de granos son la entalpía y el volumen específico.

Estas ocho propiedades termodinámicas del aire húmedo se definen en los siguientes párrafos (Badiali, 2003).

#### **2.3.7.1. Presión de Vapor**

La presión de vapor ( $P_v$ ) es la presión parcial ejercida por las moléculas de vapor de agua en el aire húmedo. Cuando el aire está completamente saturado con vapor de agua, su presión de vapor se denomina presión de vapor saturado ( $P_{vs}$ ). La presión de vapor en el aire usada para secado de granos es pequeña (menor de 6,9 kPa) cuando se la compara con la presión atmosférica de 101,35 kPa (Badiali, 2003).

#### **2.3.7.2. Humedad relativa**

La humedad relativa ( $H_r$ ) es la relación entre la fracción de vapor de agua en el aire y la fracción de vapor de agua en el aire saturado a la misma temperatura y presión atmosférica, o lo que es igual, la relación entre la presión de vapor del aire y la presión de vapor del aire saturado. La humedad relativa es adimensional y se expresa de forma decimal o como un porcentaje (al multiplicar el valor decimal por 100). En secado de granos se encuentran valores de humedad relativa entre 0,5 y 100 % (Badiali, 2003).



### **2.3.7.3. Humedad absoluta**

La humedad absoluta ( $H_a$ ) es la masa de vapor de agua contenida en el aire húmedo por unidad de masa de aire seco. Otros términos usados para humedad absoluta son relación de humedad y humedad específica. Los valores de humedad absoluta del aire de secado de granos son relativamente pequeños, variando desde 0,005 kg a 0,2 kg de agua por kg de aire seco (Badiali, 2003).

### **2.3.7.4. Temperatura del Bulbo Seco**

La temperatura del bulbo seco ( $T_{bs}$ ) es la temperatura del aire húmedo indicada por un termómetro común. En este texto, en cualquier lugar que el término temperatura se usa sin prefijo implicara temperatura del bulbo seco. Las temperaturas del aire de secado de granos varían desde 4,4 °C a 287,8 °C (Badiali, 2003).

### **2.3.7.5. Temperatura del Punto de Roció**

La temperatura del punto de roció ( $T_r$ ) es la temperatura a la cual se produce condensación de la humedad cuando el aire, con una determinada humedad absoluta es enfriado. Entonces, la temperatura del punto de roció puede considerarse como la temperatura de saturación correspondiente a la humedad absoluta y la presión de vapor del aire húmedo (Badiali, 2003).

### **2.3.7.6. Temperatura del Bulbo Húmedo**

Debería realizarse una distinción entre las temperaturas psicométricas y termodinámicas del bulbo húmedo. La temperatura psicométrica del bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ) es la temperatura del aire húmedo indicada por un termómetro cuyo bulbo está cubierto por una tela húmeda y expuesto a una corriente de aire que pasa sobre la tela a una velocidad de al menos 4,6 m/s (Badiali, 2003).

### **2.3.7.7. Entalpia**

La entalpia ( $H$ ) de una mezcla de aire seco-vapor de agua es el contenido de energía del aire húmedo por unidad de masa de aire seco por encima de una cierta temperatura de referencia. Dado que para el secado de granos nos interesan las diferencias en entalpia, la elección de la temperatura de referencia no tiene importancia. Los valores de entalpia del aire húmedo empleadas en secado de granos varían desde 23 kJ/kg a 314 kJ/kg de aire seco (Badiali, 2003).

### **2.3.7.8. Volumen Específico**

El volumen específico ( $v_e$ ) del aire húmedo se define como el volumen por unidad de masa de aire seco. La densidad específica del aire húmedo es igual a la recíproca de su volumen específico. El volumen específico del aire usado para secado de granos esta entre 0,78 m<sup>3</sup>/kg y 1,59 m<sup>3</sup>/kg de aire seco (Badiali, 2003).

### **2.3.7.9. Calor Específico**

Representa la cantidad de calor necesaria para aumentar en una unidad la temperatura del aire, del agua u otro material. El calor específico usado para aire es 1,00693 kJ/kg. K; para vapor de agua, el valor es 1,87569 kJ/kg. K (Badiali, 2003).

### **2.3.8. Cartas psicométricas**

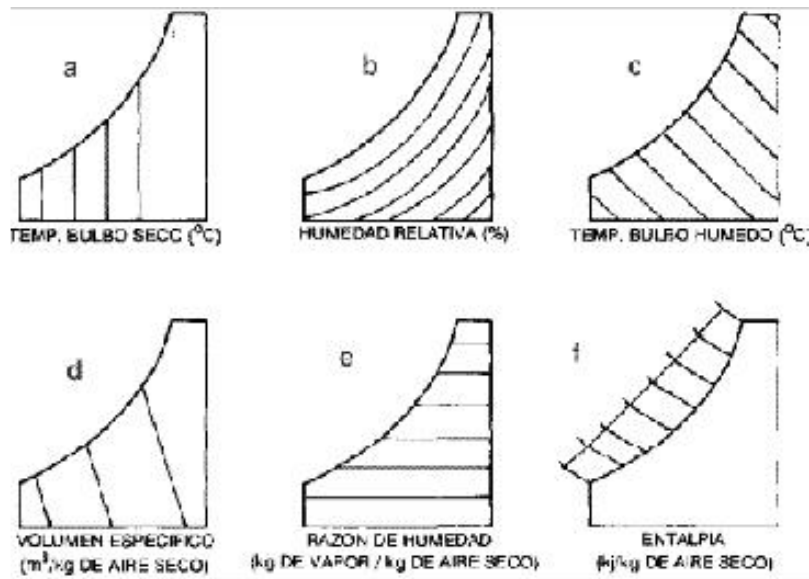
Para evitar cálculos psicométricos que consumen tiempo, los investigadores han preparado cartas especiales que contienen valores de las propiedades termodinámicas más comunes del aire húmedo. Se las denomina cartas psicométricas (Calderini, Abelego & Slafer, 2000). Se usan diferentes cartas psicométricas que difieren entre sí con respecto a la presión barométrica, rango de temperaturas, numero de propiedades termodinámicas incluidas y elección de coordenadas.

Las líneas de temperatura del bulbo seco constante corren rectas y hacia arriba. Las líneas de humedad absoluta (razón de humedad) son horizontales y los valores se leen sobre el eje vertical a la derecha de la carta. Las líneas de temperatura de bulbo húmedo, también denominadas líneas de enfriamiento adiabático, son rectas y hacen ángulos agudos con el eje vertical (Imagen 8a).

Las líneas de entalpia son oblicuas, líneas paralelas en la misma dirección que las líneas de temperatura de bulbo húmedo. Los valores de las líneas de entalpia se indican en una escala sobre el lado superior izquierdo de la carta (Imagen 8f).

El eje horizontal representa la línea de 0 % de humedad relativa (aire seco). Las líneas de humedad relativa más altas son curvadas y se desvían hacia arriba, comenzando en el ángulo inferior izquierdo de la carta. La curva de 100 % de humedad relativa es la curva de saturación (Imagen 8b). Los valores para la temperatura del punto de rocío, la temperatura de bulbo húmedo, y la temperatura de bulbo seco están indicadas sobre la curva de saturación.

Las líneas de volumen específico son rectas, oblicuas y con ángulos más agudos con respecto al eje vertical que las líneas de entalpia y de temperatura de bulbo húmedo. Las líneas de volumen específico también representan valores de densidad constante, ya que la densidad es igual a la recíproca del volumen específico (Imagen 8d).



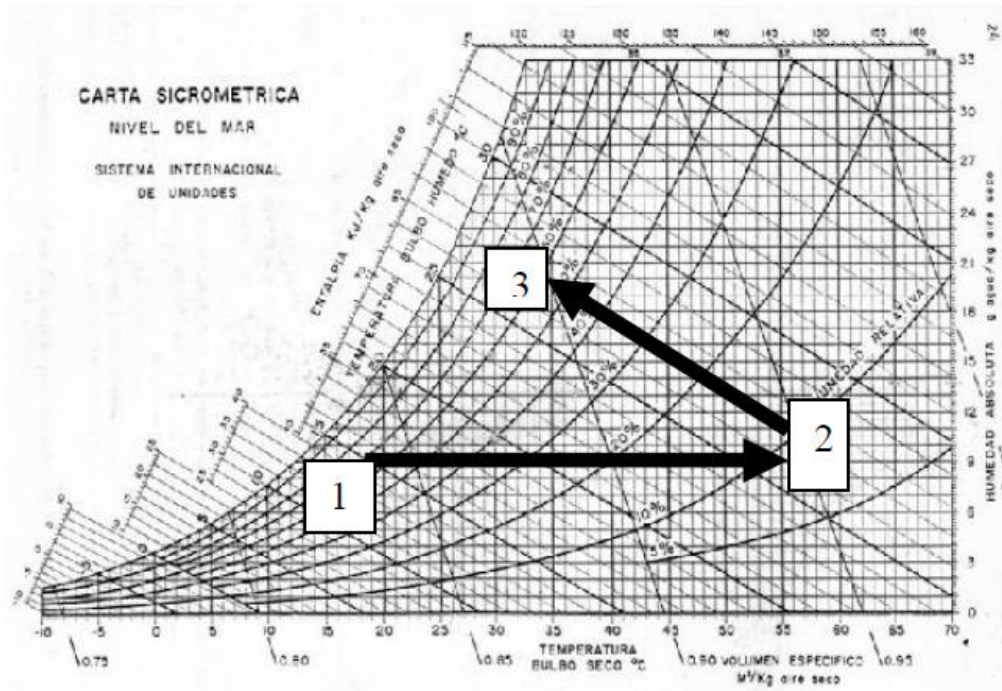
**Imagen 8.** Representación en la carta psicrométrica de las propiedades del aire

**Fuente:** Curso de Secado y Aireación de Granos, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. 2004.

### 2.3.9. Acondicionamiento de granos

Varios procesos relativos al acondicionamiento de granos pueden ser representados convenientemente sobre la carta psicrométrica: calentamiento y enfriamiento sensible, calentamiento con humidificación, enfriamiento con des humidificación y secado. El secado de granos es un proceso adiabático, esto significa que el calor requerido para la evaporación de la humedad del grano lo suministra únicamente el aire de secado, sin transferencia de calor o radiación del medio circundante.

El aire ambiente se calienta por el accionar de los quemadores, pasando desde el punto de estado 1 al punto de estado 2 (grafico 3). Se produce un aumento de la temperatura de bulbo seco, de la temperatura de bulbo húmedo, de la entalpia y del volumen específico; también se produce la disminución de la humedad relativa, en tanto que se mantiene constante o aumenta ligeramente la humedad absoluta (Badiali, 2003).



**Gráfico 3.** Representación gráfica sobre la carta psicrométrica del proceso de secado.

A medida que el aire pasa a través de la masa de grano húmedo, una gran parte del calor sensible del aire es transformado en calor latente de vaporización como resultado de la cantidad creciente de vapor retenido en el aire. Como consecuencia del paso a través de la masa de granos, el aire pasa desde el punto de estado 2 al punto de estado 3. Se produce la disminución en la temperatura del bulbo seco, e incrementos en la humedad absoluta, la humedad relativa, y la temperatura del punto de rocío. La entalpía y la temperatura del bulbo húmedo permanecen constantes durante el proceso adiabático de secado (Badiali, 2003).

### 2.3.10. Temperaturas de secado

La temperatura del aire de secado es el parámetro de mayor flexibilidad en un sistema de secado a altas temperaturas e influye significativamente en el volumen, la eficiencia de secado y en la calidad del producto final. Icaza & Jácome, (2012) manifiesta que un aumento de dicha temperatura significa un menor consumo de energía por unidad de agua evaporada y un mayor volumen de secado. En cambio, las temperaturas de secado más elevadas pueden causar daños térmicos más acentuados en los granos. La temperatura de secado, junto con

los flujos de aire y de granos, determina la cantidad de agua evaporada en un secador. A continuación se muestra algunos valores recomendados para el secado (Sripinyowanich & Noomhorm, 2013).

**Tabla 5.** Temperatura de funcionamiento de un secador

<b>PRODUCTO Y USO A QUE SE DESTINA</b>	<b>TEMPERATURA MÁXIMA RECOMENDADA PARA LA DESECACIÓN EN °C</b>
Grano para el consumo humano	57
Grano para elaboración y manufactura	60
Grano para semilla o para la fabricación de cerveza	43
Arroz para el consumo humano	43
Frijoles para el consumo humano	35

Fuente: INDUHORST

El valor de 43°C de temperatura de secado tabulada, coincide con los datos manejados por INDUHORST en los sistemas de secado, por tal razón basaremos el secado de la quinua en lecho fluidizado y lecho fluidizado pulsante con este valor ya que igual al arroz el fin de la quinua es el consumo (Icaza & Jácome, 2012).

### **2.3.11. El sobresecado**

Puede tener alguna ventaja cuando se vende grano al exterior, pues los compradores extranjeros obtienen una mercadería más seca, más segura, no están pagando agua y requieren menos volúmenes de transporte para un mismo tonelaje. La diferencia favorable para el vendedor se establecerá si los compradores están dispuestos a pagar un precio extra por ese sobresecado. Como desventaja tiene que puede provocar alteraciones en proteínas, aumento de granos quebrados o figurados o inhibición del poder germinativo en los destinados a semillas (Action, 2014).

Pero el sobresecado tiene otro costo extra: el mayor consumo de energía, que aumenta en mayor proporción cuanto más bajo es el contenido de humedad final. El sobresecado puede reducir la capacidad de secado entre 10 y 20%. Donde representa una pérdida material no

sólo para cerealistas, sino para la economía del país. Incluyendo el alto costo del secado por la inversión que representan los secadores y los equipos auxiliares, y los elevados valores de los consumos de combustible y energía eléctrica para su funcionamiento (de Lima et al., 2014).

### **2.3.12. Requisitos para el secado de granos**

De acuerdo a Corzo (2011) se consideró que ésta es una operación de ingeniería por lo tanto debe cumplir algunos requisitos mínimos.

- El secado de los granos debe superar o por lo menos igualar un mínimo exigible por las normas, siendo un requisito mantener la calidad nutritiva del grano, para ser aceptado comercialmente.
- Costos de operación suficientemente bajos, de manera de conferir al producto, un margen de competitividad adecuado, dentro del mercado que se quiere abordar.
- En términos de la preservación de la calidad proteica del grano se debe evitar el desprendimiento del germen, el cual engloba una porción considerable del contenido de proteína.
- Otra condición que debe cumplirse, es que el tratamiento que se aplique no debe fracturar los granos, ya que inclusive una fracción relativamente baja de granos rotos, comunica una apariencia de menor calidad al producto.

Todos los métodos deben contar como paso inicial el acopio y limpieza de los granos (separación de impurezas) (Corzo, 2011).

El beneficiado de la quinua es un proceso que se inicia con la limpieza preliminar del grano y el escarificado que es el pelado de una cascarilla delgada firmemente adherida al grano y con saponinas, elementos que le dan el sabor amargo. La saponina debe eliminarse y luego pasa por un proceso de limpieza adicional (Carvajal, 2011).

## 2.4. HUMEDAD

Según Torrecilla (2000) la curva de equilibrio de humedad, como la mostrada en el gráfico 8, permite definir tres tipos de humedades:

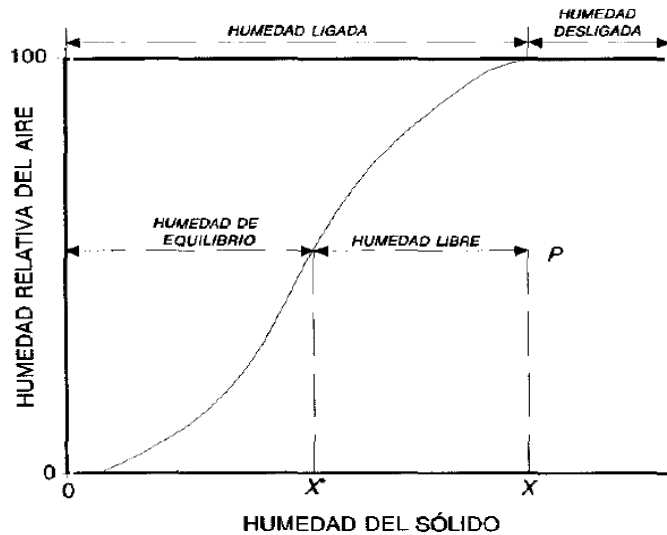


Gráfico 4. Curva de equilibrio de humedad en el diagrama

Fuente: Torrecilla (2000).

### 2.4.1. Humedad libre

Es el agua que ocupa las posiciones más alejadas de los constituyentes no acuosos; predominan los enlaces agua-agua; tiene propiedades similares al agua de las soluciones salinas diluidas; su flujo macroscópico se halla impedido, es congelable. Es evaporable cuando el grano desea alcanzar su equilibrio higroscópico. La entalpía de vaporización comparada con el agua pura esta inalterada. Se estima que el porcentaje de esta agua en alimentos de alta humedad (90 %) es del orden de 96 % (Fennema, 2000).

### 2.4.2. Humedad ligada

Está constituida por una capa molecular ligada a ciertos grupos moleculares de la materia y fuertemente polarizados. No es congelable a temperaturas de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y tampoco es



evaporable. La entalpia de vaporización comparada con el agua pura esta grandemente aumentada. Se estima que el porcentaje de esta agua en alimentos de alta humedad (90 %) es del orden de 0,5 - 0,4%. Su capacidad disolvente es nula (Fennema, 2000).

Esto se refiere a la humedad contenida por una sustancia que ejerce menos presión de vapor de equilibrio que la del líquido puro a la misma temperatura. La humedad ligada puede estar contenida dentro de las paredes celulares de la estructura de la planta, en combinación química suelta con el material celulósico, mantenida en pequeños capilares y grietas en todo el sólido (Chakraverty, 2014).

### **2.4.3. Humedad desligada**

Representa la humedad del sólido en contacto con aire saturado, dicho de otro modo, representa la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada. La cantidad de agua contenida en el sólido no está afectada por la presencia del sólido (Torrecilla, 2000).

## **2.4. HUMEDAD DE LA QUINUA**

La temperatura y la humedad son los dos factores más importantes que afectan la calidad de los granos durante el periodo de almacenamiento. El contenido de agua en los alimentos y los granos es uno de los criterios más importantes para la conservación de su calidad y su comercialización. Los alimentos en su estado natural están compuestos por materia seca y agua en cantidades específicas, por ejemplo la quinua contiene de 30 - 40% de agua al momento de la cosecha (Puerta, 2013).

La humedad de un producto se expresa en forma porcentual en base húmeda (ecuación 10) o en base seca (ecuación 11) como la cantidad de agua contenida en el producto húmedo o seco respectivamente, así:

$$\textit{humedad en base húmeda} = \frac{\textit{masa de agua}}{\textit{mas del producto}} * 100 \quad (10)$$

$$\text{humedad en base seca} = \frac{\text{masa de agua}}{(\text{masa del producto} - \text{masa de agua})} * 100 \quad (11)$$

El agua influye en la textura, sabor y calidad de los alimentos, pero es también una de las causas de su naturaleza perecedera por esa razón es de suma importancia el controlar los niveles de humedad en rangos de 10 a 12 % en ellos para así evitar su degradación (Puerta, 2013).

#### **2.4.1. Análisis de humedad**

El contenido de humedad de las muestras se determinó por el procedimiento propuesto por Ranganna (1986). Los valores del contenido de humedad en todas las muestras se transformaron en razones de humedad adimensionales suponiendo que el contenido de humedad final es el contenido de humedad en el equilibrio.

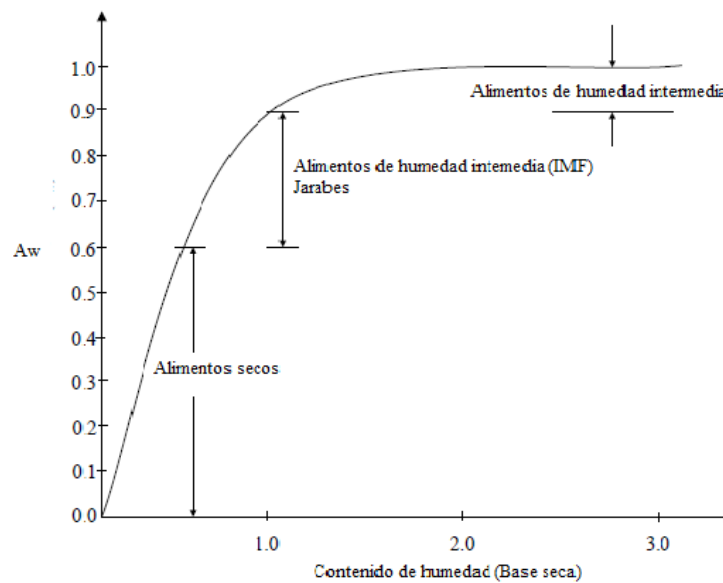
#### **2.4.2. Actividad de agua ( $A_w$ )**

La actividad de agua ( $A_w$ ) es un parámetro que indica la disponibilidad de agua en un alimento para que existan reacciones químicas, bioquímicas (Por ejemplo oxidación de lípidos, reacciones enzimáticas, reacción de Maillard y desarrollo microbiano) (Calle Benites & Aparicio Baidal, 2011).

Existe actividad de agua que limita el crecimiento de mohos, levaduras y bacterias. Es así, que la mayoría de las bacterias no crecen en actividad del agua ( $A_w$ ) debajo de 0,91, la mayoría de mohos y levaduras dejan de crecer a  $A_w$  menores de 0,70 y las levaduras a un

mínimo de  $A_w$  de 0,62, midiendo la actividad de agua es posible determinar que microorganismos son o no potenciales de alteración (Roos, 2010).

La actividad del agua ( $a_w$ ) es uno de los factores más críticos en la determinación de la calidad y seguridad de los bienes que se consumen diariamente. La actividad del agua afecta el tiempo de conservación, la seguridad, la textura, el sabor y el olor de los alimentos (Jangam et al., 2010).



**Gráfico 5.** Contenido de humedad versus Actividad de agua para diferentes tipos de alimentos

**Fuente:** Jangam et al., (2010).

El secado es un proceso que impide el deterioro por lo tanto conserva su calidad. Si los granos contienen un valor de humedad superior a 12,5% existe el riesgo de deterioro microbiológico causado por hongos y bacterias, daño físico (Puerta, 2013).

### **2.4.3. Preparación del material a secar**

La quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan), cuando es sometida a un lavado su propiedad higroscópica le permite ganar humedad y germinar cambiando sus características gasodinámicas e imposibilitando su fluidización.

La fluidización de la quinua en ese estado promueve la formación de canales preferentes, rotura del lecho, etc. produciendo un contacto inadecuado para la operación de secado; por ello como paso previo al secado se debe mezclar quinua previamente lavada y limpia con quinua seca (con humedad de equilibrio en condiciones ambientales), en proporciones 90% lavada, 10 % seca. De esta forma se produce una quinua con humedad entre el 30 y 35 % que es tratable en lecho fluidizado, desde el punto de vista gasodinámico.

## **2.5. TÉCNICA DE SECADO POR FLUIDIZACIÓN**

El secado por fluidización ofrece importantes ventajas sobre los demás métodos al tener una alta transferencia de calor y masa, es una técnica moderna poco desarrollada en nuestro país.

La Universidad Técnica del Norte y su Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas (F.I.CA.) después de realizar varias investigaciones a cargo del Dr. Ramón Cala PhD. sobre este tipo de secadores, tuvo la necesidad de la construcción de un módulo por lecho fluidizado en donde se realizaron pruebas y experimentos enfocados a mejorar las técnicas utilizadas en la industria ecuatoriana. A continuación, se efectúa un breve estudio de este fenómeno.

### **2.5.1. Fluidización y características del proceso**

Según Gómez (2010) la fluidización es el proceso mediante el cual las partículas sólidas se comportan como un fluido mediante suspensión a través de una corriente de gas o líquido.

El secado mediante fluidización convierte un lecho de partículas sólidas en una masa suspendida y expandida que posee muchas de las propiedades de un líquido (Dong et al., 2013).

La fluidización es una operación unitaria que posee características intermedias entre el desplazamiento de sólidos en el seno de un fluido, y el flujo de fluidos a través de partículas sólidas. Cuando un fluido atraviesa, de abajo arriba, un lecho de granos cuyo tamaño varía entre límites estrechos, se establece el gradiente de presión necesario para vencer el frotamiento (Sánchez et al., 2013).

Se da el nombre de fluidización al proceso de contacto que ocurre entre un sólido y un fluido (gas o líquido) en el cual el lecho formado por partículas sólidas finamente divididas se levanta y se agita por medio de una corriente ascendente de fluido.

Ahora bien, McCabe, Smith, & Harriott (1993), señalan que se habla de fluidización agregativa cuando los lechos de sólidos se encuentran fluidizados con gases, como el aire, donde la mayor parte del gas pasa a través del lecho en forma de burbujas o huecos que están casi exentos de sólidos, y solamente una pequeña fracción del gas fluye por los canales existentes entre las partículas, las cuales se mueven de forma errática.

En nuestro trabajo nos dedicaremos al estudio de un lecho fluidizado de gas-sólido.

### **2.5.2. Tipos de fluidización por la naturaleza del fluido**

Los sistemas líquido-sólidos se caracterizan por fluidizar de forma suave, homogénea o particulada. La altura hasta la que se expande el lecho puede ser mucho mayor a su altura inicial. En general los sistemas gas-sólido son de naturaleza agregativa o heterogénea, son conocidos también como lechos burbujeantes, este tipo de fluidización es más inestable, el movimiento de los sólidos es más vigoroso y la expansión del lecho es más limitada en relación a la fluidización que se da en los sistemas líquidos (Gupta y Sathiyamoorthy, 1999).

A diferencia de los lechos fluidizados líquido-sólido, el método de contacto gas-sólido presenta propiedades especiales muy útiles, por ello la mayor parte de aplicaciones industriales de la fluidización usan este método de contacto (Levenspiel y Kunni, 1991).

### **2.5.3. Regímenes de fluidización en lechos fluidizados gas sólido**

Por lo mencionado y debido a que los fines de este proyecto implican un sistema de fluidización gas-sólido, la información presentada concerniente a los regímenes de operación se encuentra referida a los sistemas gas-sólidos.

#### **2.5.3.1. Fluidización sin arrastre de partículas (Régimen Burbujeante)**

El principal fenómeno en este tipo de técnica es la distribución heterogénea de las partículas expandidas debido a burbujas presentes durante el proceso, las que son generadas por una serie de factores como una distribución desigual, una velocidad excesiva del aire que entra al lecho, un flujo turbulento, entre otros (Cadena, 2008).

Después de haber alcanzado la velocidad mínima de fluidización, si se incrementa la velocidad del gas se puede alcanzar la velocidad mínima de burbujeo. A esta velocidad las burbujas se forman en el paso del aire por la placa de contención del lecho, después ascienden a través del lecho de sólidos, crecen, alcanzan la superficie del lecho y finalmente explotan. En este régimen el gas atraviesa el lecho en forma de burbujas y de emulsión (gas + sólidos). El comportamiento durante el régimen burbujeante varía de un sistema a otro, puesto que se encuentran influidos por algunos factores (Gupta y Sathiyamoorthy, 1999).

En cámaras profundas y diámetros pequeños las burbujas pueden llegar a ocupar gran parte del diámetro de la columna, en este caso las partículas finas caerán alrededor de la burbuja, este tipo de lecho es conocido como flujo tapón axial, si las partículas son gruesas los sólidos alrededor de la burbuja son empujados hacia arriba y el lecho es llamado flujo tapón plano o de pared o flujo pistón de partículas (Levenspiel y Kunni, 1991).

#### **2.5.4. Transferencia de calor en un lecho fluidizado**

Una de las ventajas fundamentales es la alta transferencia de calor entre el fluido y el sólido, además la uniformidad en la mezcla de las partículas dentro del lecho es otro factor que permite una buena conductividad térmica en lechos verticales. Los tres modos de transferencia de calor son conducción, convección y radiación, en el secado por fluidización el método utilizado es el primero (Guarneros, 2005).

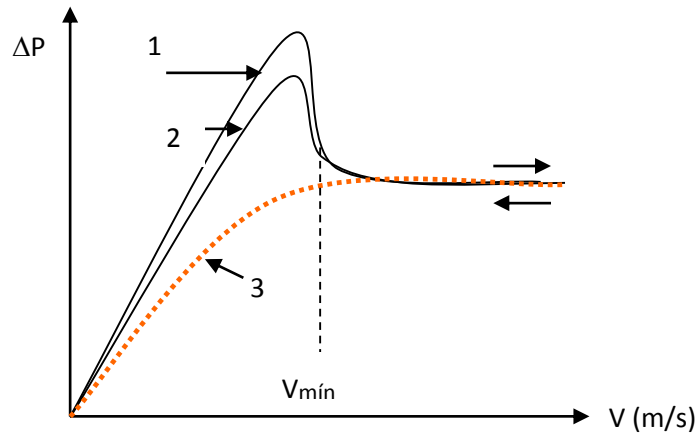
#### **2.5.5. Velocidad mínima de fluidización**

En el inicio del proceso de secado el lecho permanece inmóvil hasta un punto donde los granos empiezan a trasladarse igual que el aire que fluye entre ellos y llegan a un estado de suspensión, la velocidad del aire a la cual el producto pasa de estar fijo al movimiento se denomina velocidad mínima de fluidización (Reyes, 2012).

De acuerdo a Reyes (2012), el estado fluidizado es consecuencia de un equilibrio de fuerzas entre el fluido ascendente y el peso del sólido. En un lecho fluidizado el sólido se encuentra suspendido en el aire ascendente y el contacto sólido-gas que se produce es adecuado para transmisión tanto de energía como de materia. El estado fluidizado se produce a partir de una determinada velocidad del fluido, denominada velocidad de mínima fluidización.

Por encima de esta velocidad existe un margen de velocidades, de 1.5 a 2 veces la velocidad de mínima fluidización hasta alcanzar la velocidad mínima de completa fluidización, para la cual el lecho se encuentra perfectamente fluidizado. Es deseable que la velocidad mínima de completa fluidización sea lo más baja posible, ya que de esta forma el gasto energético necesario para mover el fluido es de igual forma reducido. Para obtener un buen funcionamiento del lecho fluidizado y un buen contacto sólido—gas es necesario que la velocidad del fluido ascendente esté comprendida entre la velocidad mínima de completa fluidización y la velocidad terminal o de arrastre (McCabe, Smith, & Harriott, 1993).

En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento teórico de un lecho formado por partículas esféricas de un mismo diámetro bajo el filtrado de un gas a través del lecho.



**Gráfico 6.** Comportamiento teórico de un lecho formado por partículas esféricas de un mismo diámetro bajo el filtrado de un gas a través del lecho. 1 y 2 Comportamiento del lecho de manera directa; 3- Comportamiento del lecho de manera inversa.

**Fuente:** (McCabe, Smith, & Harriott, 1993).

El pico de presión está relacionado con la compactación inicial de las partículas en el lecho. Cuando el gas alcanza la velocidad mínima de fluidización la caída de presión en el lecho mantiene un valor constante para todo valor de velocidad entre la velocidad mínima y la velocidad de arrastre de las partículas.

Supongamos que inicialmente el lecho de partículas sólidas se encuentra en reposo y que a través del mismo de forma ascendente fluye un gas con velocidad que aumenta progresivamente las partículas permiten el paso tortuoso del fluido sin separarse una de otras esto hace que la altura del lecho se mantenga constante. En esta etapa el fluido experimenta un aumento progresivo de la caída de presión del proceso (McCabe, Smith, & Harriott, 1993).



### 2.5.6. Velocidad de arrastre

De acuerdo a Rodríguez & Soler (2001) en su investigación “propiedades físicas y aerodinámicas de la cáscara de arroz”, la capa fluidizada subsiste hasta que se llega a una velocidad del agente fluidizante en la columna, igual a la velocidad de caída libre del cuerpo en el fluido, a partir de la cual el lecho se destruye por el transporte de las partículas fuera del sistema, y se le denomina velocidad de arrastre.



**Foto 1.** Partículas finas expulsadas del sistema por la velocidad de arrastre

Si la velocidad del fluido ascendente aumenta, se puede alcanzar la llamada velocidad de arrastre o terminal, que representa la velocidad para la cual el lecho es arrastrado por el aire y las partículas son empujadas hacia afuera por la fuerza que el aire ejerce sobre ellas.

### 2.5.7. Secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) mediante lecho fluidizado

El secado de quinua es de suma importancia para su almacenamiento, tanto para conservar sus propiedades germinativas o para el consumo humano. Según (Cala & Riera , 2010) en su investigación de Secado de arroz en un secador de lecho fluidizado pulsante los resultados obtenidos demostraron que la velocidad del secado en lecho fluidizado pulsante es mucho mayor que la del secado cuando se utiliza métodos tradicionales requiriendo menor tiempo

en alcanzar la humedad final deseada, así como una mayor homogeneidad en el producto final.

Resulta de gran importancia eliminar la humedad del grano para garantizar éxito en su almacenamiento por cierto periodo de tiempo hasta su posterior uso en la alimentación o con fines de semilla para la siembra, es por ello que resulta importante el estudio del proceso de secado, evitando así que los granos húmedos constituyan un medio ideal para el desarrollo de microorganismos, insectos y ácaros, además de conservar las propiedades germinativas del mismo.

De acuerdo con el tamaño del grano de arroz y a su densidad, resulta prometedora la utilización de las técnicas de fluidización para su procedimiento y secado, ya que se intensifica el proceso de intercambio de calor y masa entre el grano y el agente gaseoso secante, disminuyendo el tiempo de secado.

En este trabajo se realiza un estudio secado en lecho fluidizado, obteniendo una mayor uniformidad en el contenido de humedad final del grano, menor tiempo de secado, menores costos de operación, entre otras ventajas respecto al lecho fijo.

#### **2.5.8. Modelado matemático de las cinéticas de secado**

El modelado matemático ha sido ampliamente y efectivamente utilizado para el análisis de las cinéticas de secado de productos agrícolas. Es importante para el diseño y operación de secadores a condiciones ópticas de secado, así como permite predecir la temperatura, el tiempo y la humedad de las muestras que se estén secando. Como consecuencia, la validación de estos modelos depende del buen ajuste del modelo de secado utilizado.

Para este trabajo, los datos experimentales de las cinéticas de secado de cada una de las 3 temperaturas estudiadas fueron modelados con 2 modelos matemáticos que serán descritos posteriormente. Para estos modelos, la humedad adimensional (MR) de la quinua durante el secado por lecho fluidizado fue calculado a partir de la siguiente ecuación 12:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (12)$$

En donde, M0 es el contenido de humedad inicial; Me es el contenido de humedad en el equilibrio y Mt que es el contenido de humedad a los diferentes tiempos (Sacilik, 2007; Doymaz, 2011).

Posteriormente, se calculó la velocidad del secado (DR por sus siglas en inglés “drying rate” o W) de las semillas de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) usando la ecuación 13:

$$W = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (13)$$

En donde, t1 y t2 son tiempos de secado en min a diferentes tiempos durante el secado por lecho fluidizado; Mt1 y Mt2 es el contenido de humedad (b.h.) de las semillas de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) a los tiempos t1 y t2, respectivamente. Las curvas de la velocidad de secado, se utilizaron para evaluar qué tipo de mecanismo se lleva a cabo durante el secado de las semillas (Rafiee et al, 2009).

Los modelos matemáticos utilizados para ajustar las cinéticas de secado de diversos productos agrícolas y alimentarios, se dividen en tres categorías: teóricos, semi-teóricos y empíricos. Los modelos semi-teóricos son generalmente derivados de la simplificación de la solución general de las series de la ley de Fick, estos han sido usados ampliamente para el modelado de las cinéticas de secado de productos similares a las semillas estudiadas en esta investigación. Es por tanto, que en este trabajo se utilizaran estos modelos para el modelado matemático de las cinéticas de secado de las semillas de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan). Se seleccionaron dos modelos matemáticos, los cuales son frecuentemente utilizados en el secado de productos agrícolas similares.

### 2.5.8.1. Modelo de Page

El modelo de Page es una modificación empírica del modelo de Lewis, que corrige algunas deficiencias. Este modelo sugiere la utilización de dos constantes empíricas, las cuales han demostrado buenos ajustes para describir el secado de diversos productos agrícolas, como la soja, judías verdes, maíz y nueces de pistacho (Doymaz, 2011). El modelo está dado por:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^N) \quad (14)$$

Donde k y N son constantes del modelo.

### 2.5.9. Breve descripción de la metodología operativa

Según Cala (2010) el procedimiento experimental constará de las siguientes partes características de una investigación en lechos fluidizados:

- 1- Clasificación de los granos de quinua, determinación de sus parámetros físicos y geométricos fundamentales para la organización del lecho fluidizado.
- 2- Estudio gasodinámico con la determinación de la velocidad mínima de fluidización, así como las respuesta de los granos de quinua al flujo de aire fluidizado
- 3- Estudio comparativo del secado utilizando lecho fijo, lecho fluidizado.
- 4- El grado de humedad de las muestras se determinará por el método del muestreo y pesado consecutivo de la muestra.
- 5- Los resultados se analizan comparativamente y se elaborará un modelo para el secado (Cala & Riera , 2010).

### 2.5.10. Ventajas de la utilización de lecho fluidizado en la industria

Entre las ventajas de la utilización del lecho fluidizado en la industria se encuentran los siguientes:

- El comportamiento de las partículas como un fluido permite controlar los procesos fácilmente.
- El buen mezclado de los sólidos satisface el comportamiento isoterma a través del reactor, de ahí que se controle de forma simple.
- Además, el mezclado homogéneo de los sólidos genera una inercia térmica que impide cambios bruscos de temperatura y da un amplio margen de seguridad para evacuar el calor en procesos muy exotérmicos.
- La circulación de partículas entre dos lechos hace posible extraer, o añadir, grandes cantidades de calor necesario en grandes reactores.
- Se puede utilizar en operaciones a grandes escalas.
- Los coeficientes de transferencia de calor y de masa son altos comparados con otros procesos.
- La transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto sumergido en éste es alta, por lo que se necesitan pequeñas áreas en los intercambiadores (Gómez, 2010).

### 2.5.11. Ventajas de la utilización de lecho fluidizado a nivel agroindustrial

Entre las ventajas de la utilización del lecho fluidizado a nivel agroindustrial se encuentran los siguientes:

- **Secar eficientemente** *por ejemplo productos extruidos*: productos extruidos de masas húmedas se pueden secar en el lecho fluidizado de manera eficaz y suave.
- **Proteger las aromas** *por ejemplo aceite de limón*: con la granulación por pulverización y el micro-encapsulación el aroma líquido de limón se encapsula en una matriz sólida y se distribuye homogéneamente.

- el producto final es un granulado de aroma libre de polvo, compacto y protegido contra la luz y la oxidación.
- **Estabilizar las sustancias activas** *por ejemplo enzimas:* enzimas líquidas se pulverizan sobre una sustancia portadora y se secan cuidadosamente. la actividad enzimática se mantiene. el granulado final de la sustancia activa es de flujo libre y puede ser procesado sin problemas.
- **estabilizar las mezclas** *por ejemplo distribuidor automático de bebidas:* mezclas de polvo de leche en polvo, azúcar, café instantáneo y aromas se convierten en un compuesto altamente soluble y libre de segregación con una densidad aparente definida.
- **Mejorar la solubilidad** *por ejemplo curry en polvo:* debido a su alto contenido de grasa la materia prima es poco soluble, como polvo instantáneo se puede preparar en agua caliente de forma rápida y libre de grumos.
- **Formar los líquidos** *por ejemplo extracto de malta:* el extracto concentrado se puede transformar en un granulado seco. en esta forma es más estable, duradero y versátil que en forma líquida (NEOTEC, 2010).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Las pruebas preliminares para el proceso de secado de quinua *Chenopodium quinoa* se llevaron a cabo en la Universidad Técnica del Norte, en los laboratorios de la FICA (Facultad Ingeniería en Ciencias Aplicadas), ubicados en la provincia de Imbabura, ciudad de Ibarra en la Parroquia de Azaya.

##### 3.1.1. Ubicación del experimento.

**Tabla 6.** Ubicación y datos meteorológicos del área de experimentación.

Provincia	Imbabura
Cantón	Ibarra
Parroquia	Azaya
Sitio	Laboratorios FICA, carrera de ingeniería textil.
Temperatura media	17,7 °C
Altitud	2357 m.s.n.m.
HR. Promedio	65%
Pluviosidad	503 – 1000 mm. Año

Fuente: (INAMHI, 2015).

### **3.2.MATERIALES Y EQUIPOS.**

#### **3.2.1. Materia prima.**

Granos de Quinoa *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

#### **3.2.2. Equipos e Instrumentos.**

Manómetro

Balanza analítica

Clasificador

Mufla

Termómetro

Material de vidrio (cajas Petri, probetas, pipetas, vaso de precipitación).

Recipientes plásticos para lavado, almacenado y tomo de muestras).

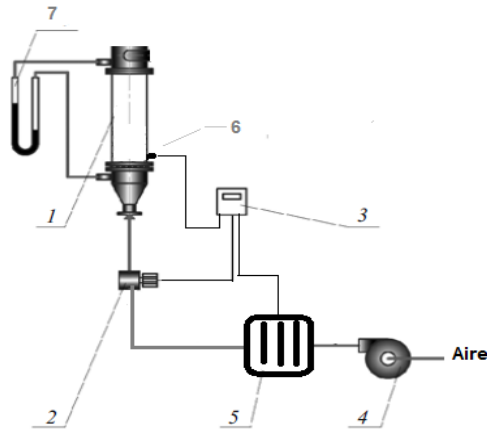
#### **3.2.3. Maquinaria**

Secador de lecho fluidizado

##### **2.2.3.1. Esquema de la instalación experimental**

Según Cala, (2007), inicialmente se construyó la instalación experimental con una altura de 50 cm y forma cilíndrica para un mejor diseño de rejilla. El esquema de la Instalación experimental se muestra a continuación:





**Figura 1.** Instalación experimental

Donde:

- 1- Reactor de columna cilíndrica de acrílico transparente
- 2- Control de pulsaciones
- 3- Unidad de captura, almacenamiento y procesamiento de datos.
- 4- Soplador generador de flujo de aire
- 5- Sistema de calentamiento
- 6- Termocupla
- 7- Manómetro diferencial con columna de agua.

El secador de lecho fluidizado en si es de diámetro variable formado por cilindros de plexiglass, material acrílico transparente que permite la visualización del proceso de fluidización que se estudia de 100 cm de altura y diámetros de 13 y 18 cm, de modo que pueden ser intercambiados en el reactor, la quinua es soportada por un distribuidor de plato perforado.

El control de todos los parámetros medidos en el proceso, como son temperatura del lecho, velocidad del flujo, se realiza con la Unidad de Captura, Almacenamiento y procesamiento de datos de la National Instruments NI cDAQ-9139, la cual realiza la inter fase con el secador de lecho fluidizado y su computador interno a través del Software LabVIEW.

### **3.3.MÉTODOS**

#### **3.3.1. Factores en estudio**

Los parámetros en estudio están constituidos por la temperatura y velocidad del aire.

**Factor A:** Temperatura

A1: 40 °C

A2: 45 °C

A3: 50 °C

**Factor B:** Velocidad de flujo de aire

B1: 0,5 m/s

B2: 0,68 m/s

B3: 0,86 m/s

#### **3.3.2. Tratamientos**

Se evaluarán 9 tratamientos, producto de la combinación de: temperatura y velocidad de flujo de aire.

**Tabla 7.** Descripción de los rangos de temperatura (A) y velocidad de flujo de aire (B).

Tratamiento	Nomenclatura	Descripción
T1	A1B1	40° C y 0,5 m/s.
T2	A1B2	40° C y 0,68 m/s.
T3	A1B3	40° C y 0,86 m/s.
T4	A2B1	45° C y 0,5 m/s.
T5	A2B2	45° C y 0,68 m/s.
T6	A2B3	45° C y 0,86 m/s.
T7	A3B1	50° C y 0,5 m/s.
T8	A3B2	50° C y 0,68 m/s.
T9	A3B3	50° C y 0,86 m/s.

### 3.3.3. Diseño Experimental.

Se utilizara un Diseño Completamente al Azar con un arreglo factorial (AxB) +1 con nueve tratamientos y tres repeticiones, donde A, representa la temperatura, B la velocidad de flujo de aire y como testigo se tomara como referencia el método de secado de Quinoa por estufa.

### 3.3.4. Características del Experimento.

**Tabla 8.** Características del experimento.

Tratamientos	9
Repeticiones	3
Unidades experimentales	27
Testigo	3
Total unidad experimental	30

### 3.3.5. Análisis Estadístico.

**Tabla 9.** Análisis de la Varianza

Fuentes de variación	Grados de libertad
Total	29
Tratamientos	8
Factor A	2
Factor B	2
A x B	4
Testigo versus Resto	1
Error Experimental	12

### 3.3.6. Análisis Funcional

Tratamientos: Tukey al 5%

Factores: Diferencia Mínima Significativa al 5%

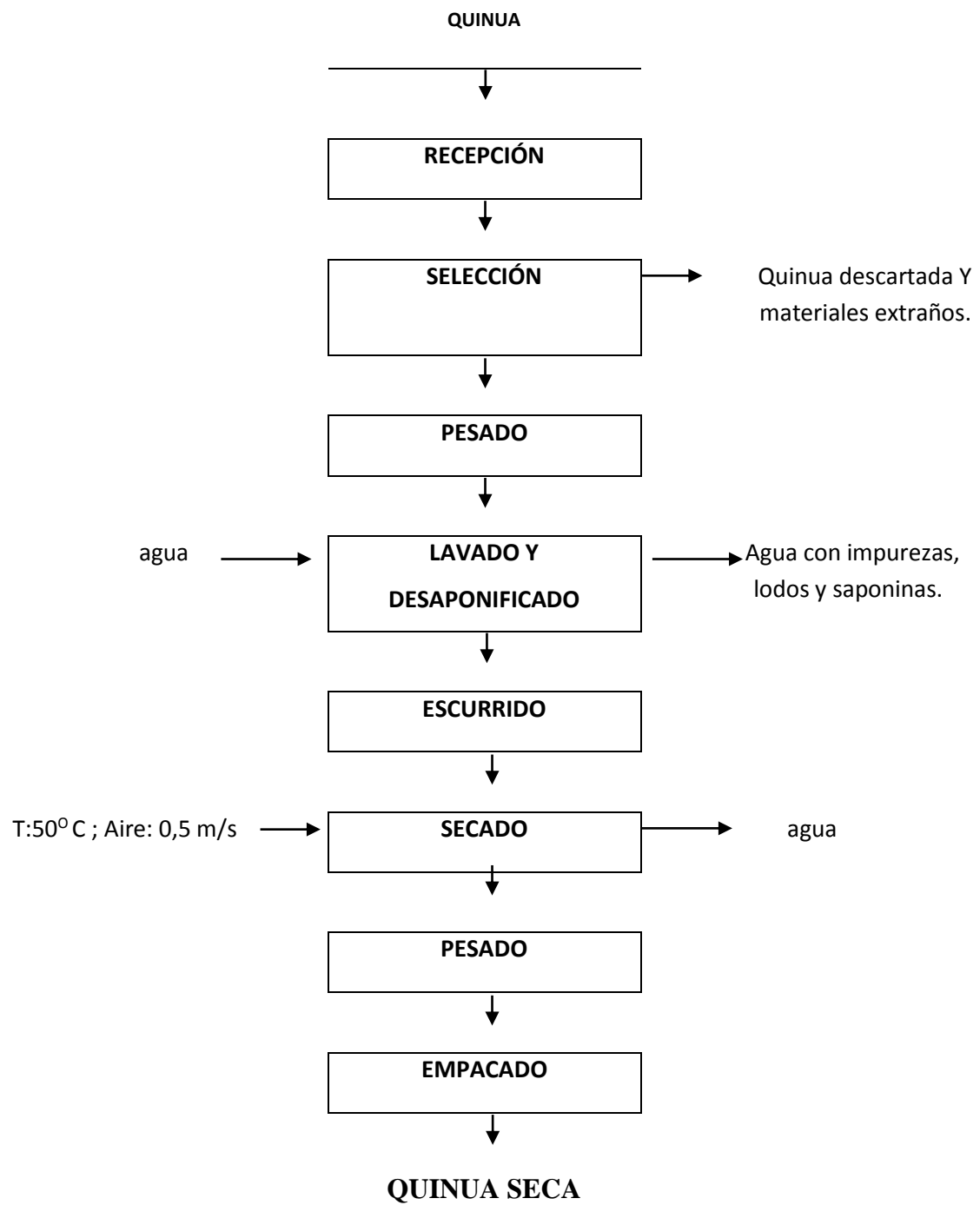
Coefficiente de variación.

### 3.3.7. Variables a Evaluarse.

#### 3.3.7.1. Variables Cuantitativas.

- Peso inicial
- Humedad
- Actividad de agua
- Proteína
- Eficiencia del proceso de secado.

### 3.4.MANEJO ESPECÍFICO DEL EXPERIMENTO.



### **3.5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE QUINUA *Chenopodium quinoa* (INIAP TUNKAHUAN) MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO.**

#### **3.5.1. Recepción**

La materia prima fue adquirida, observándose que se encuentre libre de materiales extraños como material vegetativo, residuos de suelo, piedras, plásticos entre otros que afecten la calidad o el mismo proceso en sí. La quinua en grano debe presentar un color natural y uniforme, característico de la variedad, debe estar libre de olores producidos por contaminación de mohos o por una mala conservación u otros olores objetables.



**Foto 2.** Recepción de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

#### **3.5.2. Selección**

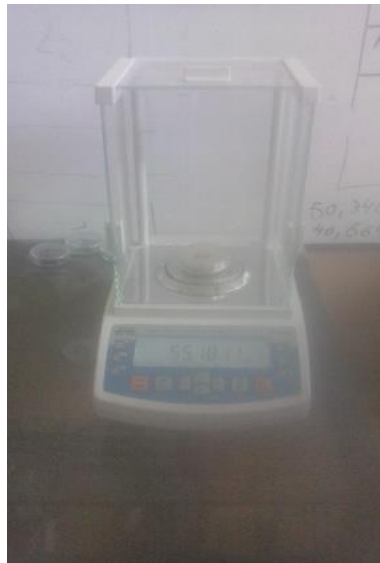
Se tomaron 500 gramos de quinua que pasaron a través de un juego de tamices con diferentes diámetros en micras, se trabajó con una clasificadora mecánica. Según la norma NTE INEN 1673:2013(Primera revisión), el grano de quinua por su diámetro se clasifica en cuatro categorías: tamaño ‘extra grande’ (mayores a 2,00 mm), tamaño ‘grande’ (1,70 a 2,00 mm), tamaño ‘mediano’ (1,40 a 1,70 mm) y tamaño ‘pequeño’ (menores a 1,40 mm). En la categoría en la cual se encontró la ‘Quinua INIAP Tunkahuan’ con la que se trabajó fue de “medianos” con diámetros mayores a 1,4 mm.



**Foto 3.** Los tamices estándar Tyler

### **3.5.3. Pesado**

Posteriormente a la selección, se tomaron muestras de quinua con un peso aproximado de 280 g utilizando una balanza, luego se procedió a registrar su peso siendo este dato la unidad experimental.



**Foto 4.** Balanza analítica

### **3.5.4. Lavado y desaponificado**

Los granos de quinua seleccionados fueron sometidos a un lavado por inmersión en un recipiente plástico, se los sumergió en una cantidad de agua determinada (entre 1 a 2 litros

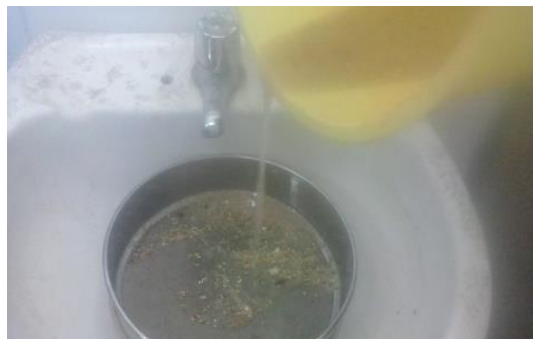
de agua) dependiendo del grado de suciedad con el único fin de eliminar residuos de suelo y saponina contenidos en los granos, esto se lo realiza agitando y fregando con la palma de la mano los granos constantemente.



**Foto 5.** Lavado y desaponificado

### **3.5.5. Escurrido**

Los granos de quinua se colocaron en un tamiz con un diámetro de 1,18 mm con el objeto que fluya solamente el agua que queda después del lavado para luego someterlos a un oreado de 3 minutos con el fin de que reduzcan en porcentaje de agua.



**Foto 6.** Escurrido

### **3.5.6. Secado**

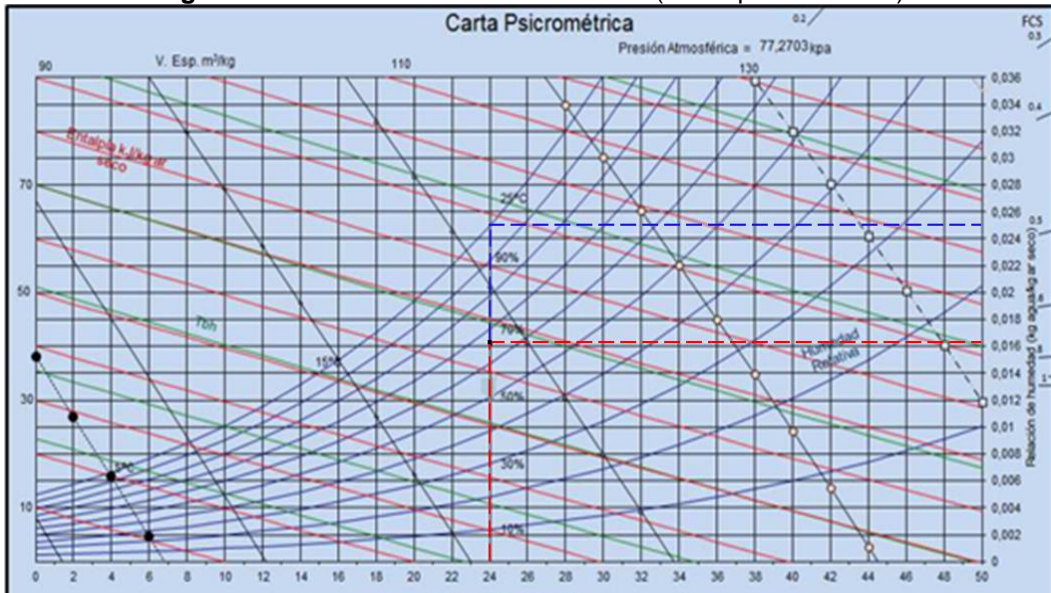
Antes del proceso de secado se determinó las propiedades del aire que se utilizó para secar el producto el cual se analizó con la tabla psicométrica.



**Tabla 10.** Características del aire desecante

DÍA	TRATAMIENTO	TEMPERATURA BULBO SECO	TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO
1	1	27	20
2	2	26	18,5
3	3	24	16,5
4	4	21	17
5	5	22	18,5
6	6	25	18
7	7	26	19
8	8	22	18
9	9	24	16
$\Sigma$		217	161,5
X=		24,11	17,94

**Figura 2.** Condiciones del aire de secado (Tabla psicrométrica)



Temperatura de bulbo seco: 24°C

Temperatura de bulbo húmedo 18°C

Humedad relativa: 65%

Humedad absoluta: 0,0161

Humedad de saturación: 0,0251

Se tomaron muestras de la unidad experimental y fueron sometidos al secado por el método de la estufa para determinar los valores de la humedad y el periodo de tiempo en el cual llega a rangos de aceptabilidad siendo estos datos los del testigo, se tomaron los datos en diferentes periodos de tiempo que se presentan en el ANEXO 1.

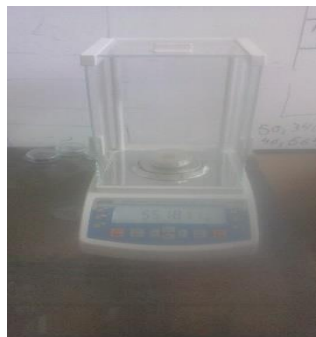
Los granos de quinua se introdujeron al secador de lecho fluidizado con humedades iniciales entre 25 y 30 % dependiendo de las características de la quinua en un cilindro con un diámetro de 1,4 mm. Se tomó nota del tiempo y peso que fue perdiendo el producto durante el proceso, con intervalos de 1,5 y 3 min, para todos los niveles de temperatura. Se usó un cronómetro y una balanza electrónica, llegando a obtener un peso constante para cada especie. Este proceso se lo realizó manteniendo constante la velocidad del aire (0,5 m/s, 0,68m/s y 0,86 m/s) dependiendo de los tratamientos.



**Foto 7.** Secado en el reactor de fluidización.

### **3.5.7. Pesado**

Los granos de quinua se pesaron con la ayuda de una balanza electrónica con el fin de determinar rendimientos a través del balance de materiales y el nivel de humedad perdido.



**Foto 8.** Balanza analítica

### **3.5.8. Envasado**

El producto seco se colocó en recipientes plásticos con tapa rosca los cuales nos brindan una máxima impermeabilidad posible conservándose de buena forma. Esta actividad se realizó de manera manual con la ayuda de guantes. Cada recipiente sirvió de muestra de cada tratamiento para realizar el análisis del producto terminado, tales como: físico químicos (actividad del agua, proteína).

## **3.6.MÉTODOS DE EVALUACIÓN**

### **3.6.1. Antes del Proceso**

#### **3.6.1.1. Determinación de la velocidad mínima de fluidización**

Para el estudio y determinación de las velocidades mínima de fluidización y la velocidad de arrastre de las partículas de quinua se utilizó un secador de lecho fluidizado con 2 cilindros con diámetros de 13 y 18 cm, con una altura del lecho igual al diámetro del cilindro utilizado.

Muestras de quinua fueron procesadas, evaluándose las siguientes variables:

Diámetros de boquilla del secador	A1=13cm pequeño
	A2=18cm medio
Alturas de lecho	B1=1 diámetro
	B2=1/2 diámetro

Los experimentos se llevaron a cabo en el secador de lecho fluidizado en condiciones ambientales.

### **3.6.1.2. Procedimiento para la determinación de la velocidad mínima de fluidización**

La metodología utilizada para la determinación de la velocidad mínima de fluidización fue realizada de acuerdo a Pujos (2015) en su trabajo de investigación “diseño de un sistema de fluidización por lotes para granos a escala de planta piloto” donde determino la velocidad mínima de fluidización para el maíz soja y trigo.

- Se cargó el grano en la columna de fluidización. Para cada grano en estudio se probaron dos alturas ya planteadas respectivamente. En todos estos experimentos se utilizó un distribuidor de aire tipo malla.
- Se determinó visualmente (de forma aproximada) la velocidad mínima de fluidización.
- Se midió la presión manométrica en un punto de la columna, durante 240 s a 4 diferentes velocidades de circulación de aire: a la velocidad mínima de fluidización, a dos, cuatro y seis veces este valor.
- Se adquirió los datos de presión y velocidad en el computador cada segundo.

### **3.6.1.3. Tratamiento de datos**

Luego de haber obtenido los datos correspondientes se realizó el siguiente proceso:

- En una hoja de Excel se construyó una tabla con los datos de velocidad y presión manométrica.
- Se halló los promedios de cada variable.

- Se determinó la desviación estándar de los valores de presión manométrica para cada valor de velocidad.
- Se construyó la curva de velocidad versus desviación estándar para cada nivel probado.
- Se seleccionó la altura del lecho para la cual se obtuvo la mayor fluctuación de presión, ya que esta favorece la fluidización.

#### **3.6.1.4. Materia prima**

Las primeras variables medidas son la humedad de la materia prima fresca, estas se determinaron al inicio del proceso.

#### **3.6.1.5. Humedad**

La humedad es un parámetro muy importante que influye en la vida útil de productos. La determinación de la humedad para la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) se realizó con el fin de conocer la cantidad de agua que contiene la quinua al inicio del proceso y se determinó con la ayuda de una estufa. El análisis se lo efectuó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica del Norte.

#### **3.6.2. Durante el Proceso**

Durante el proceso de deshidratación se determinó la humedad, el peso y el tiempo de secado para la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

### **3.6.2.1. Humedad inicial**

La humedad es un parámetro muy importante que influye en la vida útil de productos. La determinación de la humedad para la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) se realizó con el fin de conocer la cantidad de agua que contiene la quinua al durante el proceso y se determinó con la ayuda de una estufa. El análisis se lo efectuó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica del Norte.

### **3.6.2.2. Determinación del Tiempo de Secado.**

Según Soto et al. (2010) en su investigación “Características de secado de nopal (*Opuntia Ficus-indica*) por lecho fluidizado” La velocidad de secado se calculó a partir de las pendientes de las curvas de contenido de humedad contra el tiempo.

### **3.6.3. Después del Proceso**

#### **3.6.3.1. Análisis del producto terminado**

Al producto terminado se realizó los siguientes análisis; humedad, proteína y actividad de agua siendo estos los de mayor relevancia.

#### **3.6.3.2. Humedad**

La humedad es un parámetro muy importante que influye en la vida útil de productos. La determinación de la humedad para la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) se realizó con el fin de conocer la cantidad de agua que contiene la quinua al final del proceso

y se determinó con la ayuda de una estufa. El análisis se lo efectuó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas de la Universidad Técnica del Norte.

### 3.6.3.3. Proteína

Se realiza para determinar el contenido de proteína de la Quinoa. Esta variable se evalúa mediante la utilización del método señalado en la norma INEN 1670.

El contenido de proteína total en porcentaje se obtiene aplicando la ecuación 15:

$$PT = \frac{1,4 * 6,25(V * NV * N)}{m} \quad (15)$$

Dónde:

PT = contenido de proteína total.

V = volumen, en cm<sup>3</sup> de ácido sulfúrico introducido en el vaso.

N = normalidad de la solución de ácido sulfúrico.

V' = volumen, en cm<sup>3</sup> de NaOH consumido en la valoración.

N' = normalidad de la solución de NaOH.

m = masa de la muestra, en gramos.

### 3.6.3.4. Actividad de agua

Para el análisis de dicha variable se realizó en el equipo marca Aw-WERT - MESSER, para cada especie. La actividad de agua tiene un valor máximo de 1 y mínimo de 0. El análisis se

lo realizó en los laboratorios de la Facultad en ciencias Agropecuarias y Ambientales de la Universidad Técnica del Norte (Anexo 2).

#### **3.6.3.5. Efectividad del Proceso.**

Se realiza una comparación entre el método extensivo con el método por lecho fluidizado para poder determinar la rentabilidad y cuál de los métodos brinda los mejores resultados al momento de haber realizado el secado comparando la eficiencia del proceso de secado por lecho fluidizado con el método de secado en estufa.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se muestra los resultados obtenidos en las variables de estudio de la investigación: “SECADO DE QUINUA *Chenopodium quinoa* (INIAP TUNKAHUAN) MEDIANTE LECHO FLUIDIZADO”.

#### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada en la investigación fue recolectada en:

**Tabla 11.** Condiciones ambientales de la Ciudad de Ibarra.

Provincia	Imbabura
Cantón	Ibarra
Altitud	2776 m.s.n.m.
Temperatura	13°C

Fuente: (INAMHI, 2015).

Se realizó un estudio previo de las propiedades físicas y aerodinámicas de los granos de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para tener un control apropiado de la operación de secado. Estas actividades se realizaron en el laboratorio de la Universidad Técnica del Norte donde se determinaron las siguientes:

- Granulometría
- Diámetro medio
- Densidad real y aparente
- Porosidad
- Velocidad mínima de fluidización

## 4.2.VARIABLES EVALUADAS

### 4.2.1. Estudio gasodinámico de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

#### 4.2.1.1.Granulometría

El estudio granulométrico se lo realizó por medio del tamizado de 500 g de quinua utilizando un conjunto de tamices estándares (norma americana). La retención de los granos entre tamices consecutivos se muestra en la tabla 12.



**Foto 9.** Tamices estándares

**Tabla 12.** Distribución de los granos de quinua por tamices.

Tamices $d_i$ (mm)	$d_{i\text{ medio}}$ (mm)	$M_i$ (kg)	$X_i$ (%)
2,00	2,00	0,000075	0,15
1,70	1,85	0,02225	4,45
1,40	1,55	0,43365	86,73
1,18	1,29	0,00835	1,67
1,00	1,09	0,0031	0,62
0,18	0,59	0,0319	6,38
	$M_t =$	0,500	100 %

Donde:

M<sub>i</sub>.- es la masa de quinua retenida entre dos tamices consecutivos.

M<sub>t</sub>.- 0,500 kg. Es la masa total de quinua utilizada.

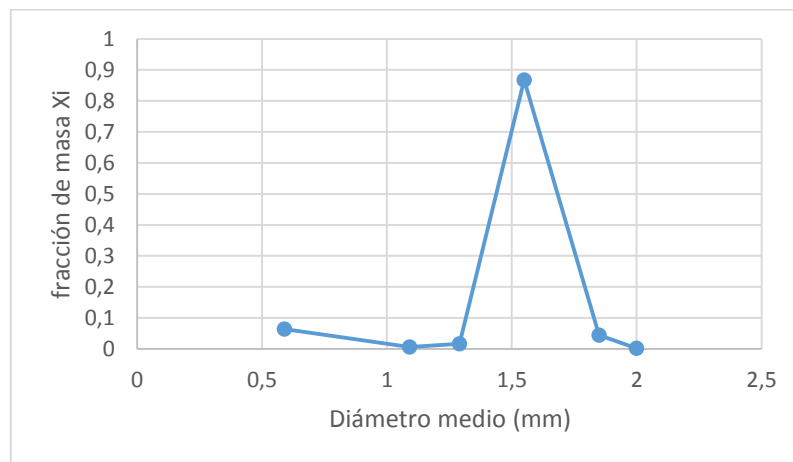
X<sub>i</sub>.- es la fracción de esa masa retenida respecto a la masa total de quinua.

$$X_i = (M_i/M_t) * 100$$

De acuerdo a Rodríguez & Soler (2001) en su investigación “propiedades físicas y aerodinámicas de la cáscara de arroz”, la velocidad tanto de arrastre y velocidad mínima de fluidización es directamente proporcional al diámetro medio de la partícula a mayor diámetro de la partícula la velocidad de arrastre es mayor igualmente para la velocidad mínima de fluidización.

En el gráfico 7 se muestra la distribución de la quinua de acuerdo al diámetro de sus granos

**Gráfico 7.** Distribución de los granos de quinua por su diámetro



Como se puede apreciar del gráfico anterior la quinua utilizada presenta un 86,73 % de sus granos con un diámetro de 1,55 mm. Que según la norma INEN 1673:2013 el tamaño del grano entra en la categoría de mediano.

#### 4.2.1.2. Diámetro medio

El cálculo del diámetro medio o equivalente de la quinua se realiza por la fórmula 16 (Leva, 1959).

$$d_e = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad (16)$$

$x_i$ .- es la sumatoria de las masas de quinua retenida entre los tamices consecutivos.

$d_i$ .- es la sumatoria de los diámetros de cada tamiz.

Obteniendo el valor de  $d_e = 1,5$  mm.

#### 4.2.1.3. Determinación del volumen real y aparente

Se realizó un estudio previo de las propiedades físicas y aerodinámicas de los granos de quinua *Chenopodium quinua* (INIAP Tunkahuan) para tener un control de las mismas durante la determinación de la velocidad mínima de fluidización.

**Peso muestra** = 71,26 g

**Volumen Aceite** = 132 ml

- Se tomó los 71,26 gramos de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) y fueron colocados en una probeta donde se miró el volumen aparente o el altura que tiene esa cantidad de quinua en la probeta.

**Volumen aparente muestra** = 105 ml

- Se vierte aceite hasta que cubra los granos.

**Volumen aceite + volumen de la muestra** = 110 ml

- Se separó el aceite de los granos y se toma el valor del aceite

**Volumen aceite restante = 82 ml**

- Se resta el volumen de aceite para el volumen de aceite restante

$$132\text{ml} - 82\text{ml} = 50 \text{ ml}$$

- Determinamos el volumen real de la muestra

$$110 \text{ ml} - 50 \text{ ml} = 60 \text{ ml}$$

Los valores obtenidos son los siguientes:

<b>Muestra de quinua inicial</b>	71,26 g
<b>Volumen real de la quinua</b>	60 ml
<b>Volumen aparente de la quinua</b>	105 ml

#### 4.2.1.4. La densidad aparente y real

Esta representa la densidad del grano de quinua sin compactar y tiene un valor menor que la densidad real de la quinua debido a la existencia de espacios vacíos entre los granos y que está ocupada por aire. Se hizo uso de la ecuación 1.

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{\text{masa de la muestra}}{\text{volumen aparente}} = \frac{71,26 \text{ g}}{105 \text{ cc}} = 0,6787 \text{ g/cc}$$

$$\text{Densidad Aparente}(\rho_A) = 678 \text{ kg/m}^3$$

Se define como la relación entre la masa de la partícula y el volumen del material sólido. Para la determinación de la densidad real de la quinua se utilizó el método del picnómetro, utilizando aceite mineral extra fluido como líquido picnométrico. El experimento fue replicado 3 veces y se obtuvo el valor medio de la densidad real de la quinua. Se hizo uso de la ecuación 2.

$$\text{Densidad Real} = \frac{\text{masa de la muestra}}{\text{volumen real}} = \frac{71,26 \text{ g}}{60 \text{ cc}} = 1,1877 \text{ g/cc}$$

$$\text{Densidad Real}(\rho_R) = 1187,72 \pm 40 \text{ kg/m}^3$$

#### 4.2.1.5. Determinación experimental de la porosidad real

Con el valor de la densidad aparente y la real se puede determinar valores de la porosidad inicial de la capa antes de la fluidización o capa inerte utilizando la ecuación 17:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (17)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{678}{1187,72}$$

$$\varepsilon = 0,43$$

$\rho_a$  = porosidad aparente

$\rho_r$  = porosidad real

Obteniendo el valor  $\varepsilon = 0,43$  para la porosidad del lecho fijo o de bulto.

Para velocidades mayores a la velocidad mínima de fluidización del agente fluidizante a través del secador de lecho fluidizado se observa un aumento de la altura del lecho en función de la velocidad (Fadhil et al., 2014).

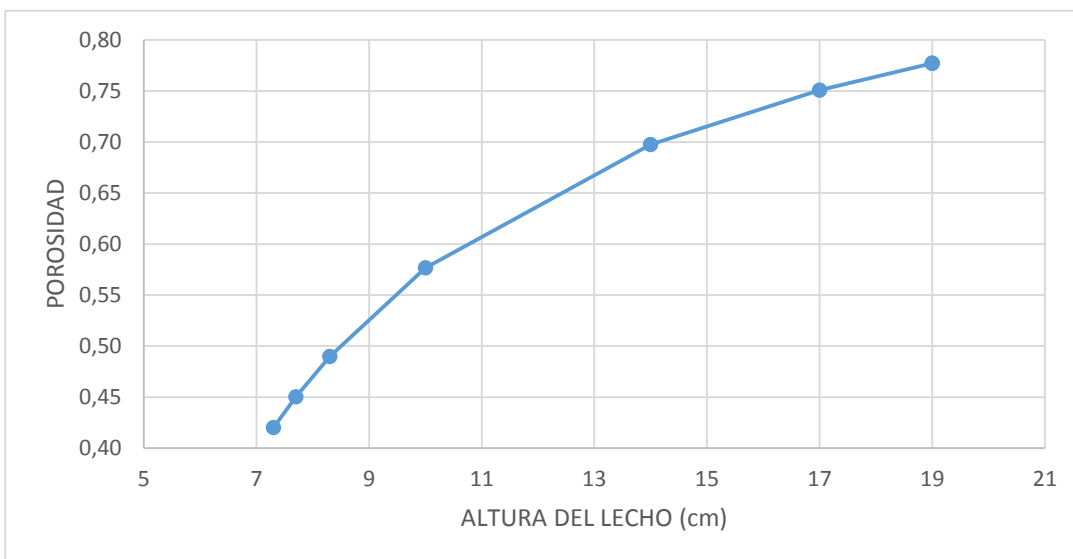
En la tabla 13 se muestran los valores de porosidad en función de la altura del lecho.

**Tabla 13.** Valores de porosidad en función de la altura del lecho.

Velocidad (m/s)	Porosidad relación 0-1	Altura (cm)
0 hasta 0,38	0,42	7,3
4,3	0,45	7,7
4,9	0,49	8,3
5,5	0,58	10
6,2	0,69	14
9	0,75	17
10,5	0,78	19
12,2	0,78	19

En el gráfico 8 se muestra la dependencia de la porosidad del lecho fluidizado de quinua en función de la altura del lecho expandido.

**Gráfico 8.** Porosidad contra altura del lecho



#### 4.2.1.6. Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización fue considerada como la velocidad en la cual se produce la transición del lecho fijo al fluidizado.

La velocidad mínima de fluidización se determina de manera experimental, tomando un lecho de peso determinado de granos secos. La medición se realiza utilizando un manómetro diferencial lleno de agua destilada, el cual varía en mm de agua con el aumento de la velocidad del aire (Flores & de Jesús, 2011).

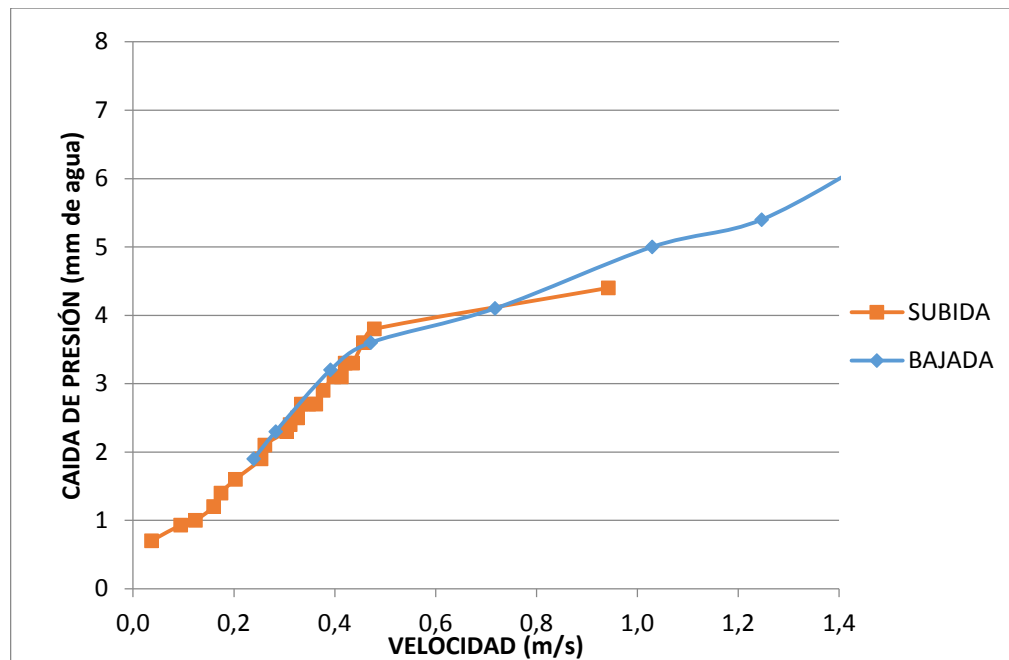
Se encontraron las curvas de caída de presión contra velocidad del aire tanto ascendente como descendente, como se muestra a continuación.

**Tabla 14.** Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.

AUMENTO DE FLUJO DE AIRE		DISMINUCIÓN DE FLUJO DE AIRE	
velocidad final	Presión	velocidad final	Presión
0,036	0,7	1,145	5,3
0,094	0,9	1,276	5,3
0,123	1	1,290	6,1
0,159	1,2	1,493	6,4
0,174	1,4	1,247	5,4
0,203	1,6	1,029	5
0,254	1,9	0,718	4,1
0,261	2,1	0,471	3,6
0,304	2,3	0,391	3,2
0,312	2,4	0,283	2,3
0,326	2,5		
0,333	2,7		
0,348	2,7		
0,362	2,7		
0,377	2,9		
0,399	3,1		
0,413	3,1		
0,420	3,3		
0,435	3,3		



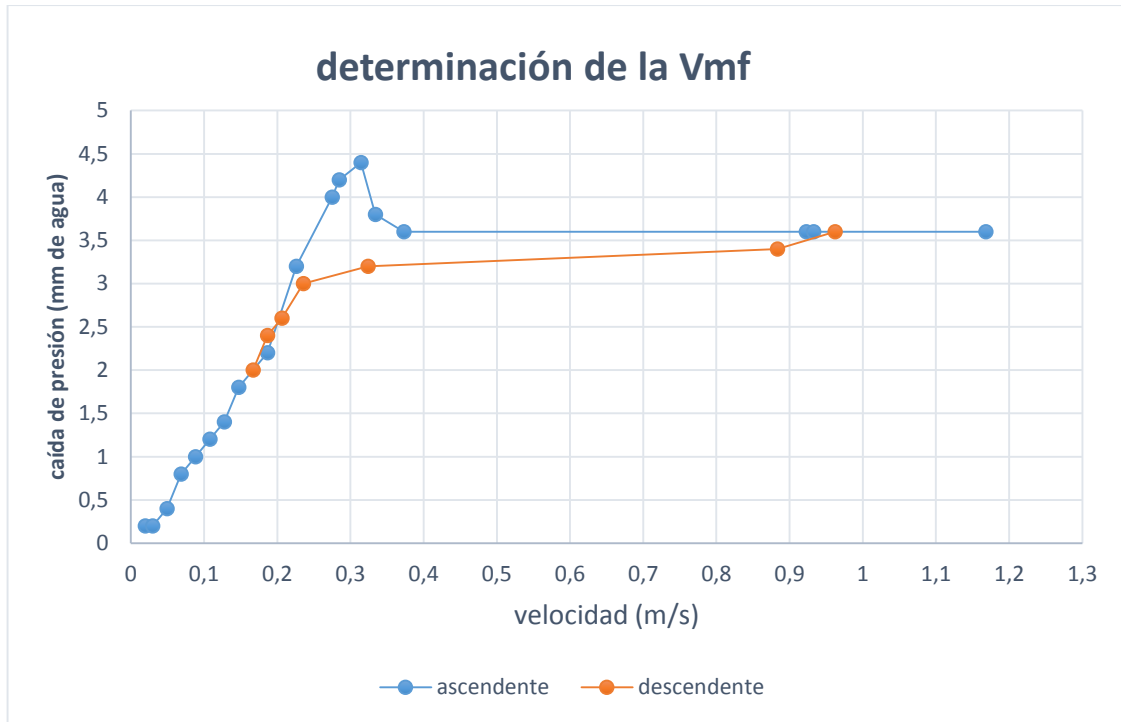
**Gráfico 9.** Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 18 cm y altura de 18cm.



**Tabla 15.** Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.

AUMENTO DE FLUJO DE AIRE		DISMINUCIÓN DE FLUJO DE AIRE	
velocidad final	Presión	velocidad final	Presión
0,020	0,2	0,9621	3,6
0,029	0,2	0,8836	3,4
0,049	0,4	0,3240	3,2
0,069	0,8	0,2356	3
0,088	1	0,2062	2,6
0,108	1,2	0,1865	2,4
0,128	1,4	0,1669	2
0,147	1,8	0,9621	3,6
0,187	2,2	0,8836	3,4
0,226	3,2	0,3240	3,2
0,275	4		
0,285	4,2		
0,314	4,4		
0,334	3,8		
0,373	3,6		
0,923	3,6		
0,933	3,6		
1,168	3,6		
0,020	0,2		

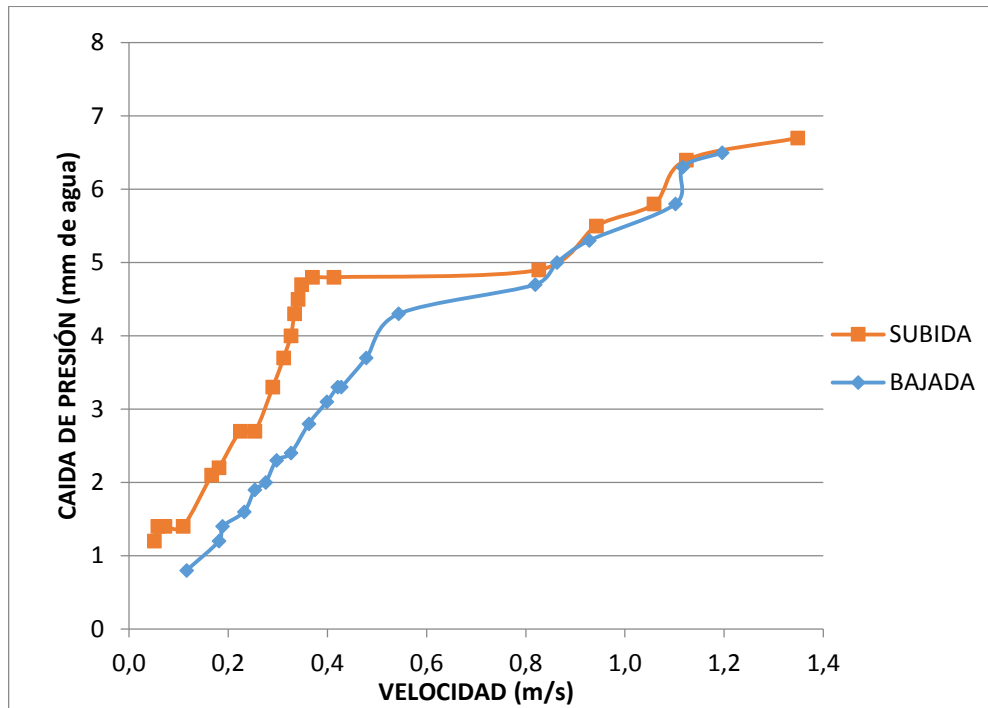
**Gráfico 10.** Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 18 cm y una altura de 9 cm.



**Tabla 16.** Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.

AUMENTO DE FLUJO DE AIRE		DISMINUCIÓN DE FLUJO DE AIRE	
velocidad final	Presión	velocidad final	Presión
0,051	1,2	1,196	6,5
0,058	1,4	1,116	6,3
0,072	1,4	1,102	5,8
0,109	1,4	0,928	5,3
0,167	2,1	0,863	5
0,181	2,2	0,819	4,7
0,225	2,7	0,544	4,3
0,254	2,7	0,478	3,7
0,290	3,3	0,428	3,3
0,312	3,7	0,420	3,3
0,326	4	0,399	3,1
0,333	4,3	0,362	2,8
0,341	4,5	0,326	2,4
0,348	4,7	0,297	2,3
0,370	4,8	0,275	2
0,413	4,8	0,254	1,9
0,826	4,9	0,232	1,6
0,942	5,5	0,188	1,4
1,058	5,8	0,181	1,2

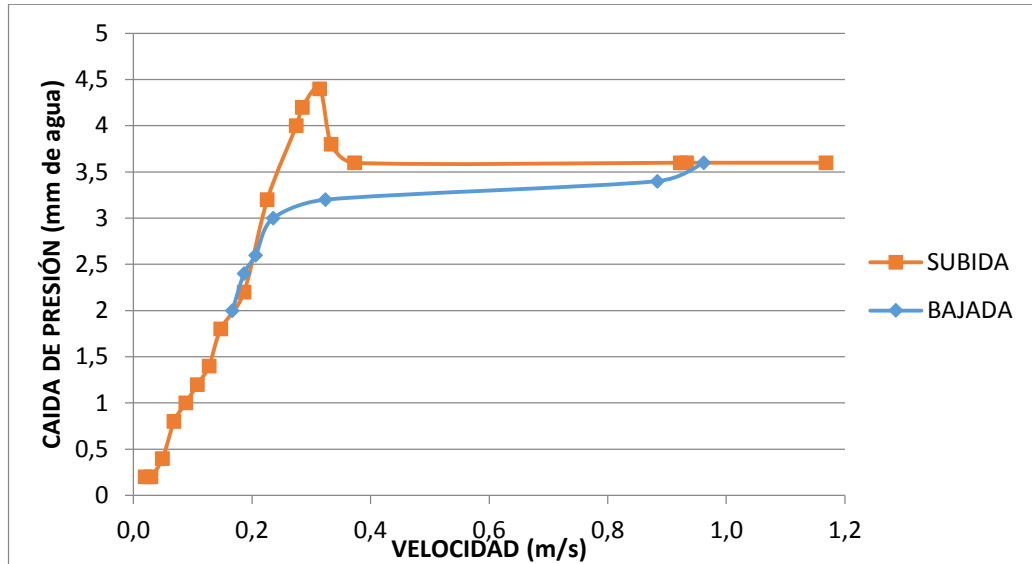
**Gráfico 11.** Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 13 cm y una altura de 13 cm.



**Tabla 17.** Datos tomados de aumento y disminución de flujo de aire para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.

AUMENTO DE FLUJO DE AIRE		DISMINUCIÓN DE FLUJO DE AIRE	
velocidad final	Presión	velocidad final	Presión
0,020	0,2	0,962	3,6
0,029	0,2	0,884	3,4
0,049	0,4	0,324	3,2
0,069	0,8	0,236	3
0,088	1	0,206	2,6
0,108	1,2	0,187	2,4
0,128	1,4	0,167	2
0,147	1,8		
0,187	2,2		
0,226	3,2		
0,275	4		
0,285	4,2		
0,314	4,4		
0,334	3,8		
0,373	3,6		
0,413	4,8		
0,826	4,9		
0,942	5,5		
1,058	5,8		

**Gráfico 12.** Curvas de caída de presión contra velocidad para un diámetro de 13 cm y una altura de 6,5 cm.



Al analizar las curvas de la caída de presión contra velocidad del aire se determinó que con la boquilla mayor (18 cm) y con un lecho de 18 cm de altura la velocidad a la que la quinua comenzó a fluidizar fue de 0,38 m/s; se realizaron otras pruebas para corroborar con estas se demostraron que los valores de la velocidad eran de 0,37 y 0,38 m/s y mediante la media se demostró que la velocidad mínima de fluidización para la quinua es de 0,38 m/s, más aun no se encontraron diferencias significativas en la velocidad mínima de fluidización para los diferentes diámetros del secador de lecho fluidizado.

De acuerdo a Rodríguez & Soler (2001) en su investigación “propiedades físicas y aerodinámicas de la cáscara de arroz”, los valores de la velocidad mínima de fluidización planteados en la tabla 18 fueron próximos a los obtenidos experimental al trabajar con granos de quinua con un diámetro medio de 1,55 mm obteniendo una velocidad de 0,38 m/s.

**Tabla 18.** Valores de la velocidad mínima de fluidización (vmf) para la quinua en comparación a la cascara de arroz

Díámetro promedio (mm)	vmf para el arroz (m/s)	vmf para la quinua (m/s)
1,04	0,32	
1,50	0,40	0,38
1,70	0,47	
2,90	0,62	

**Tabla 19.** Velocidad mínima de fluidización (vmf) encontrada.

CORRIDA	TIPO	DIÁMETRO DE BOQUILLA	ALTURA DEL LECHO	MASA	PERDIDAS	Vmf (m/s)
1	Quinua	18 cm	18 cm	400 g		0,39
2	<i>Chenopodium</i>	18 cm	9 cm	200 g	Despreciable	0,35
3	<i>quinoa</i> (INIAP	13 cm	13 cm	220 g		0,38
4	TUNKAHUAN)	13 cm	6,5 cm	110 g		0,37

No obstante; los valores obtenidos en la velocidad de arrastre, no son nada aproximados a los obtenidos por Rodríguez & Soler (2001) en su investigación, donde el obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 20.** Valores de la velocidad de arrastre

DIAMETRO MEDIO (mm)	VEL. DE ARRASTRE (m/s)
1,04	1,23
1,70	1,32
2,90	1,51

Y de acuerdo con Gupta y Sathiyamoorthy (1999) las propiedades que deben ser consideradas en la interacción fluido-partícula son: el tamaño, la densidad, la esfericidad y la fracción de vacío del lecho y los valores de la velocidad mínima de fluidización y de arrastre son dependientes de estos por ende sus valores pueden variar según el tipo de partícula que se fluidiza.

La velocidad de arrastre de las partículas de mayor tamaño de la quinua se produce a una velocidad de 6,1 m/s pero para las partículas de menor diámetro el arrastre comienza a manifestarse a velocidades mayores a 5,5 m/s.

**Tabla 21.** Velocidad de arrastre y separación de partículas.

v. inicial de arrastre (m/s)	6,1
v. final de separación de partículas (m/s)	5,5

#### 4.2.2. Humedad final de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan)

Esta variable se midió al final del proceso de secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) de donde se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 22.** Humedad final de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) expresado en porcentaje (%).

TRAT/REP	I	II	III	SUMA	MEDIA
<b>T1 A1B1</b>	9,87	8,99	9,43	28,29	9,43
<b>T2 A1B2</b>	5,79	5,47	5,63	16,89	5,63
<b>T3 A1B3</b>	5,10	4,85	4,98	14,93	4,98
<b>T4 A2B1</b>	6,60	6,19	6,40	19,19	6,40
<b>T5 A2B2</b>	4,25	4,07	4,16	12,48	4,16
<b>T6 A2B3</b>	4,64	4,63	4,64	13,91	4,64
<b>T7 A3B1</b>	8,03	7,43	7,73	23,19	7,73
<b>T8 A3B2</b>	7,60	7,07	7,34	22,01	7,34
<b>T9 A3B3</b>	5,17	4,91	5,04	15,12	5,04
<b>TESTIGO</b>	10,88	9,81	10,35	31,035	10,35

A= Temperatura

B= velocidad del aire

TESTIGO= Secado en estufa

**Tabla 23.** Análisis de varianza para la humedad final de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	F. Cal		F.T 5%	F.T. 1%
<b>Total</b>	29	120,63	---				
<b>Trat.</b>	8	119,14	14,89	119,40	**	2,85	4,5
<b>A</b>	2	15,88	7,94	63,66	**	3,89	6,93
<b>B</b>	2	42,26	21,13	169,40	**	3,89	6,93
<b>AxB</b>	4	1092,04	273,01	2188,97	**	3,26	5,51
<b>T VS O</b>	1	321,057	321,06	2574,21	**	4,75	9,33
<b>ErrExp.</b>	12	1,50	0,12				

C.V.=5,37 %

\*: Significativo

\*\* : Altamente significativo

NS: No Significativo

En la tabla 23, el análisis de varianza de la variable humedad final de la de quinua *Chenopodium quinoa* determina alta significación estadística para tratamientos, factor A (temperatura) y factor B (velocidad del aire) e interacción AxB (temperatura y velocidad del aire). Es decir que la humedad del producto terminado depende de la temperatura de secado y la velocidad del aire.

Al existir significación estadística se procedió a realizar las pruebas de Tukey al 5 % para tratamientos y Diferencia Mínima Significativa para los factores A y B, y gráfica para la interacción (AxB).

**Tabla 24.** Prueba de Tukey para tratamientos de la variable humedad final de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

TRATAMIENTOS	MEDIAS	RANGOS
T3	9,43	a
T1	7,73	a
T6	7,34	a
T2	6,40	a
T4	5,63	a
T9	5,04	a
T5	4,98	a
T8	4,64	b
T7	4,16	b

En la tabla 24 de la prueba de Tukey al 5% para tratamientos se observa que T3, T1, T6, T2, T4, T9, T5, poseen rango A. Es decir que entre los tratamientos de este rango únicamente existe diferencia matemática en las medias calculadas, para fines de la investigación se consideró el menor porcentaje de humedad, en este caso el tratamiento T7 (velocidad de

secado 0,5 m/s, y temperatura de secado de 50°C) es el mejor tratamiento para la investigación.

**Tabla 25.** Diferencia mínima significativa para el factor A (temperatura de secado) de la variable humedad de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

<b>FACTOR A ( temperatura)</b>	<b>MEDIAS</b>	<b>RANGOS</b>
A3	6,70	a
A1	6,67	a
A2	5,06	a

Al realizar Diferencia Mínima Significativa para el factor A, se observa que A1 (temperatura 40 °C), A2 (temperatura 45 °C) y A3 (temperatura 50 °C) presentan el mismo rango, existiendo una mínima diferencia matemática. Para fines de la investigación se considera el menor porcentaje de humedad, por lo tanto, la temperatura 45 °C es la mejor.

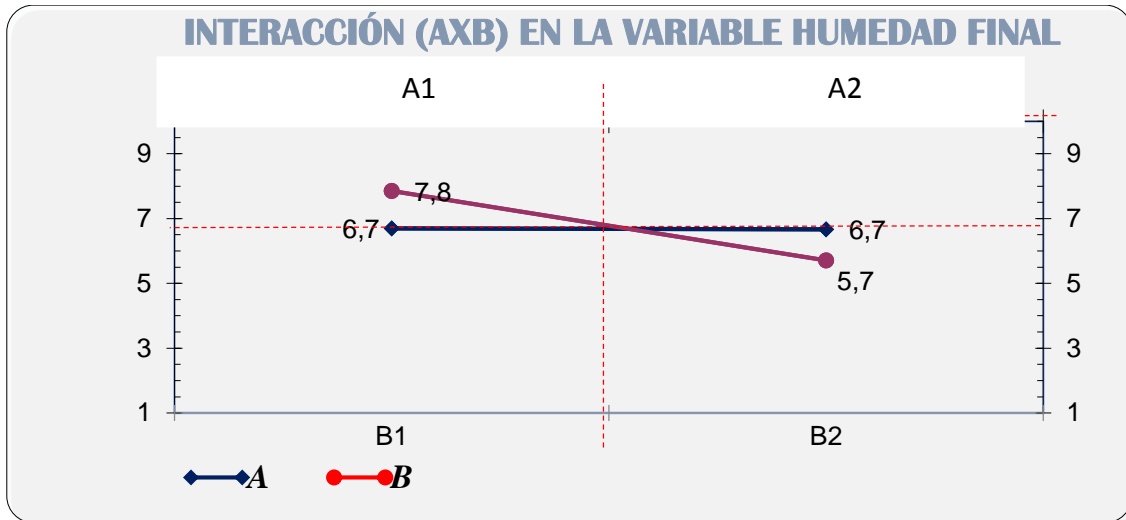
**Tabla 26.** Diferencia mínima significativa para el factor B (velocidad del aire) de la variable humedad final de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

<b>FACTOR B ( velocidad del flujo de aire)</b>	<b>MEDIAS</b>	<b>RANGOS</b>
B1	7,852	a
B2	5,708	a
B3	4,883	a

Al realizar Diferencia Mínima Significativa para el factor B, se observa que B1 (velocidad de flujo de aire 0,5 m/s), B2 (velocidad de flujo de aire 0,68 m/s) y B3 (velocidad de flujo de aire 0,86 m/s) presentan el mismo rango, existiendo una mínima diferencia matemática. Para fines de la investigación se considera el menor porcentaje de humedad, por lo tanto, la velocidad 0,5 m/s es la mejor.

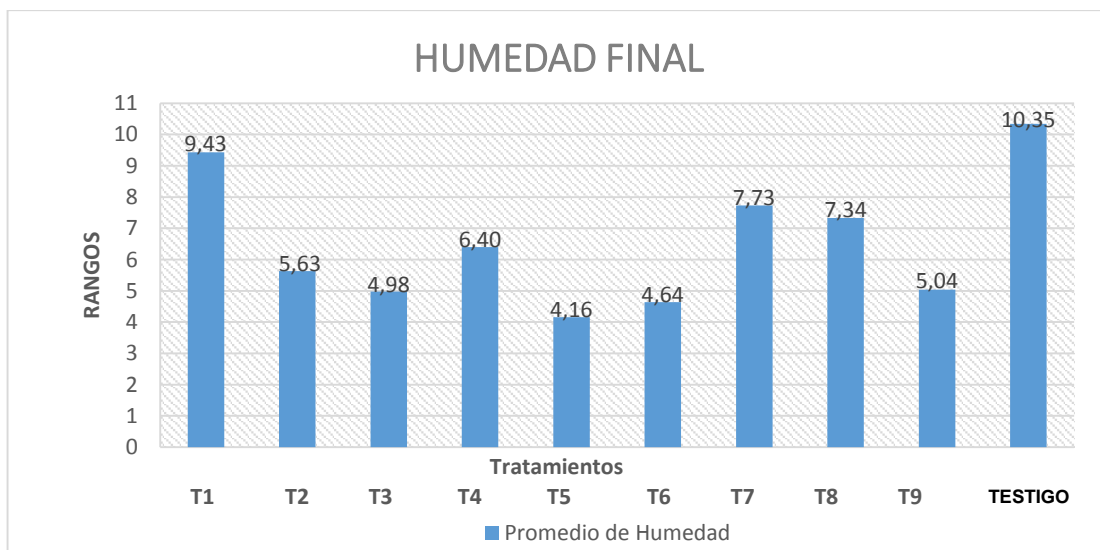


**Gráfico 13.** Interacción de los factores: A (temperatura de secado) y B (velocidad de flujo de aire) para la variable humedad final de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).



En el gráfico 13, se representa la interacción de los factores estudiados factor A (temperatura de secado) y factor B (velocidad de flujo de aire) en función de la variable humedad final para la quinua es 6,7 %, en el que se observa que la temperatura de secado es inversamente proporcional con la humedad, es decir a mayor temperatura de secado corresponde menor porcentaje de humedad y viceversa y que este valor de humedad es el óptimo, el cual influye directamente entre la temperatura y velocidad de flujo de aire, se encuentra bajo la norma NTE INEN 1673.

**Gráfico 14.** Humedad final de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).



En el gráfico 14 se observa los diferentes porcentajes de humedad para los tratamientos por lo que para el (T1) presenta 9,43%, el (T2) tiene un 5,63%, para el (T3) el porcentaje de humedad es de 4,68%, el (T4) tiene un 6,4%, el (T5) presenta un 4,16%, para el (T6) mantiene un 4,64%, para el (T7) tiene un 7,73%, para el (T8) presenta un 7,34%, %, para el (T9) presenta un 5,04% y el testigo 10,35%. Se tomó como mejor tratamiento a T5 (temperatura de secado 45°C y velocidad del aire 0,68m/s) con un porcentaje de humedad de 4,16%.

Según Puerta (2013) el agua influye en la textura, sabor y calidad de los alimentos, pero es también una de las causas de su naturaleza perecedera y de acuerdo a Geankoplis (1998), dice que : los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso, sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en peso, para preservar el sabor y su valor nutritivo siendo el T5 el que bajo ese nivel.

Gráficamente se demuestra el comportamiento de la deshidratación de los granos de quinua para la variable humedad final, en el cual se puede observar que a pesar de trabajar con una temperatura de 50 °C el que obtuvo los mejores resultados fue la que se trabajó con una temperatura de 45 °C y velocidad de del aire 0,68m/s lo que parece estar relacionado con los procesos de intercambio de calor y masa dentro del lecho fluidizado que se maximizan a esta temperatura y velocidad.

#### **4.2.3. Tiempo de secado quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan)**

Esta variable se midió en el proceso de Secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan), de donde se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 27.** Tiempo de Secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) expresado en (h)

TRAT/REP	I	II	III	SUMA	MEDIA
T1 A1B1	0,20	0,19	0,20	0,59	0,20
T2 A1B2	0,12	0,13	0,13	0,38	0,13
T3 A1B3	0,22	0,25	0,24	0,70	0,23
T4 A2B1	0,10	0,11	0,11	0,32	0,11
T5 A2B2	0,08	0,08	0,09	0,25	0,08
T6 A2B3	0,11	0,13	0,12	0,36	0,12
T7 A3B1	0,07	0,08	0,07	0,21	0,07
T8 A3B2	0,07	0,08	0,09	0,23	0,08
T9 A3B3	0,10	0,11	0,10	0,31	0,10
TESTIGO	15,41	17,25	17,38	31,035	10,35

A= Temperatura

B= velocidad de flujo de aire.

**Tabla 28.** Análisis de varianza del tiempo de secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

F de V	ADEVA					0,05	0,01
	GL	SC	CM	FC			
Total	29	742,47	---				
Trat.	8	740,04	82,23	372,36	**	2,77	4,3
A	2	0,48	0,24	1,0768	ns	3,81	6,7
B	2	0,0145	0,01	0,0327	ns	3,81	6,7
AxB	4	0,01	0,00	0,0087	ns	3,18	5,21
TES VS OTRS	1	834,17	834,17	3777,53	**		
Error Exp.	12	2,43	0,22082				

Cv=26,39%

En la tabla 28, el análisis de varianza de la variable tiempo de secado de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan), se determina que existe alta significación estadística para tratamientos, mientras que en factores A y B no existe significación estadística quedando en que son iguales. Por tanto se realizaron las pruebas correspondientes: Tukey para tratamientos. El coeficiente de variación fue de 26.39 % valor

que es considerado muy alto debido al testigo el cual obtuvo valores que son muy alejados a los valores de tiempo que se obtuvieron en el secador por lecho fluidizado.

**Tabla 29.** Prueba de Tukey para tratamientos de la variable tiempo de secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

TRATAMIENTOS	MEDIAS	RANGOS
T3	0,24	a
T1	0,20	bc
T6	0,13	bc
T2	0,12	bc
T4	0,11	bc
T9	0,10	bc
T5	0,08	b d
T8	0,08	b d
T7	0,07	b d

La prueba de Tukey al 5% demuestra que los tratamientos actuaron de diferente manera en la variación del tiempo de secado, donde las medias han sido ordenadas de mayor a menor porque así lo determina la prueba de Tukey. Para fines de la investigación se prefiere el menor tiempo de secado, el cual corresponde al tratamiento T7 (50 °C, 0,5 m/s), por ende es considerado el mejor tratamiento que es 0,07 horas, el cual reduce costos en energía. Es decir que existe entre los tratamientos diferencia estadística entre las medias calculadas.

#### 4.2.4. Curvas características de Deshidratado para granos de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).

La curva de secado se realizó para cada tratamiento hasta la obtención de la humedad de equilibrio, en condiciones controladas de laboratorio.

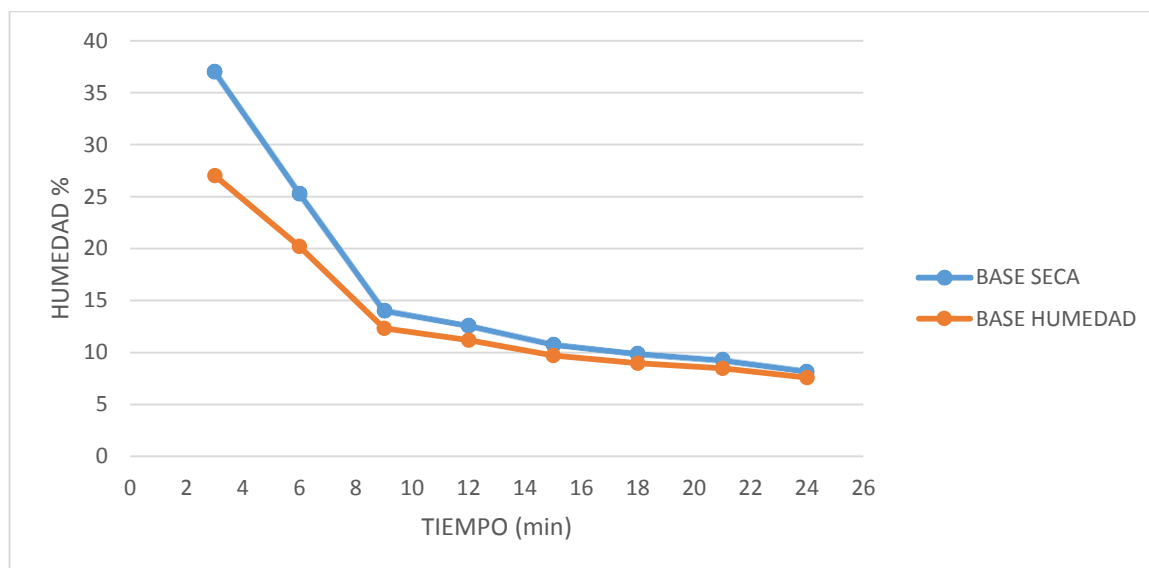
#### 4.2.4.1. Curva de deshidratado para T1 (temperatura de secado 40°C y velocidad de secado 0,5 m/s)

**Tabla 30.** Valor de humedad para el tratamiento T1 (A1B1).

Velocidad 0,5  
Temperatura 40

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	3	44,6911	42,9654	27,04	37,06
38,8944	6	42,3474	41,6495	20,21	25,33
39,0420	9	42,1712	41,7856	12,32	14,05
38,9016	12	41,8584	41,5274	11,19	12,61
40,529	15	44,2402	43,8793	9,72	10,77
39,7192	18	45,5109	44,9905	8,99	9,87
38,776	21	42,7208	42,386	8,49	9,27
38,882	24	44,0355	43,5645	9,14	8,20

**Gráfico 15.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T1.



De acuerdo al gráfico 15 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 9,14% para el T1 (A1B1), siendo 24 minutos el tiempo total de secado.

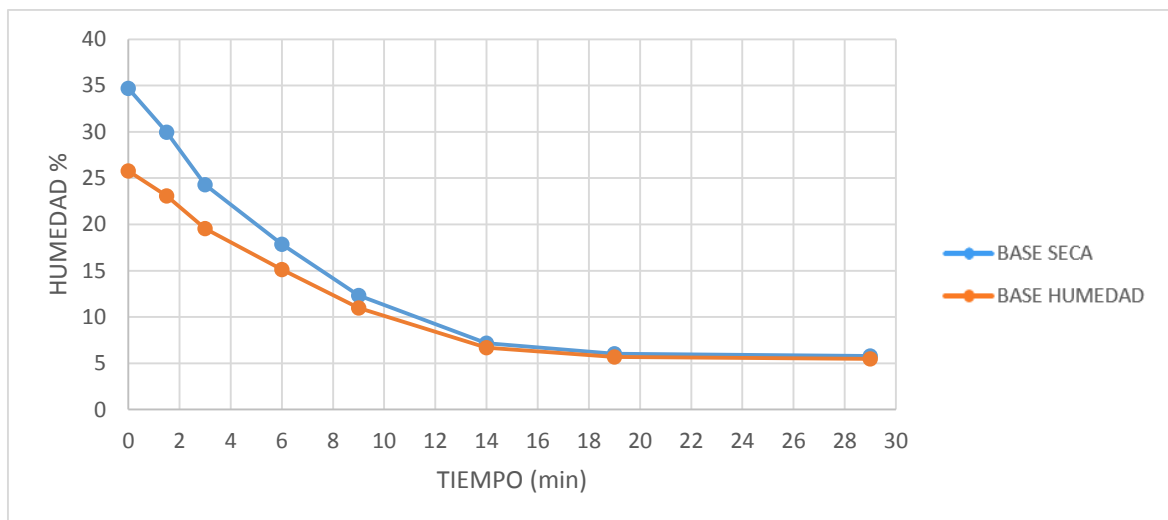
#### 4.2.4.2. Curva de deshidratado para T2 (temperatura de secado 40°C y velocidad de secado 0,68 m/s)

**Tabla 31.** Valor de humedad para el tratamiento T2 (A1B2).

Velocidad 0,68  
Temperatura 40

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	42,2643	41,245	25,77	34,71
38,8944	1,5	44,9352	43,542	23,06	29,98
39,0420	3	44,8993	43,7546	19,54	24,29
38,9016	6	46,2734	45,1572	15,14	17,84
40,529	9	47,3586	46,6101	10,96	12,31
38,3097	14	43,843	43,4726	6,69	7,17
38,882	19	46,4254	45,9966	5,68	6,03
39,7192	29	45,1581	44,8605	5,47	5,79

**Gráfico 16.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T2.



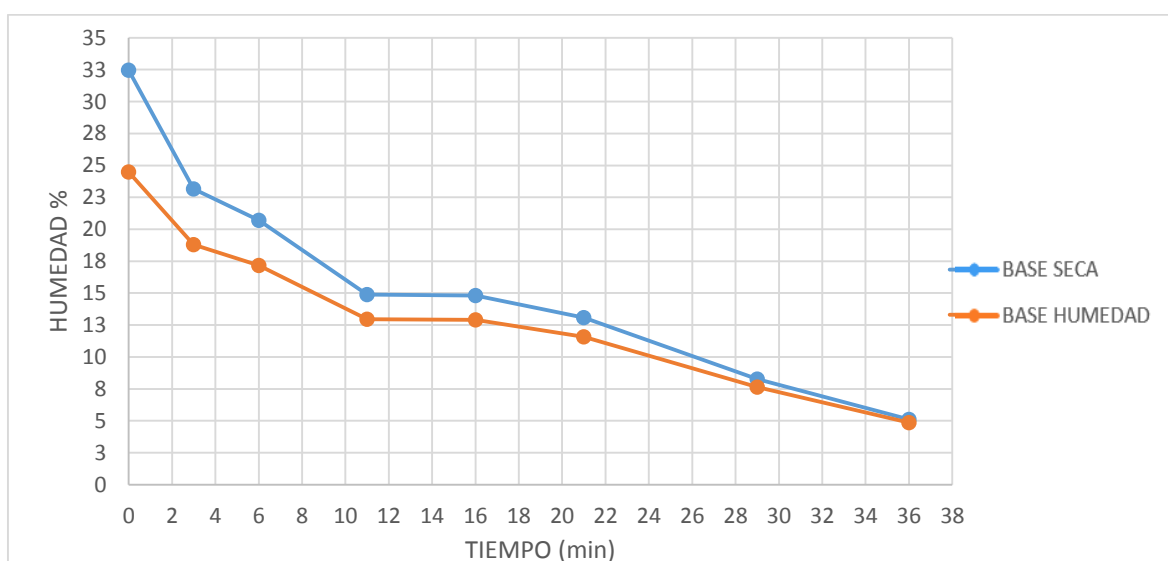
De acuerdo al gráfico 16 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 5,47 % para el T2 (A1B2), siendo 29 minutos el tiempo total de secado.

#### 4.2.4.3. Curva de deshidratado para T3 (temperatura de secado 40°C y velocidad de secado 0,86 m/s)

**Tabla 32.** Valor de humedad para el tratamiento T3 (A1B3).

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	42,1214	41,1872	24,50	32,45
38,8944	3	44,1511	43,1629	18,80	23,15
39,0420	6	44,6049	43,6504	17,16	20,71
38,9016	11	42,9114	42,3916	12,96	14,89
40,529	16	44,1477	43,6810	12,90	14,81
38,3097	21	45,9957	45,1062	11,57	13,09
38,882	29	41,9931	41,7554	7,64	8,27
39,7192	36	46,8221	46,4774	4,85	5,10

**Gráfico 17.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T3.



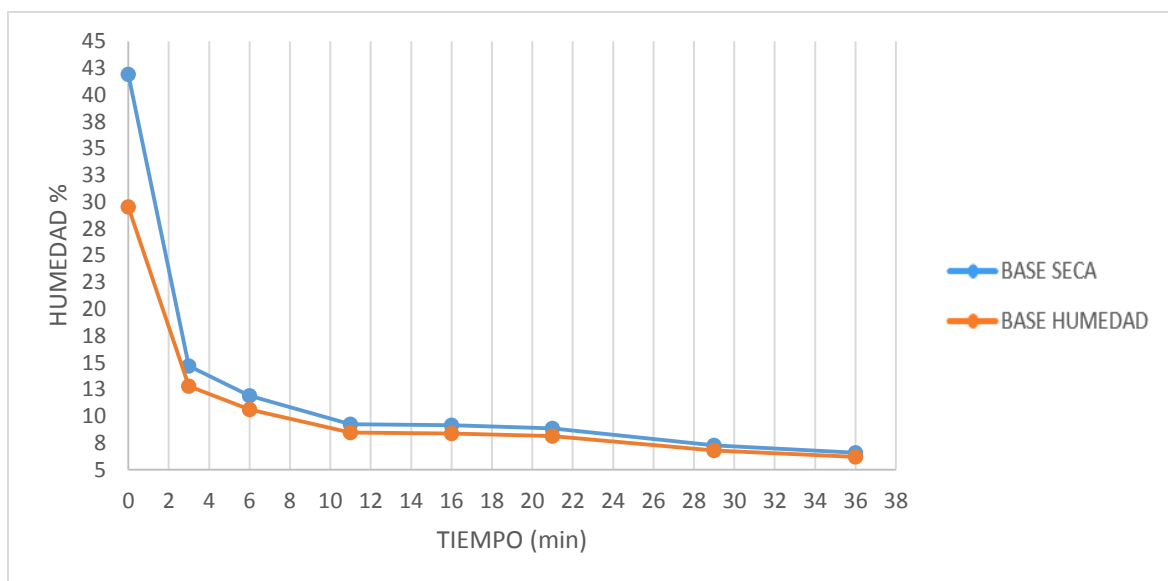
De acuerdo al gráfico 17 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 5,10% para el T3 (A1B3), siendo 29 minutos el tiempo total de secado.

#### 4.2.4.4. Curva de deshidratado para T4 (temperatura de secado 45°C y velocidad de secado 0,5 m/s)

**Tabla 33.** Valor de humedad para el tratamiento T4 (A2B1).

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	42,9688	41,5924	29,53	41,91
38,8944	3	43,1056	42,5661	12,81	14,69
39,0420	6	44,2465	43,693	10,64	11,90
38,9016	11	43,2508	42,7863	10,68	9,24
40,529	16	42,6422	42,4650	8,39	9,15
38,3097	21	45,9172	45,2984	8,13	8,85
38,882	29	44,0508	43,7	6,79	7,28
39,7192	36	44,92	44,598	6,19	6,60

**Gráfico 18.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T4.



De acuerdo al gráfico 18 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 6,40% para el T4 (A2B1), siendo 29 minutos el tiempo total de secado.

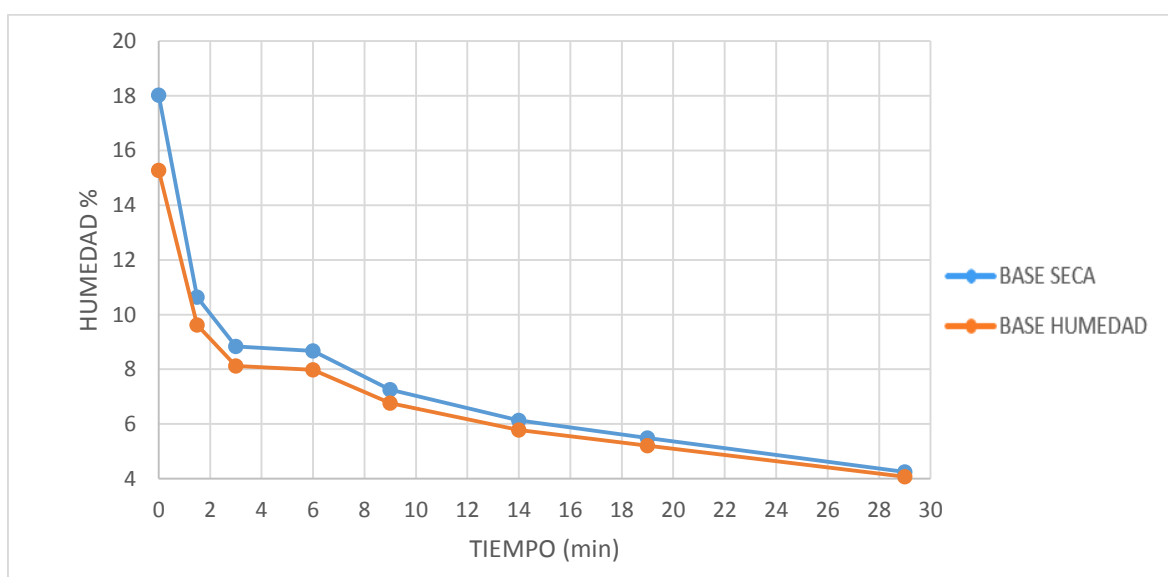


#### 4.2.4.5. Curva de deshidratado para T5 (temperatura de secado 45°C y velocidad de secado 0,68 m/s)

**Tabla 34.** Valor de humedad para el tratamiento T5 (A2B2).

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	42,458	41,8243	15,27	18,02
38,8944	1,5	43,9884	43,4984	9,62	10,64
39,0420	3	43,886	43,4926	8,12	8,84
38,9016	6	45,0641	44,5722	7,98	8,67
40,529	9	46,6751	46,2591	6,77	7,26
38,3097	14	45,7131	45,328	5,20	6,13
38,882	19	46,024	45,6114	5,78	5,49
39,7192	29	48,9479	48,572	4,07	4,25

**Gráfico 19.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T5.



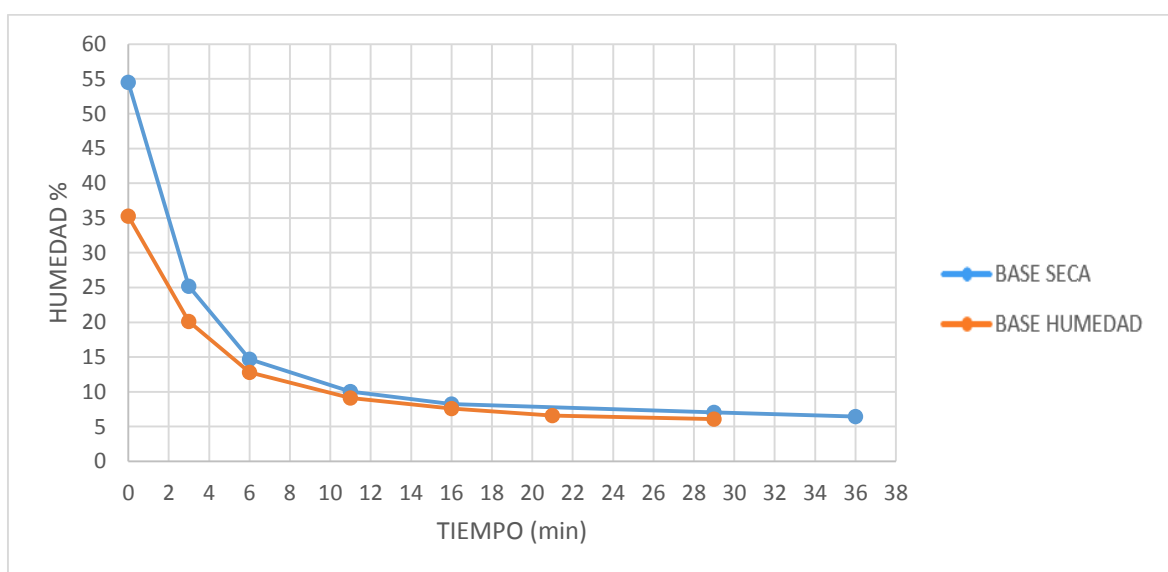
De acuerdo al gráfico 19 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 4,07% para el T5 (A2B2), siendo 29 minutos el tiempo total de secado.

#### 4.2.4.6. Curva de deshidratado para T6 (temperatura de secado 45°C y velocidad de secado 0,86 m/s)

**Tabla 35.** Valor de humedad para el tratamiento T6 (A2B3).

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	42,5735	41,0689	35,28	54,50
38,8944	3	42,9657	42,1471	20,11	25,17
39,0420	6	42,5939	42,139	12,81	14,69
38,9016	11	43,2203	42,826	9,13	10,05
40,529	16	44,8244	44,4974	7,61	8,24
38,3097	21	43,3436	43,0021	6,78	7,28
38,882	29	42,9187	42,653	6,58	7,05
39,7192	36	42,4585	42,291	6,07	6,46

**Gráfico 20.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T6.



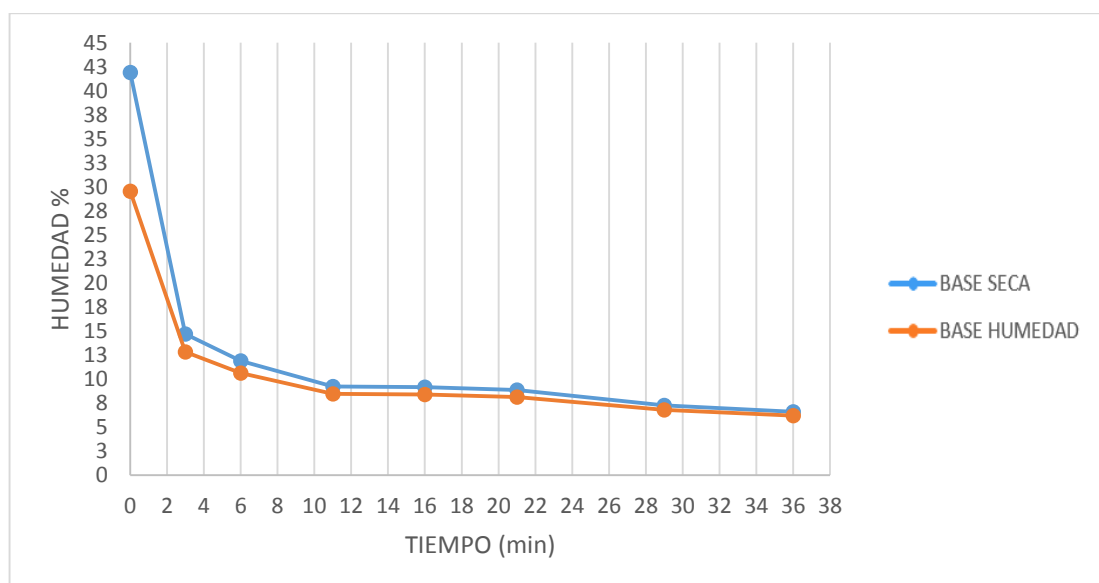
De acuerdo al gráfico 20 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 6,07% para el T6 (A2B3), siendo 36 minutos el tiempo total de secado.

#### 4.2.4.7. Curva de deshidratado para T7 (temperatura de secado 50°C y velocidad de secado 0,5 m/s)

**Tabla 36.** Valor de humedad para el tratamiento T7 (A3B1).

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	42,6146	41,3545	29,26	41,37
38,8944	3	42,3084	41,8152	14,45	16,89
39,0420	6	43,2606	42,7068	13,13	15,11
38,9016	11	44,2848	43,6498	11,80	13,37
40,529	16	45,6022	45,0926	10,04	11,17
38,3097	21	43,863	43,4207	7,96	9,12
38,882	29	43,8407	43,4263	8,36	8,65
39,7192	36	46,011	45,5433	7,43	8,03

**Gráfico 21.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T7.



De acuerdo al gráfico 21 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 7,43% para el T7 (A3B1), siendo 36 minutos el tiempo total de secado.

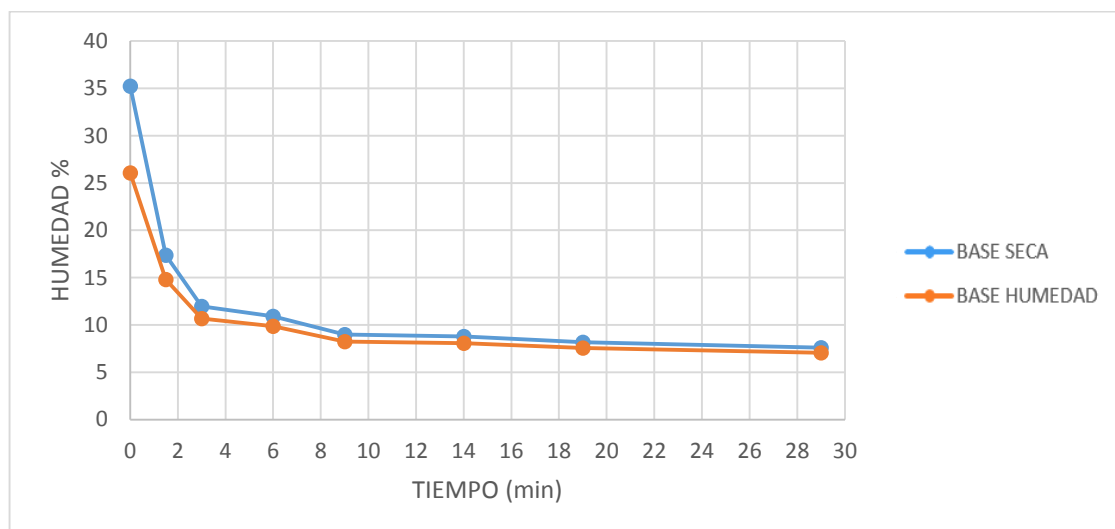
#### 4.2.4.8. Curva de deshidratado para T8 (temperatura de secado 50°C y velocidad de secado 0,68 m/s)

**Tabla 37.** Valor de humedad para el tratamiento T8 (A3B2).

Velocidad 0,68  
Temperatura 50

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	43,8312	42,3923	26,05	35,23
38,8944	1,5	45,0704	44,157	14,79	17,36
39,0420	3	44,5987	44,0055	10,68	11,95
38,9016	6	43,6635	43,1945	9,85	10,93
40,529	9	46,3107	45,8348	8,23	8,97
38,3097	14	46,9658	46,266	8,08	8,80
38,882	19	47,2506	46,6189	7,55	8,16
39,6981	29	47,0642	46,5451	7,07	7,60

**Gráfico 22.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T8.



De acuerdo al gráfico 22 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 7,07% para el T8 (A3B2), siendo 29 minutos el tiempo total de secado.

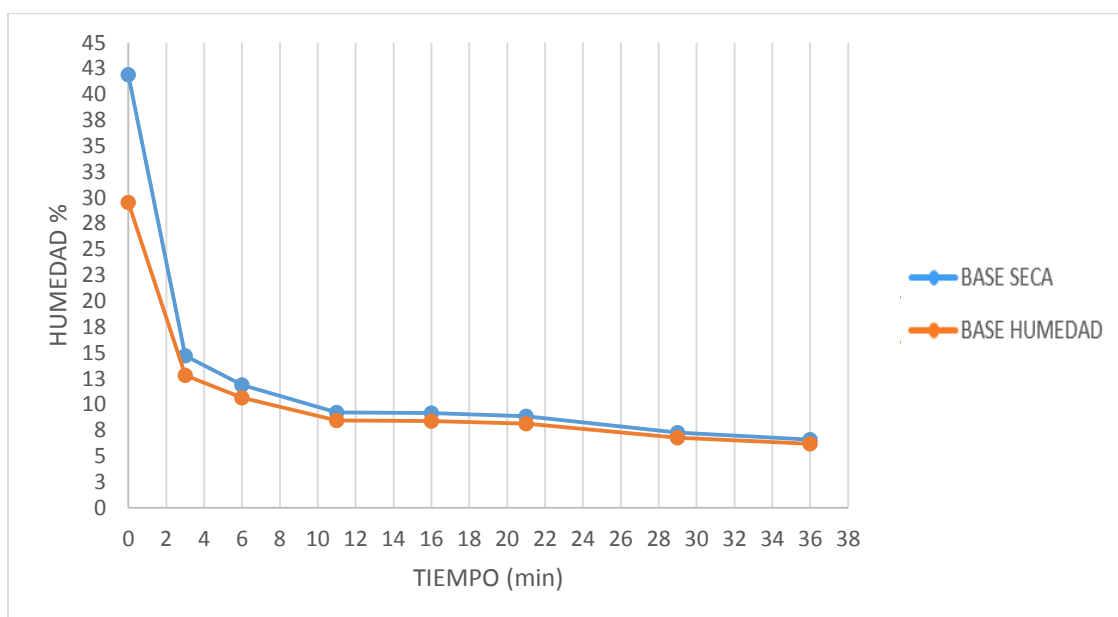
#### 4.2.4.9. Curva de deshidratado para T9 (temperatura de secado 50°C y velocidad de secado 0,86 m/s)

**Tabla 38.** Valor de humedad para el tratamiento T9 (A3B3).

Velocidad 0,86  
Temperatura 50

CAJAS PETRI (g)	TIEMPO (min)	$T_0$	$T_1$	HUMEDAD EN BASE HÚMEDA (%)	HUMEDAD EN BASE SECA (%)
38,3083	0	40,5667	40,2358	14,65	17,17
38,8944	1,5	42,4921	42,1535	9,41	10,39
39,0420	3	44,2425	43,795	8,60	9,42
38,9016	6	42,9433	42,6224	7,94	8,62
40,529	9	44,8175	44,4867	7,71	8,36
38,3097	14	42,9325	42,6175	6,81	7,31
38,882	19	44,46	44,1223	6,05	6,44
39,7192	29	45,5852	45,297	4,91	5,17

**Gráfico 23.** Determinación de las curvas de secado en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T9.

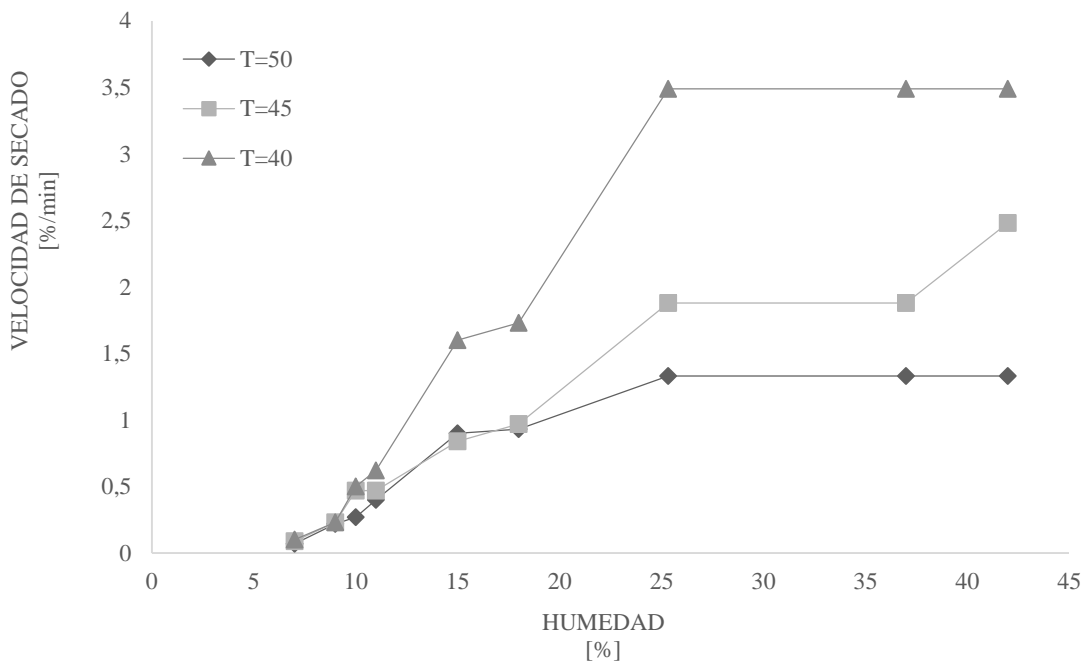


De acuerdo al gráfico 23 se puede observar que la humedad disminuye rápidamente debido a la transferencia de calor en el secador de lecho fluidizado, obteniendo así un porcentaje de humedad de 4,19% para el T9 (A3B3), siendo 29 minutos el tiempo total de secado.

#### 4.2.5. La velocidad de secado

El gráfico 24 muestra la variación en la velocidad de secado contra el contenido de humedad a 40, 45 y 50 °C y 3 velocidades de flujo de aire.

**Gráfico 24.** Curva de velocidad de secado contra humedad en base seca de la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) para el tratamiento T9.



Se observa que la velocidad de secado inicial fue elevada y posteriormente presentó una disminución gradual conforme el producto alcanzó su contenido de humedad en el equilibrio debido a que la humedad interna requiere más tiempo para su remoción.

La velocidad de secado se acelera con incrementos de la temperatura del aire como se observa en el gráfico 24. Además, la velocidad de secado disminuye reduciendo la humedad del grano para todas las temperaturas del aire. Una razón posible para este comportamiento se encuentra en el hecho de que al principio del secado, cuando el grano es más húmedo, se

elimina el agua libre que se adhiere a la superficie capilar y al material, mientras que en el último, Moléculas de quinua se eliminan.

El gráfico 24 muestra el comportamiento de la velocidad de secado, con respecto a la humedad en base seca de los granos de quinua.

#### **4.2.6. Contenido de proteína**

Se realizó la determinación de la proteína para el mejor tratamiento por duplicado, se cumplió al pie de la letra la norma INEN 1670:07 quinua. Determinación de la proteína total (proteína cruda) y se llegó a la determinación de un contenido inicial de proteína de 12,6 % de acuerdo a Calle et al. (2010) se debe evitar el desprendimiento del germen el cual engloba una porción considerable del contenido de proteína de la quinua y durante el lavado la proteína se pierde llegando a un contenido final de 10,6 % y de acuerdo a la norma NTE INEN 1673:2013 (Primera revisión) está en rango de aceptabilidad y cumple los requisitos para salir al mercado.

#### **4.2.7. Actividad de agua (Aw)**

Este análisis paramétrico se realizó con el fin de conocer las variaciones de actividad de agua en el mejor tratamiento. De acuerdo a Roos (2000), existe actividad de agua que limita el crecimiento de mohos. Levaduras y bacterias. Es así, que la mayoría de las bacterias, no crecen en Aw debajo de 0,91, la mayoría de mohos y levaduras dejan de crecer a Aw menores de 0,70 y las levaduras a un mínimo de Aw de 0,68, al medir la actividad de agua del mejor tratamiento se llegó a determinar los valores de 0,68 y 0,64 valores en los cuales el crecimiento de mohos levaduras y bacterias se ven reducidos.

#### 4.2.8. Efectividad del proceso

Se lo realiza en función del tiempo de secado tanto para el método tradicional (testigo) como para el método por lecho fluidizado, que fueron determinados durante la parte experimental.

$$EFFECTIVIDAD = \frac{TIEMPO DEL MÉTODO FLUIDIZADO}{TIEMPO DEL MÉTODO TRADICIONAL} \times 100 \quad (18)$$

$$EFFECTIVIDAD = \frac{0,06666 \text{ horas}}{16 \text{ horas}} \times 100$$

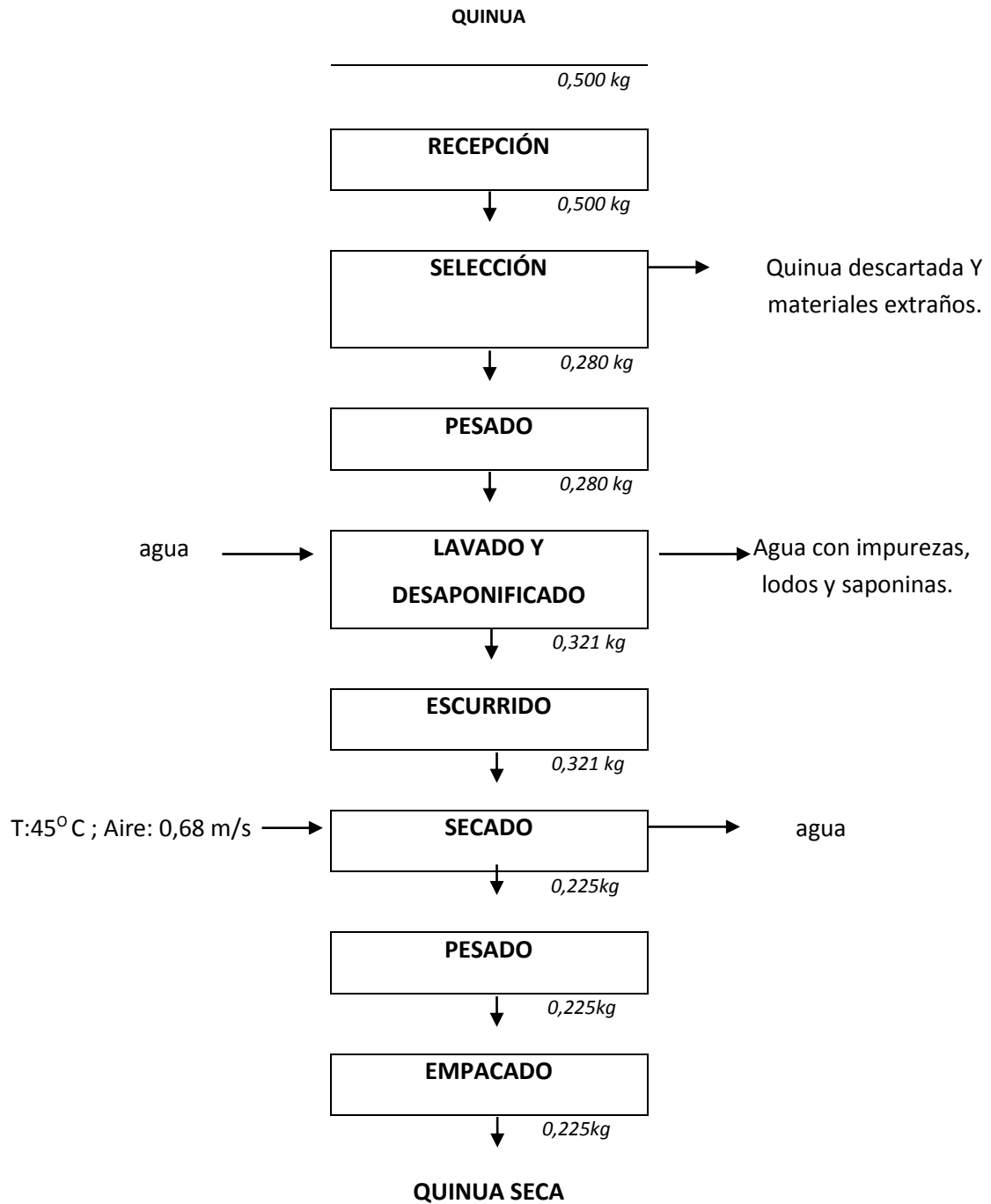
$$EFFECTIVIDAD = 0,42 \%$$

Tomando en cuenta que el método por lecho fluidizado fue 100 % efectivo necesitamos saber que tan efectivo resulta el método tradicional dando como resultado una efectividad de 0,42 % en comparación al método por lecho fluidizado.



#### 4.2.9. Balance de materiales para el mejor tratamiento

Figura 3: Diagrama de bloques del mejor tratamiento

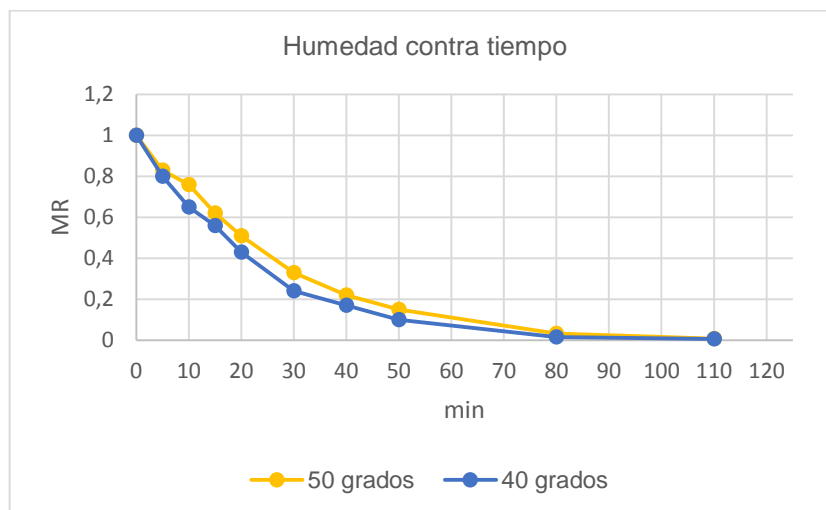


#### 4.2.10. Cinética del secado

El procesamiento de datos se realizó para una velocidad del aire constante y unos valores de Temperatura de 40 y 50 °C

Se utilizó el Statgraphics para la comparación de los valores experimentales con los modelos de Page Modificado y Wang and Singh, los demás modelos se desprecian por no ofrecer coincidencias significativas.

**Gráfico 25.** Cuevas de secado experimental.



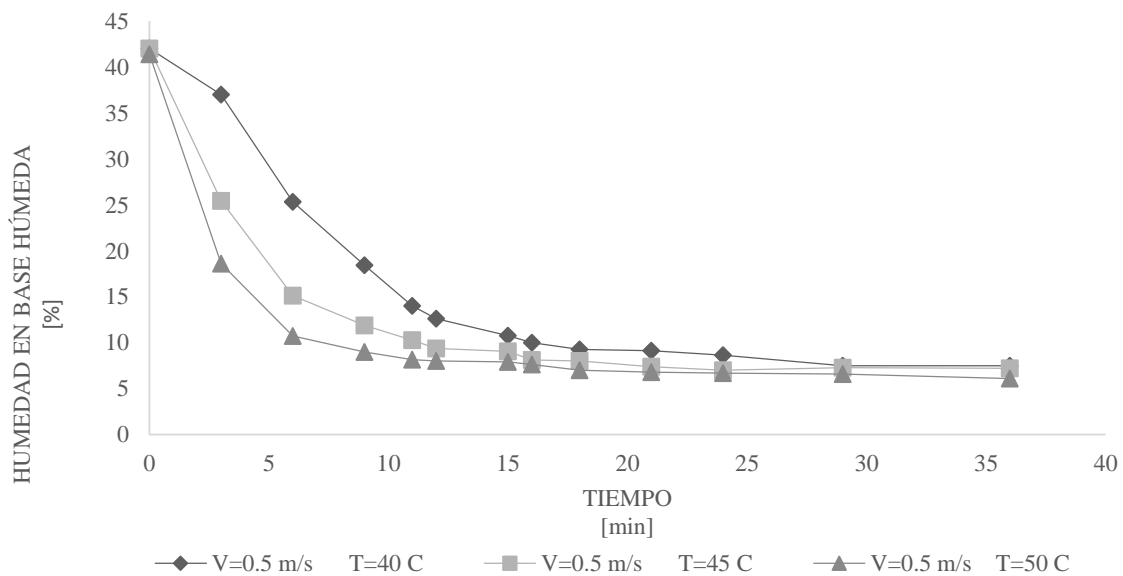
En el gráfico 25 se puede observar las curvas de secado experimental las cuales mostraron un comportamiento exponencial para todas las temperaturas de trabajo, solo se observó la presencia del período de velocidad decreciente. Un comportamiento similar fue reportado por Gely & Santalla (2007), trabajando con semillas de quinua de la Argentina. Esto justifica el uso de modelos empíricos de Page modificado y Wang-Singh para simular tal comportamiento ya que ellos tienen mayor aplicación en periodos de velocidades decrecientes de secado.

#### 4.2.11. Efecto de la temperatura del aire caliente en las características de secado

Los gráficos 24 y 26 muestran la influencia de la temperatura del aire sobre el secado y la velocidad de secado. Como muestra el gráfico 26, manteniendo la misma velocidad de aire a 0,5 m / s y la carga de quinua en el reactor, el tiempo de secado se acorta con el aumento de temperatura. Bajo temperaturas de 40, 45 y 50 °C el tiempo de secado Tau es diferente, siendo 12, 6 y 4 minutos respectivamente.

Un aumento de la temperatura del aire bajo este rango de valores puede acelerar la velocidad de transferencia de calor y reducir el tiempo de secado. Pero una temperatura más alta podría afectar las propiedades nutricionales en el grano de quinua.

**Gráfico 26.** Humedad versus tiempo para tres temperaturas de aire de secado.



Además durante el proceso de secado, debido al hecho de que el material húmedo se va secando gradualmente, la superficie de vaporización se mueve y se reduce gradualmente hasta el material interior, la velocidad de secado se hace más lenta a medida que la humedad transfiere la velocidad desde la superficie hasta el interior del grano.

Como muestra el gráfico 26, la velocidad de secado depende de la temperatura del aire de secado en el interior del lecho, siendo más rápida para los valores con una temperatura del aire más alta. En un sentido más convincente.

El procesamiento de datos se resume de la siguiente manera:

- Procesamiento de cada curva individual obtenida a partir de  $W$  v  $t$  para determinar qué modelo de secado tiene más consistencia.
- Definir el tiempo de secado específicamente para cada curva a través del parámetro  $\tau$ , por similitud con el procesamiento de descarga del condensador, igual al tiempo necesario para que la humedad de la quinua pase 25% a un valor final de 10% en bases secas. Un análisis estadístico se dirige a los resultados del diseño 2 factoriales mencionado anteriormente para el secado.
- Procesamiento de cada curva individual obtenida de  $MR$  v  $t$  para determinar qué modelo de secado tiene más consistencia ( $\tau$ ).

Antes de presentar los datos experimentales, los modelos matemáticos más utilizados se muestran en la Tabla 39 para la descripción del proceso de secado de granos y alimentos en general (Ayensu, 1997).

#### 4.2.12. Modelos más utilizados en los procesos de secado de grano

**Tabla 39.** Modelos más utilizados en los procesos de secado de grano

Modelo	Ecuación	Referencias	
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Ayensu, 1997)	<b>(19)</b>
Page Modificado	$MR = \exp(-k t^n)$	(Diamante & Munro, 1993), (Diamante & Munro, 1991)	<b>(20)</b> <b>(21)</b>
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Doymaz, 2011)	<b>(22)</b>
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Temple & Van Boxtel, 1999)	<b>(23)</b>
Wang and Singh	$MR = at^2 + bt + 1$	(Özdemir & Devres, 1999)	<b>(24)</b>

Estos modelos se utilizan en general para describir el período de velocidad constante de secado, así como el período de disminución de la velocidad de secado, particularmente los modelos de Page Modificado y Wang y Singh para el modelado de la velocidad decreciente de secado. Donde la razón de la humedad (MR) (Cubillos & Barrero, 2010); (Diamante & Munro, 1993) es un contenido de humedad no dimensional y se puede calcular de acuerdo a la ecuación 12:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

Donde  $M_0$ ,  $M_t$  y  $M_e$  son el contenido de humedad inicial, en cualquier momento (t) y en el equilibrio respectivamente. El contenido de humedad en el equilibrio ( $M_e$ ) es extremadamente pequeño comparado con el contenido de humedad inicial ( $M_0$ ) y en cualquier momento ( $M_t$ ), por lo que se puede omitir de la ecuación anterior (Shi & Xue, 2009).

De acuerdo al valor despreciable de la humedad de equilibrio el cálculo de MR se realiza por la expresión 25:

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \tag{25}$$

Entonces, para el procesamiento de datos de cada curva de secado en función del tiempo, se utilizó la razón de humedad experimental MR respecto al tiempo.

#### **4.2.12.1. Datos obtenidos de los Modelo matemático**

En la tabla 40 se muestran los valores promedios y desviación estándar de los parámetros de los modelos estudiados, donde se observa que k y A aumentan a medida que incrementa la temperatura de secado. En general, los dos modelos propuestos mostraron un buen ajuste con valores altos de  $R^2$  ( $> 0,96$ ) y valores próximos a cero para SSE y  $\chi^2$ . Según los resultados, el modelo que mejor ajusto los datos experimentales fue Page modificado

( $SSE < 0,014$ ,  $\chi^2 < 0,009$ ), ya que con este modelo se lograron los valores más bajos de los estadísticos con respecto a Wang-Singh ( $SSE < 0,045$ ,  $\chi^2 < 0,030$ ). Observaciones similares fueron hechas por Gely y Santalla (2007) en secado de semillas de Quinua en lecho estático, (Roberts, Kidd, & Padilla-Zakour, 2008) en semillas de uvas.

**Tabla 40.** Valores de los parámetros cinéticos y empíricos de los modelos propuestos para las curvas de secado en lecho fijo a velocidad constante  $V=0,5$  m/s

Temperatura (T) (°C)	Modelo de Page modificado			Modelos de Wang-Singh		
	k (min-1)	n	R <sup>2</sup>	A (min-2)	B (min-1)	R <sup>2</sup>
40	0,1147	1,1100	99,93	0,0031	-0,1085	99,44
45	0,1557	1,0871	99,92	0,0049	-0,1368	99,29
50	0,2156	1,0772	99,85	0,00009	-0,1698	98,51

#### 4.2.12.2. Comportamiento de las constantes cinéticas de los modelos.

De acuerdo a los resultados obtenidos para cada tratamiento de secado (tabla 40) se observa que el valor de la constante “k” (min-1) presente en los Modelos de Page Modificado tiende al gráfico a aumentar a medida que se aumenta la temperatura. Este resultado concuerda con lo obtenido por autores como (Vega et al., 2007) y (Empacada & Camacho, 2010) en donde se comprueba que este parámetro cinético es dependiente de la temperatura. También se encuentra este comportamiento en artículos de secado de arándanos con infrarrojo (Vuarant, 2014) y de secado infrarrojo de subproductos de uva (Celma et al., 2009). Sin embargo una tendencia a la disminución con el aumento de la temperatura se encontró para los parámetros “n” del modelo de Page Modificado.

A partir de los resultados obtenidos en el diseño experimental de la tabla 7 se realizaron las mediciones de los valores de TAU para cada una de los 12 tratamientos, con valores de velocidad y temperatura.

La Tabla 41 muestra los valores de las variables independientes T, V y TAU.

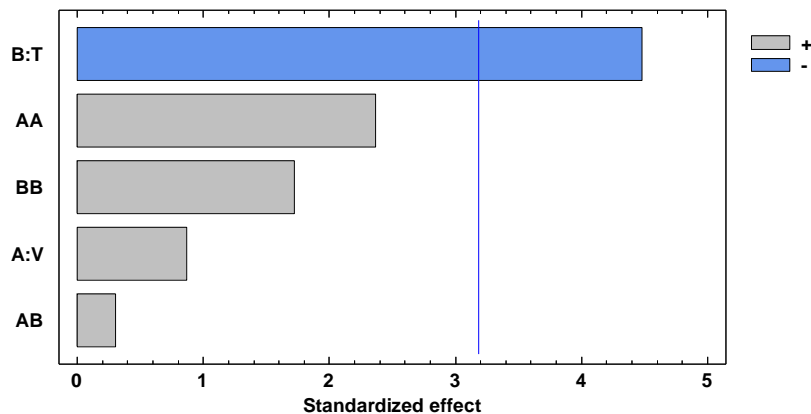
**Tabla 41.** Matriz del diseño experimental del secado de Quinoa en lecho fluidizado

tratamiento	Velocidad m/s	Temperatura °C	Tiempo min
1	0,5	40	12
2	0,5	50	4,2
3	0,86	45	6,5
4	0,68	45	4,5
5	0,5	45	6
6	0,68	40	7
7	0,86	50	6
8	0,68	50	4
9	0,86	40	13

La tabla de ANOVA particiona la variabilidad en Tau en piezas separadas para cada uno de los efectos. A continuación, pone a prueba la significación estadística de cada efecto comparando el cuadrado medio contra una estimación del error experimental. En este caso, 1 efecto tiene los valores de p inferior a 0,05 lo que indica que es significativamente diferente de cero en el nivel de confianza del 95,0%.

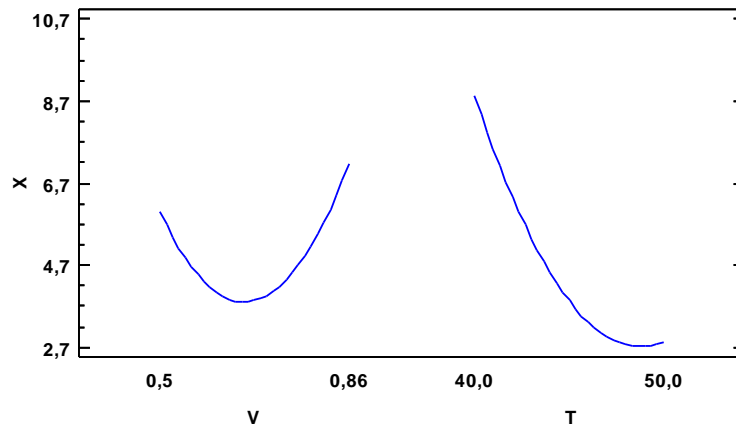
El programa Statgraphics se utilizó para procesar todo el resultado experimental, obteniendo significación tanto para la temperatura como para la velocidad del aire (agente de secado). En el gráfico 27 muestra la tendencia central de Tau sobre la temperatura y la velocidad del aire.

**Gráfico 27.** Diagrama de Pareto estandarizado para Tau



El estadístico R cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 75,3651%. El error estándar de la estimación muestra la desviación estándar de los residuales a ser 1,64148. El error absoluto medio (MAE) de 0,814815 es el valor promedio de los residuos.

**Gráfico 28:** Dependencia de TAU en velocidad y temperatura usando Statgraphics



En la gráfica 28 se aprecia la rapidez de deshidratado Tau en minutos tomando en cuenta la influencia de la velocidad y de temperatura por separado.

#### 4.2.13. Homogeneidad de secado

El proceso de determinación de la homogeneidad del grano seco de quinua con respecto a la humedad final, procede de la siguiente manera:

**A)** Se toman muestras aleatorias de la masa total que queda en el reactor cuando se termina el proceso de secado. Entonces, la humedad se determina en base seca usando el método de secado por estufa y pesos consecutivos.

**B)** Se determina la diferencia entre los valores de humedad para cada muestra. Los resultados fueron los siguientes:



**Tabla 42.** Humedad de las tres muestras aleatorias

Muestra	Humedad base seca (%)
1	10,20
2	10,03
3	10,15

La máxima dispersión entre los valores se considera como error de homogeneidad de secado, donde D es la máxima dispersión de humedad en las muestras de acuerdo con la Tabla 42.

$$D = 10,20 - 10,03 = 0,17 \quad (26)$$

$$\bar{W} = 10,12\%$$

El error relativo se calcula como:

$$E_r = 0,17 / 10,03 = 0,02 \quad (27)$$

$$W = \bar{W} \pm 0,17 = 10,12 \pm 0,17\%$$

Se concluye que la humedad en el lecho es muy homogénea.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Luego de las discusiones de las variables evaluadas en la investigación “Secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) mediante lecho fluidizado”, se ha llegado a las siguientes conclusiones.

- De acuerdo al estudio gasodinámico realizado, la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) adquirida presento experimentalmente valores granulométricos de 1,5 mm que de acuerdo a la norma INEN 1673:2013 corresponde a granos medianos y una porosidad de 0,43, valores que ayudaron a obtener una velocidad mínima de fluidización de 0,38 m/s, valor que no depende del diámetro del cilindro o reactor ya que este no tiene significación para la determinación de la misma.
- El cambio de humedad de los granos de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) en el rango de humedad después del lavado y humedad final o almacenamiento generó una variación lineal en la velocidad mínima de fluidización. Los granos húmedos presentaron una velocidad mínima de fluidización mayor a los secos.

- Los modelos que se ajustan mejor al secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) fueron los de Page modificado y Wang and Singh ya que ambos modelos mostraron un buen ajuste con valores altos de  $\chi^2$  mayores a 0,96. Pero de acuerdo a los resultados, el modelo que mejor ajusto los datos experimentales fue Page modificado ( $SSE < 0,014$ ,  $\chi^2 < 0,009$ ), ya que con este modelo se lograron los valores más bajos de los estadísticos con respecto a Wang-Singh.
- Después de realizada la investigación se concluyó que: el secador de lecho fluidizado demostró eficiencia, ya que permitió que el producto alcance una humedad final de 10 a 12 % en periodos de tiempo de 5 a 20 min esto dependiendo de los diferentes niveles de los factores, mientras que; el tiempo estimado para que la quinua llegue a rangos de aceptabilidad de humedad (10-12 %) en la estufa fueron de alrededor de 15 a 18 horas demostrando así que el secador de lecho fluidizado cumple con los requerimientos de ahorro de energía, producción limpia, disminución de mano de obra, disminución de tiempo de secado e inocuidad antes durante y después del proceso.
- La hipótesis planteada, “La temperatura y flujo de aire, tienen influencia sobre el tiempo de secado de quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan) mediante lecho fluidizado”, es aceptada pues en el análisis estadístico se concluye que tanto la velocidad del aire como la temperatura tienen influencia significativa sobre el secado, la velocidad del gas fluidizante influye de manera significativa en el tiempo global de secado ya que existe más movilidad en la capa y por tanto el intercambio de calor y masa es mejor que cuando se lo hace con valores bajos de velocidad.

De las conclusiones presentadas en base a las variables estudiadas en la presente investigación, se presentan las siguientes recomendaciones.

- Para que el sólido pueda ser tratado en lecho fluidizado, la quinua húmeda debe ser mezclada con quinua seca. El proceso de mezclado de quinua húmeda con quinua

seca mejora notablemente el contacto sólido-gas y evita la formación de canales que hace ineficiente el proceso de secado.

- Se recomienda efectuar una experimentación en donde se contemple valores de humedad mayores y menores a los estudiados para comprobar o descartar que el cambio de los valores de velocidad mínima de fluidización en función de la humedad es lineal.
- Como el proceso de secado por lecho fluidizado fue efectivo debido a los resultados obtenidos durante y después de la fase experimental se recomienda un estudio de escalado para el diseño y construcción de secadores de mayor tamaño para trabajos de secado de diferentes tipos de materiales.
- Se recomienda trabajar con diversos productos que tengan la necesidad de cambiar métodos tradicionales de secado y aplicar durante el proceso pulsaciones para mostrar si estas tienen impacto al momento de fluidizar materiales no tan fáciles de fluidizar.
- El secador de lecho fluidizado es un equipo que tiene muchas utilidades al nivel agroindustrial y se lo aplica en diversas áreas tales como: protección de aromas, estabilización de sustancias activas, estabilización de mezclas, formación de aglomerados y granulados , como mejorador de solubilidad etc. razón por la cual se recomienda realizar cualquiera de los procesos ya establecidos.
- El equipo deberá optimizarse de manera que las pérdidas de calor, materia prima y energía sean las mínimas, antes, durante y después del proceso esto quiere decir que se automatizara y se realizara un manual para que el proceso sea más sencillo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Action, P. (2014). *Secadora de bandejas*.
2. Alberto, C., Pereira, P., González, O., Isabel, A., Hernández, M., & Valencia, M. (2014). *Semillas de quinua (Chenopodium quinoa Willdenow): composición química y procesamiento*. Aspectos relacionados con otras áreas. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5(2), 166-218.
3. Aspurz Tabar, J. (2011). *Obtención de curvas de secado de tomillo (Thymus vulgaris)*. MINAS GERAIS – BRASIL.
4. Ayensu, A. (1997). *Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow*. *Solar Energy*, v.59 n.4, p.121-126.
5. Badiali, O.J.J.; G. Giambastiani; C. Viciano. (2003). *Curso de Secado y Aireación de Granos*. *Catedra de Cereales y oleaginosas*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
6. Brennan, J.G.; J.R. Butters; N.D. Cowell y A.E.V. Lilly. (1970). *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. Editorial Acribia. Zaragoza. España. . 422 p.
7. Bubnovich, V., Villarreal, C., & Reyes, A. (2008). *Computer simulation of the drying of seeds and vegetables in a discontinuous fluidized bed*. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 54(3), 255-278.
8. Cadena, J. M. (2008). *Análisis experimental del secado de semillas de pimienta grande (dp=7.5 mm) en un lecho fluidizador al vacío empleando aire*. Puebla, México: Universidad de las Américas.
9. Cala , R., & Riera , M. (2010). *Estudio comparativo del secado del arroz en lecho fluidizado pulsante*. *Ciencia Amazónica* Vol. 1.
10. Calderini, D.F.; L.G. Abelego and G.A. Slafer. (2000). *Physiological maturity in wheat based on kernel water and dry matter*. *Agron. J.* 92: 5 p. 895- 901.

11. Calle, M., Aguirre, G., & Gabriel, J. (2010). *Efecto del método de secado y nivel de humedad en la germinación y vigor de semillas de quinua*. Revista de agricultura.
12. Calle Benites, R. E., & Aparicio Baidal, J. J. (2011). *Diseño de una planta de deshidratación de hierbas aromáticas*. Pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
13. Carvajal Saravia, R. (2011). *La quinua y la necesidad de realizar investigación agroambiental*. Tinkazos, 14(30), 187-190.
14. Celma, A. R., López-Rodríguez, F., & Blázquez, F. C. (2009). *Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products*. Food and Bioproducts Processing, 87(4), 247-253.
15. Cervilla, N.S.; Mufari, J.R.; Calandri, E. y Guzmán, C.A. (2012). *Propiedades físicas de semillas y análisis proximal de harinas de Chenopodium quinoa Willd. cosechadas en distintos años y provenientes de la Provincia de Salta*. En II Jornadas de Investigación en Ingeniería del NEA y Países Limítrofes. 14-15 de Junio. Facultad Regional Resistencia, Universidad Tecnológica Nacional, Resistencia, Chaco, Argentina.
16. Chao, H. S. D., & Juan, Y. G. Z. J. Z. (2013). *Effect of Microwave Drying on Quality and Volatile Profiles of Rapeseeds*. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1, 013.
17. Corzo Barragán, D. C. (2011). *Análisis y selección de diferentes métodos para eliminar las saponinas en dos variedades de Chenopodium quinoa Willd.*
18. Cubillos, A.; Barrero, O. (2010). *Diseño e implementación de una estrategia de control predictivo para el secado de arroz paddy*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia v.56, p.78-86.
19. de Lima, A. B., Delgado, J., de Oliveira, V., de Melo, J., & e Silva, C. J. (2014). *Porous Materials Drying Model Based on the Thermodynamics of Irreversible Processes: Background and Application Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials* (pp. 1-23): Springer.
20. Diamante, L.; Munro, P. (1991). *Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices*. International journal of food science & technology, v.26 n.1, p.99-109.
21. Diamante, L.; Munro, P. (1993). *Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices*. Solar energy, v.51 n.4, p.271-276.

22. Dong, P., Li, Z., Gao, X., Wu, Z., & Zheng, Z. (2013). *Evaluation of hydrodynamic behavior of a fluidized bed dryer by analysis of pressure fluctuation*. *Drying Technology*, 31(10), 1170-1176.
23. Doymaz, I. (2011). *Convective air drying characteristics of thin layer carrots*. *Journal of food engineering*, v.61 n.3, p.359-364.
24. Empacada, a. d., & Camacho, d. p. (2010). *Determinación de parámetros de un modelo axial y en estado transitorio de la biosorción de azul de metileno*.
25. Fadhil, M., Aris, M. S., Abbas, A. H., Ibrahim, A. B. A., & Aniza, N. (2014). *Minimum Air Fluidization Velocity Study of Specific 2-D Bubbling Fluidized Bed Reactor*. *Applied Mechanics & Materials*, 699, 660-665. doi:10.4028/[www.scientific.net/AMM.699.660](http://www.scientific.net/AMM.699.660)
26. FENNEMA, O.R. (2000). *Química de los Alimentos*. Tercera Edición. Zaragoza. España: Editorial Acribia. 1.258 p.
27. Flores, I. P., & de Jesús, M. (2011). *Efecto del secado por lecho fluidizado en la estructura de semillas de Ricinus communis y en la extracción de su aceite como fuente alternativa de biocombustibles*.
28. Geankoplis, C. J. (2006). *Transport processes and separation process principles (includes unit operations)*. *Procesos de transporte y principios de procesos de separación: incluye operaciones unitarias*: México, DF. Patria.
29. Gely, M. C., & Santalla, E. M. (2007). *Moisture diffusivity in quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds*. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 1029-1033.
30. Goff, J.A. and S. Gratch. (1945). *Thermodynamic properties of moist air*. *Trans. Of the ASAE*. 55:463-464.
31. Gómez Hernández, J. (2010). *Modelo no isotérmico de gasificadores de lecho fluidizado*.
32. Guarneros, G. M. (2005). *Mejoras en la operación de un sistema de secado en lecho fluidizado al vacío con vapor sobrecalentado*. Puebla, México: Universidad de las Américas.

33. Gungor, V. C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. P. (2013). *A survey on smart grid potential applications and communication requirements*. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 9(1), 28-42.
34. Gupta, C.K. y Sathiyamoorthy, D. (1999). *Fluid Bed Technology in Material Processing*, (1era Edición). Florida, Estados Unidos.
35. Icaza Saa, J. E., & Tobar Jácome, P. E. (2012). *Diseño e implementación de la automatización de un horno de secado y envejecido de arroz para la procesadora de PROYELEC Ingenierías*. Fase II. SANGOLQUÍ/ESPE/2012.
36. Jiliang, M., Xiaoping, C., & Daoyin, L. (2013). Minimum fluidization velocity of particles with wide size distribution at high temperatures. *Powder Technology*, 235, 271-278.
37. Levenspiel, O. y Kunii, D. (1991). *Fluidization Engineering*. (2da edición). Massachusetts, Estados Unidos: Howard Brenner.
38. Leva, M. (1959). *Fluidization*: McGraw-Hill.
39. Machado, O., & Ernesto, J. (2002). *Características Fisico Mecánicas y Análisi de Calidad de granos*. Bogotá, Colombia: Universidad de Colombia.
40. Martínez, E. N., & Añón, M. C. (1996). *Composition and structural characterization of amaranth protein isolates. An electrophoretic and calorimetric study*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(9), 2523-2530.
41. Mazón, N.; peralta, E.; monar, C.; Subía, C.; Rivera, M. (2013). *INIAP pata de venado (Taruka Chaki)*. Quito, EC. INIAP. Estación Experimental Santa Catalina, Programa Nacional de Leguminosas y Granos Andinos. Plegable N° 261.
42. Mazón, O., & Peralta, I. (2014). *Estado del Arte de la Quinoa en el Mundo en 2013*.
43. McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (1993). *Unit operations of chemical engineering* (Vol. 5): McGraw-Hill New York.
44. Miranda, R. (2010). *Caracterización Agromorfológica de 685 Acciones de Quinoa (Chenopodium quinoa Willdenow) Pertenecientes al Banco de Germoplasma de Granos Altoandinos del CIBREF – UTO en el CEAC*. Retrieved from Bolivia.
45. Jangam, S., Law, C., & Mujumdar, A. (2010). *Drying of foods, vegetables and fruits*. Canada: Copyright.
46. Naranjo, P. (2010). *Importantes alimentos aborígenes*. Archipiélago. Revista cultural de nuestra América, v. 16, n. 58.



47. Network, G. (2015). *Perspectivas 2015 y balance 2014*. Retrieved 17 de marzo, 2015, from [http://www.prospectiva2020.com/sites/default/files/report/files/83\\_i2020\\_perspectivas2015\\_balance2014\\_lima\\_0.pdf](http://www.prospectiva2020.com/sites/default/files/report/files/83_i2020_perspectivas2015_balance2014_lima_0.pdf)
48. NEOTEC, N. (2010). *Tecnología de Lecho Fluidizado*. Heinen Drying®, Ganderkesee. Obtenido de [www.neuhaus-neotec.de](http://www.neuhaus-neotec.de)
49. Özdemir, M.; Devres, Y. O. (1999). *The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting*. *Journal of Food Engineering*, v.42 n.4, p.225-233.
50. Puerta, G. (2013). *La humedad controlada del grano preserva la calidad del café*.
51. Panchariya, P., Popovic, D., & Sharma, A. (2002). *Thin-layer modelling of black tea drying process*. *Journal of food engineering*, 52(4), 349-357.
52. Peralta, E. (2013). *Variedad mejorada de quinua de contenido de saponina*. Plegable Divulgativo, Estación Experimental Santa Catalina, INIAP, Quito.
53. Perussello, C. A., Kumar, C., de Castilhos, F., & Karim, M. (2014). *Heat and mass transfer modeling of the osmo-convective drying of yacon roots (Smallanthus sonchifolius)*. *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 23-32.
54. Pujos Carrillo, M. L. (2015). *Diseño de un sistema de fluidización por lotes para granos a escala de planta piloto*. Quito, 2015.
55. Rafiee, Sh., Keyhani, A., Sharifi, M., Jafari, A., Mobli, H., Tabatabaefar, A., (2009). *Thin layer drying properties of soybean (Viliamz Cultivar)*. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 11, 289-300.
56. Reyes, A., Mahn, A., Guzmán, C., & Antoniz, D. (2012). *Analysis of the drying of broccoli florets in a fluidized pulsed bed*. *Drying Technology*, 30(11-12), 1368-1376.
57. Roberts, J. S., Kidd, D. R., & Padilla-Zakour, O. (2008). *Drying kinetics of grape seeds*. *Journal of Food Engineering*, 89(4), 460-465.
58. Rodríguez, J. A. S., & Soler, P. A. B. (2001). *Propiedades físicas y aerodinámicas de la cáscara de arroz*: Universidad de Oriente.
59. Rojas W., Pinto M. y Camargo, A. (2003). *Estandarización de listas de descriptores de quinua y canahua*. En: *Informe Técnico Anual 2002 - 2003. Año 2. Proyecto IPGRI-FAD "Elevar la contribución que hacen las especies olvidadas y subutilizadas a la seguridad alimentaria y a los ingresos de la población rural de escasos recursos"*. Fundación PROINPA, La Paz, Bolivia. pp 59-94.

60. Sacilik, K., & Elicin, A. K. (2006). *The thin layer drying characteristics of organic apple slices*. Journal of food engineering, 73(3), 281-289.
61. Sánchez, J., Anaya, I., Gutiérrez, G. F., Vizcarra, M., & ENCB-IPN, T. S. P. (2013). *Estudio hidrodinámico del tostado de café (coffea arabica l.) en un reactor de lecho fluidizado*.
62. Shi, J., & Xue, J. (2009). *Application and development of osmotic dehydration technology in food processing*. Advances in food dehydration. New York.
63. Soto, G. M., Ortega, A. F., Flores, J. M., & Orozco, M. L. (2010). *Características de secado de nopal (Opuntia ficus-indica) por lecho fluidizado*. Acta Universitaria, 20(3), 70-76.
64. Sripinyowanich, J., & Noomhorm, A. (2013). *Effects of freezing pretreatment, microwave-assisted vibro-fluidized bed drying and drying temperature on instant rice production and quality*. Journal of Food Processing and Preservation, 37(4), 314-324.
65. Temple, S.; Van Boxtel, A. (1999). *Modelling of fluidized-bed drying of black tea*. Journal of agricultural engineering research, v.74 n.2, p.203-212.
66. Torrecilla, S. (2000). *Secado del orujo en lecho fluidizado/ móvil*. Departamento de ingeniería química, Madrid. p. 232.
67. Vargas, M. (Ed). (2013). *Congreso Científico de la Quinoa (Memorias)*. La Paz, Bolivia. 682 p.; 21,5 cm.
68. Vega, A., Uribe, E., Lemus, R., & Miranda, M. (2007). *Hot-air drying characteristics of Aloe vera (Aloe barbadensis Miller) and influence of temperature on kinetic parameters*. LWT-Food Science and Technology, 40(10), 1698-1707.
69. Vuarant, C. O. (2014). *Optimización del proceso de secado de arándanos por infrarrojos*.
70. Wang, Z., Sun, J., Liao, X., Chen, F., Zhao, G., Wu, J., & Hu, X. (2007). *Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace*. Food Research International, 40(1), 39-46.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Uniformidad del contenido de humedad del Testigo

Tabla 43. Testigo 1

MUESTRA	CAJA g	INTERVALOS DE TIEMPO	TIEMPO TOTAL	PESO INICAL	PESO FINAL	HUMEDAD BASE SECA	HUMEDAD BASE HÚMEDA
0	38,0507	0	0	47,547	43,015	91,28	47,72
1	38,0507	5	5	47,409	43,015	88,52	46,95
2	38,0507	5	10	47,367	43,015	87,66	46,71
3	38,0507	5	15	47,196	43,015	84,23	45,72
4	38,0507	5	20	46,992	43,015	80,11	44,48
5	38,0507	5	25	46,924	43,015	78,75	44,06
6	38,0507	10	35	46,839	43,015	77,03	43,51
7	38,0507	10	45	46,129	43,015	62,73	38,55
8	38,0507	10	55	46,057	43,015	61,28	38,00
9	38,0507	10	65	45,880	43,015	57,71	36,59
10	38,0507	10	75	45,700	43,015	54,08	35,10
11	38,0507	25	100	45,341	43,015	46,85	31,91
12	38,0507	25	125	45,186	43,015	43,73	30,42
13	38,0507	25	150	45,031	43,015	40,61	28,88
14	38,0507	25	175	44,877	43,015	37,52	27,28
15	38,0507	25	200	44,726	43,015	34,47	25,63
16	38,0507	25	225	44,657	43,015	33,07	24,85
17	38,0507	25	250	44,531	43,015	30,54	23,39
18	38,0507	25	275	44,405	43,015	28,01	21,88
19	38,0507	25	300	44,309	43,015	26,06	20,67
20	38,0507	25	325	44,233	43,015	24,53	19,70
21	38,0507	25	350	44,134	43,015	22,54	18,40
22	38,0507	25	375	44,106	43,015	21,98	18,02
23	38,0507	25	400	44,080	43,015	21,46	17,67
24	38,0507	25	425	44,041	43,015	20,67	17,13

25	38,0507	25	450	44,007	43,015	19,98	16,65
26	38,0507	25	475	43,984	43,015	19,52	16,33
27	38,0507	25	500	43,948	43,015	18,78	15,81
28	38,0507	25	525	43,846	43,015	16,74	14,34
29	38,0507	25	550	43,752	43,015	14,84	12,92
30	38,0507	25	575	43,666	43,015	13,11	11,59
31	38,0507	25	600	43,531	43,015	10,40	9,42
32	38,0507	25	625	43,418	43,015	8,12	7,51
33	38,0507	25	650	43,328	43,015	6,30	5,93
34	38,0507	25	675	43,256	43,015	4,84	4,62
35	38,0507	25	700	43,197	43,015	3,67	3,54
36	38,0507	25	725	43,151	43,015	2,73	2,66
37	38,0507	25	750	43,116	43,015	2,04	2,00
38	38,0507	25	775	43,090	43,015	1,51	1,49
39	38,0507	25	800	43,066	43,015	1,02	1,01
40	38,0507	25	825	43,042	43,015	0,54	0,54
41	38,0507	25	850	43,029	43,015	0,29	0,29
42	38,0507	25	875	43,017	43,015	0,03	0,03
43	38,0507	25	900	43,015	43,015	0,01	0,01
44	38,0507	25	925	43,015	43,015	0,00	0,00

Tabla 44. Testigo 2

MUESTRA	CAJA g	INTERVALOS DE TIEMPO	TIEMPO TOTAL	PESO INICAL	PESO FINAL	HUMEDAD BASE SECA	HUMEDAD BASE HÚMEDA
0	38,2879	0	0	46,058	43,7181	43,08	30,11
1	38,2879	5	5	46,058	43,7181	43,08	30,11
2	38,2879	5	10	45,972	43,7181	41,50	29,33
3	38,2879	5	15	45,894	43,7181	40,07	28,61
4	38,2879	5	20	45,854	43,7181	39,33	28,23
5	38,2879	5	25	45,797	43,7181	38,28	27,68
6	38,2879	10	35	45,663	43,7181	35,82	26,37
7	38,2879	10	45	45,527	43,7181	33,31	24,99
8	38,2879	10	55	45,440	43,7181	31,72	24,08
9	38,2879	10	65	45,382	43,7181	30,63	23,45
10	38,2879	10	75	45,371	43,7181	30,43	23,33
11	38,2879	25	100	45,370	43,7181	30,42	23,32
12	38,2879	25	125	45,353	43,7181	30,11	23,14
13	38,2879	25	150	45,341	43,7181	29,89	23,01
14	38,2879	25	175	45,340	43,7181	29,87	23,00
15	38,2879	25	200	45,331	43,7181	29,70	22,90

16	38,2879	25	225	45,326	43,7181	29,61	22,85
17	38,2879	25	250	45,320	43,7181	29,50	22,78
18	38,2879	25	275	45,310	43,7181	29,32	22,67
19	38,2879	25	300	45,306	43,7181	29,24	22,62
20	38,2879	25	325	45,301	43,7181	29,14	22,57
21	38,2879	25	350	45,239	43,7181	28,02	21,88
22	38,2879	25	375	45,231	43,7181	27,85	21,78
23	38,2879	25	400	45,184	43,7181	27,00	21,26
24	38,2879	25	425	45,141	43,7181	26,21	20,77
25	38,2879	25	450	45,106	43,7181	25,57	20,36
26	38,2879	25	475	45,087	43,7181	25,21	20,13
27	38,2879	25	500	45,064	43,7181	24,78	19,86
28	38,2879	25	525	45,039	43,7181	24,33	19,57
29	38,2879	25	550	45,029	43,7181	24,14	19,44
30	38,2879	25	575	45,007	43,7181	23,74	19,18
31	38,2879	25	600	44,960	43,7181	22,87	18,61
32	38,2879	25	625	44,839	43,7181	20,63	17,11
33	38,2879	25	650	44,651	43,7181	17,18	14,66
34	38,2879	25	675	44,395	43,7181	12,47	11,09
35	38,2879	25	700	44,232	43,7181	9,47	8,65
36	38,2879	25	725	44,161	43,7181	8,16	7,54
37	38,2879	25	750	44,075	43,7181	6,57	6,16
38	38,2879	25	775	43,814	43,7181	1,76	1,73
39	38,2879	25	800	43,787	43,7181	1,26	1,24
40	38,2879	25	825	43,784	43,7181	1,22	1,20
41	38,2879	25	850	43,781	43,7181	1,16	1,15
42	38,2879	25	875	43,780	43,7181	1,14	1,13
43	38,2879	25	900	43,777	43,7181	1,09	1,08
44	38,2879	25	925	43,752	43,7181	0,63	0,62
45	38,2879	25	950	43,743	43,7181	0,47	0,46
46	38,2879	25	975	43,729	43,7181	0,21	0,21
47	38,2879	25	1000	43,719	43,7181	0,01	0,01
48	38,2879	25	1025	43,718	43,7181	0,00	0,00
49	38,2879	10	1035	43,718	43,7181	0,00	0,00

**Tabla 45.** Testigo 3

MUESTRA	CAJA g	INTERVALOS DE TIEMPO	TIEMPO TOTAL	PESO INICAL	PESO FINAL	BASE SECA	BASE HÚMEDA
0	39,6985	0	0	46,767	44,4248	49,55	33,13
1	39,6985	5	5	46,767	44,4248	49,55	33,13
2	39,6985	5	10	46,680	44,4248	47,71	32,30
3	39,6985	5	15	46,566	44,4248	45,29	31,17
4	39,6985	5	20	46,504	44,4248	43,99	30,55
5	39,6985	5	25	46,488	44,4248	43,64	30,38
6	39,6985	10	35	46,457	44,4248	42,99	30,06
7	39,6985	10	45	46,425	44,4248	42,32	29,74
8	39,6985	10	55	46,410	44,4248	42,00	29,58
9	39,6985	10	65	46,384	44,4248	41,46	29,31
10	39,6985	10	75	46,367	44,4248	41,10	29,13
11	39,6985	25	100	46,331	44,4248	40,33	28,74
12	39,6985	25	125	46,323	44,4248	40,17	28,66
13	39,6985	25	150	46,296	44,4248	39,60	28,37
14	39,6985	25	175	46,270	44,4248	39,05	28,08
15	39,6985	25	200	46,242	44,4248	38,45	27,77
16	39,6985	25	225	46,217	44,4248	37,91	27,49
17	39,6985	25	250	46,201	44,4248	37,59	27,32
18	39,6985	25	275	46,197	44,4248	37,50	27,27
19	39,6985	25	300	46,183	44,4248	37,20	27,12
20	39,6985	25	325	46,058	44,4248	34,56	25,69
21	39,6985	25	350	45,936	44,4248	31,97	24,22
22	39,6985	25	375	45,842	44,4248	29,99	23,07
23	39,6985	25	400	45,724	44,4248	27,50	21,57
24	39,6985	25	425	45,636	44,4248	25,62	20,40
25	39,6985	25	450	45,587	44,4248	24,60	19,74
26	39,6985	25	475	45,557	44,4248	23,96	19,33
27	39,6985	25	500	45,526	44,4248	23,31	18,90
28	39,6985	25	525	45,504	44,4248	22,84	18,59
29	39,6985	25	550	45,488	44,4248	22,49	18,36
30	39,6985	25	575	45,762	44,4248	28,29	22,05
31	39,6985	25	600	45,459	44,4248	21,88	17,95
32	39,6985	25	625	45,419	44,4248	21,03	17,38
33	39,6985	25	650	45,384	44,4248	20,29	16,87
34	39,6985	25	675	45,358	44,4248	19,74	16,48
35	39,6985	25	700	45,338	44,4248	19,32	16,19
36	39,6985	25	725	45,308	44,4248	18,68	15,74
37	39,6985	25	750	45,280	44,4248	18,10	15,33
38	39,6985	25	775	45,129	44,4248	14,89	12,96

39	39,6985	25	800	45,023	44,4248	12,65	11,23
40	39,6985	25	825	44,941	44,4248	10,92	9,84
41	39,6985	25	850	44,855	44,4248	9,10	8,34
42	39,6985	25	875	44,745	44,4248	6,77	6,34
43	39,6985	25	900	44,513	44,4248	1,86	1,83
44	39,6985	25	925	44,489	44,4248	1,35	1,33
45	39,6985	25	950	44,483	44,4248	1,23	1,21
46	39,6985	25	975	44,440	44,4248	0,32	0,32
47	39,6985	25	1000	44,451	44,4248	0,54	0,54
48	39,6985	25	1025	44,426	44,4248	0,02	0,02
49	39,6985	10	1035	44,425	44,4248	0,00	0,00
50	39,6985	10	1045	44,425	44,4248	0,00	0,00

## ANEXO 2. Análisis de actividad de agua

Para el análisis de actividad de agua se utilizó el siguiente método:

1. Calibrar el equipo con cloruro de sodio (0,76 Aw)
2. Pesar 1 a 5 g de muestra seca.
3. Realizar la medición después de un tiempo de 2 horas, requerido por el equipo para que el aire presente en dicha atmósfera se encuentre en equilibrio con el producto.
4. Repetir el proceso hasta obtener un valor aproximado al anterior, para luego realizar la lectura de la muestra. A continuación medir el valor de actividad que presenta la muestra seca. La actividad de agua tendrá un valor máximo de 1 y mínimo de 0.

**ANEXO 3. Reglamento técnico ecuatoriano 1673**



Quito - Ecuador

---

**NORMA TÉCNICA ECUATORIANA      NTE INEN 1673:2013**  
**Primera revisión**

---

**QUINUA. REQUISITOS**

**Primera edición**

QUINOA. REQUIREMENTS

*First edition*



Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	QUINUA REQUISITOS	NTE INEN 1673:2013 Primera revisión 2013-09
<p style="text-align: center;"><b>1. OBJETO</b></p> <p>1.1 Esta norma establece los requisitos que debe cumplir el grano de quinua (<i>Chenopodium quinoa Willd</i>) destinado a consumo humano. No aplica a la quinua destinada a semilla.</p> <p style="text-align: center;"><b>2. DEFINICIONES</b></p> <p>2.1 <b>Masa hectolítrica.</b> Masa de grano por unidad de volumen, expresada en kilogramos por hectolitro.</p> <p>2.2 <b>Insecto primario.</b> Es el insecto capaz de romper el grano por sí solo, es decir, sin que por otros medios se facilite el ataque.</p> <p>2.3 <b>Insecto secundario.</b> Es el insecto que por sí solo no es capaz de romper el grano, es decir, que necesita la presencia de insectos primarios u otros medios que faciliten el ataque.</p> <p>2.4 <b>Grano infestado.</b> Es aquel que porta en su superficie o en su parte interna insectos vivos o muertos en cualquiera de sus estados biológicos.</p> <p>2.5 <b>Impurezas.</b> Para efectos de esta norma, comprende:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- granos dañados por calor.</li><li>- granos dañados por humedad.</li><li>- granos quebrados, germinados y ennegrecidos.</li><li>- granos dañados por insectos.</li><li>- otros granos.</li><li>- excremento de animales y vegetales.</li><li>- otros materiales dañinos.</li></ul> <p>2.6 <b>Sachaquinua.</b> Aquellas que corresponden a especies silvestres de quinua, entre las más importantes son las siguientes:</p> <p>Chenopodium album Chenopodium hircinum Chenopodium quinoa var. millanum</p> <p>2.7 <b>Granos de otro color.</b> Granos de <i>Chenopodium quinoa willd</i> de color marrón o negro, o de color diferente al de la variedad.</p> <p>2.8 <b>Granos dañados.</b> Grano de quinua que ha sufrido deterioro por la acción de insectos o agentes patógenos, que este fermentando, germinando o dañado por cualquier otra causa, observables a simple vista.</p> <p style="text-align: center;"><b>3. CLASIFICACION</b></p> <p>3.1 <b>De acuerdo a su tamaño.</b> La quinua se clasifica de acuerdo a su tamaño en los cuatro tipos que se indican en la tabla 1.</p> <p style="text-align: right;"><i>(Continúa)</i></p> <hr/> <p>DESCRIPTORES: Tecnología de los alimentos, Cereales, leguminosas y productos derivados, quinua.</p>		

**TABLA 1. Denominación del tamaño de los granos de quinua en función del diámetro promedio**

Tamaño de los granos	Diámetro promedio de los granos, (mm)	Malla
Extra grande	mayores a 2,0	85% retenido en la malla ASTM 10
Grandes	entre 2,0 a 1,70	85% retenido en la malla ASTM 12
Medianos	entre 1,70 a 1,40	85% retenido en la malla ASTM 14
Pequeños	menores a 1,40	85% que pasa por la malla ASTM 14

**3.2 De acuerdo a las características físicas.** La quinua se clasifica en grados 1, 2 y 3, de acuerdo con los requisitos indicados en la Tabla 5.

**3.3 Designación.** La quinua en grano se designará por su tamaño, grado, seguido de la referencia de esta norma.

Ejemplo: Quinua. Grande. Grado 1. NTE INEN 1673

#### 4. REQUISITOS

##### 4.1 Requisitos específicos

**4.1.1 Color.** La quinua en grano debe presentar un color natural y uniforme, característico de la variedad.

**4.1.2 Sabor.** Para efectos de esta norma de acuerdo con la prueba de espuma, se considera como quinua dulce aquella que da una altura de espuma de 1,0 cm o menor y como quinua amarga aquella que da una altura de espuma superior a 1,0 cm (ver Norma NTE INEN 1672).

**4.1.3 Olor.** La quinua en grano, en un examen organoléptico, debe estar libre de olores producidos por contaminación de mohos o por una mala conservación u otros olores objetables.

**4.1.4 Requisitos físicos.** La quinua en grano debe cumplir con los requisitos indicados en la tabla 2.

**TABLA 2. Requisitos físicos de la quinua**

REQUISITO	VALORES		
	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Piedrecillas en 100 g de muestra	-	Ausencia	NTE INEN 1671
Insectos (enteros, partes o larvas)	-	Ausencia	NTE INEN 1671

**4.1.5 Requisitos bromatológicos.** La quinua en grano debe cumplir con los requisitos indicados en la tabla 3.

**TABLA 3. Requisitos bromatológicos de la quinua**

REQUISITO	VALORES		
	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Humedad, %(m/m)	-	13,5%	NTE INEN 1235
Proteínas, %(m/m)	10,0 %	-	ISO 20483
Cenizas, %(m/m)	-	3,5 %	NTE INEN 1671
Grasa, %(m/m)	4,0 %	-	ISO 11085
Fibra cruda, %(m/m)	3,0 %	-	NTE INEN 1671
Carbohidratos, % (m/m)	65,0 %	-	Determinación indirecta

(Continúa)

**4.1.6 Requisitos microbiológicos.** La quinua debe cumplir con los requisitos indicados en la tabla 4.

**TABLA 4. Requisitos microbiológicos de la quinua**

MICROORGANISMO	N	c	VALORES		
			M	M	Método de ensayo
Mohos	5	3	10 <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>	NTE INEN 1529-10

En donde:

n = Número de muestras que se van a examinar

c = Número de muestras permisibles con resultados entre m y M

m = Índice máximo permisible para identificar nivel de buena calidad

M = Índice máximo permisible para identificar nivel de calidad aceptable.

**4.7** La quinua se ajustará a los límites máximos de residuos de plaguicidas establecidos por la Comisión del Codex Alimentarius, CAC/LMR 01-2009.

**4.8 Grados de quinua.** La quinua en grano ensayada con las normas INEN correspondientes debe cumplir con los requisitos establecidos en la Tabla 5. El grado que se asigne al lote será el que corresponda al factor de calidad más bajo de la muestra.

**TABLA 5. Tolerancias admitidas para la clasificación de los granos de quinua en función a su grado**

Características	Unidad	Grado 1		Grado 2		Grado 3	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Granos enteros	%	96		90		86	
Granos quebrados	%		1,5		2,0		3,0
Granos dañados	%		1,0		2,5		3,0
Granos de color	%		1,0		2,0		3,0
Granos germinados	%		0,15		0,25		0,30
Granos recubiertos (vestidos)	%		0,25		0,30		0,35
Granos inmaduros (verdes)	%		0,50		0,70		0,90
Impurezas totales	%		0,25		0,30		0,35
Variedades contrastantes	%		1,0		2,0		2,5

## 5. INSPECCIÓN

**5.1** Los procesos de inspección que deben seguirse para la aceptación de lotes de quinua se especifican a continuación:

### 5.1.1 Muestreo

**5.1.1.1** El muestreo debe realizarse de acuerdo a las Directrices Codex sobre muestreo CAC/GL 50, a la norma ISO 10725 para productos a granel, la familia de ISO 2859 e ISO 3951 para producción continua o lotes aislados, y las normas ISO 8422 e ISO 8423 para inspección por atributos y variables.

**5.1.1.2** Los requisitos de cantidad de producto en paquetes y sus tolerancias debe estar de acuerdo a lo establecido en la NTE INEN-OIML R 87.

### 5.1.2 Aceptación y rechazo

**5.1.2.1** Si el producto cumple con los requisitos especificados en esta norma el lote es aceptado.

**5.1.2.2** Si el producto no cumple con uno o más de los requisitos especificados en esta norma el lote es rechazado.

(Continúa)

## 6. ENVASADO Y EMBALADO

La quinua en grano para consumo podrá ser comercializada a granel o envasada en sacos limpios de material resistente a la acción del producto, de tal manera que no afecte o altere las características o la composición del mismo.

**6.1** Los envases deben ser nuevos y estar en condiciones sanitarias adecuadas, limpios y exentos de materias extrañas a fin de que resguarden la estabilidad y calidad del producto envasado, debiendo además protegerlo de cualquier contaminación durante su transporte, almacenamiento y comercialización.

**6.2** Los recipientes, incluido el material de envasado, deben estar fabricados sólo con sustancias que sean de grado alimentario, inocuas y adecuadas para el uso al que están destinadas.

**6.3** Los envases deben proteger al producto de la hidratación, constituyendo una barrera a la absorción de humedad externa suficiente para mantenerlo durante el almacenamiento, dentro del límite máximo de humedad establecido en esta norma.

## 7. ROTULADO

Los envases y las guías de despacho al granel deben llevar rótulos con caracteres legibles e indelebles, redactados en español o en otro idioma, si las necesidades de comercialización así lo dispusieran, en tal forma que no desaparezcan bajo condiciones normales de almacenamiento y transporte, con la información siguiente:

- a) Nombre del producto.
- b) Designación de acuerdo con lo especificado en el numeral 3.6.
- c) Masa (peso) neta en kilogramos.
- d) Indicaciones sobre tratamiento contra plagas efectuadas en el grano.

El rotulado y etiquetado del producto envasado para comercialización directa al consumidor, debe cumplir con lo indicado en las NTE INEN 1334-1 y NTE INEN 1334-2.

**APENDICE Z****Z.1 NORMAS A CONSULTAR**

Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1233	<i>Granos y cereales Muestreo.</i>
Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1235	<i>Granos y cereales. Determinación del contenido de humedad (Método de rutina).</i>
Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1670	<i>Quinoa. Determinación de la proteína total. (Proteína cruda)</i>
Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1671	<i>Quinoa. Determinación del nivel de infestación y de las Impurezas.</i>
Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1672	<i>Quinoa. Determinación del contenido de saponinas por medio del método espumoso (método de rutina).</i>
Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1334-1	<i>Rotulado de Productos Alimenticios para consumo humano. Parte 1. Requisitos.</i>
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1334-2	<i>Rotulado de Productos Alimenticios para consumo humano. Parte 2. Rotulado nutricional. Requisitos</i>
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1529-10	<i>Control microbiológico de los alimentos. Mohos y levaduras viables. Recuento en placa por siembra en profundidad</i>
Recomendación Técnica Ecuatoriana NTE INEN-OIML R 87	<i>Cantidad de producto en paquetes.</i>
Norma Internacional ISO 8422	<i>Sequential sampling plans for inspection by attributes</i>
Norma Internacional ISO 8423	<i>Sequential sampling plans for inspection by variables for percent nonconforming (known standard deviation)</i>
Norma Internacional ISO 2859	<i>Series of standards for sampling for inspection by attributes.</i>
Norma Internacional ISO 3951	<i>Series of standards for sampling procedures for inspection by variables.</i>
Norma Internacional. ISO 10725	<i>Acceptance sampling plans and procedures for the inspection of bulk materials.</i>
Comisión del Codex Alimentarius CAC/LMR 01-2009	<i>Lista de Límites Máximos para Residuos de Plaguicidas.</i>
Directrices del Codex Alimentarius CAC/GL 50-2004	<i>Directrices Generales sobre Muestreo</i>

**Z.2 BASES DE ESTUDIO**

- MICRO ORGANISMS IN FOODS 2. Sampling for microbiological analysis: Principles and specific applications. Second edition. ICMSF Blackwell Scientific Publications 1986
- Norma Andina NA 0038 GRANOS ANDINOS. Pseudos cereales. Quinoa en grano. Clasificación y requisitos. Comité Andino de Normalización, Gaceta Oficial del Acuerdo de Cartagena N° 1580 , 2008
- Historia de las Dos Primeras Variedades de Quinoa*, INIAP. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Quito, 1986.
- II Congreso Internacional de Cultivos Andinos*. ITCA. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Organización de Estados Americanos. Riobamba, 1980.
- Programa de cultivos Andinos*. Convenio INIAP-CI ID, II Fase. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Centro Internacional de Investigaciones para el desarrollo. Quito, 1986.
- Centro Nestlé de Investigación y Desarrollo para América Latina, LATINRECO S.A. *Determinación del contenido de saponinas en quinoa por el método espumoso*. Quito, 1987.
- Norma Colombiana ICONTEC 602 (Cuarta revisión). *Granos y Cereales. Sorgo granífero para consumo animal*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Bogotá, 1979.

### INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

<b>Documento:</b> NTE INEN 1673 Primera revisión	<b>TÍTULO:</b> QUINUA. REQUISITOS	<b>Código:</b> AG 05-04-412
<b>ORIGINAL:</b> Fecha de iniciación del estudio:	<b>REVISIÓN:</b> Fecha de aprobación anterior por Consejo Directivo 1988-06-27 Oficialización con el Carácter de Obligatoria por Acuerdo No. 290 de 1988-07-06 publicado en el Registro Oficial No. 978 de 1988-07-14	
	Fecha de iniciación del estudio: 2012-07-19	
Fechas de consulta pública: 2012-11-20 al 2012-12-20		

Subcomité Técnico:  
Fecha de iniciación: Fecha de aprobación:  
Integrantes del Subcomité:

**NOMBRES:**

**INSTITUCIÓN REPRESENTADA:**

Mediante compromiso presidencial N° 16364, el Instituto Ecuatoriano de Normalización – INEN, en vista de la necesidad urgente, resuelve actualizar el acervo normativo en base al estado del arte y con el objetivo de atender a los sectores priorizados así como a todos los sectores productivos del país.

Para la revisión de esta Norma Técnica se ha considerado el nivel jerárquico de la normalización, habiendo el INEN realizado un análisis que ha determinado su conveniente aplicación en el país.

La Norma en referencia ha sido sometida a consulta pública por un periodo de 30 días y por ser considerada EMERGENTE no ha ingresado a Subcomité Técnico.

Otros trámites: Esta NTE INEN 1673:2013(Primera revisión), reemplaza a la NTE INEN 1673:1988

♦<sup>10</sup> Esta norma sin ningún cambio en su contenido fue DESREGULARIZADA, pasando de OBLIGATORIA a VOLUNTARIA, según Resolución Ministerial y oficializada mediante Resolución No. 14158 de 2014-04-21, publicado en el Registro Oficial No. 239 del 2014-05-06.

La Subsecretaría de la Calidad del Ministerio de Industrias y Productividad aprobó este proyecto de norma

Oficializada como: Obligatoria Por Resolución No. 13286 de 2013-08-13  
Registro Oficial No. 84 de 2013-09-19

---

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre  
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2)2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815  
Dirección General: E-Mail: [direccion@inen.gob.ec](mailto:direccion@inen.gob.ec)  
Área Técnica de Normalización: E-Mail: [normalizacion@inen.gob.ec](mailto:normalizacion@inen.gob.ec)  
Área Técnica de Certificación: E-Mail: [certificacion@inen.gob.ec](mailto:certificacion@inen.gob.ec)  
Área Técnica de Verificación: E-Mail: [verificacion@inen.gob.ec](mailto:verificacion@inen.gob.ec)  
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: E-Mail: [inenlaboratorios@inen.gob.ec](mailto:inenlaboratorios@inen.gob.ec)  
Regional Guayas: E-Mail: [inenguayas@inen.gob.ec](mailto:inenguayas@inen.gob.ec)  
Regional Azuay: E-Mail: [inencuenca@inen.gob.ec](mailto:inencuenca@inen.gob.ec)  
Regional Chimborazo: E-Mail: [inenriobamba@inen.gob.ec](mailto:inenriobamba@inen.gob.ec)  
URL: [www.inen.gob.ec](http://www.inen.gob.ec)

**ANEXO 4.** Análisis microbiológicos para la quinua *Chenopodium quinoa* (INIAP Tunkahuan).



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN 002 - CONEA - 2010 - 129 - DC.  
Resolución No. 001 - 073 - CEAACES - 2013 - 13

FICAYA

Laboratorio de Análisis Físicos, Químicos y Microbiológicos

Informe N°:	021 - 2016
Análisis solicitado por:	Sr. Hugo Trujillo
Empresa:	Particular
Muestreado:	Propietario
Fecha de recepción:	10 de febrero de 2016
Fecha de entrega informe:	10 de febrero de 2016
Ciudad:	Ibarra
Provincia:	Imbabura
Muestra:	Quinoa
No. de Lote	No aplica
No. Unidades Analizadas	2

Parámetro Analizado	Unidad	Resultado		Metodo de ensayo
		inicial	final	
Proteína Total	%	12,6	10,6	AOAC 920.87
Actividad de agua	-----	0,68	0,64	Aw metter

Los resultados obtenidos pertenecen exclusivamente para las muestras analizadas

Atentamente:

Bioq. José Luis Moreno  
Técnico de Laboratorio



#### Visión Institucional

La Universidad Técnica del Norte en el año 2020, será un referente en ciencia, tecnología e innovación en el país, con estándares de excelencia institucionales.

Av. 17 de Julio S-21 y José María  
Córdova, Barrio El Olivo.  
Teléfono: (06)2997800  
Fax: Ext: 7711.  
Email: utn@utn.edu.ec  
www.utn.edu.ec  
Ibarra - Ecuador



ANEXO 5. Fotos





