

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL



DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE DESHIDRATADO DE LA
SETA COMESTIBLE (*Boletus Edulis*) EN DOS TIPOS DE
SECADORES

TESIS

Presentado para optar el título profesional
de:

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

PRESENTADO POR:

Bach. MILAGROS JULIETA FLORES PAREDES

Bach. YUDI ZENOVIA VALERO CAHUAPAZA

PUNO - PERÚ

2011

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

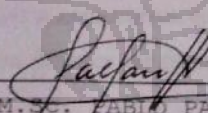
TESIS

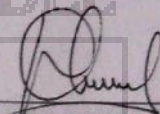
DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE DESHIDRATADO DE LA SETA
COMESTIBLE (*Boletus Edulis*) EN DOS TIPOS DE SECADORES

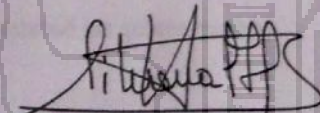
PRESENTADO POR: Bach. MILAGROS JULIETA FLORES PAREDES
Bach. YUDI ZENOVIA VALERO CAHUAPAZA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGROINDUSTRIAL

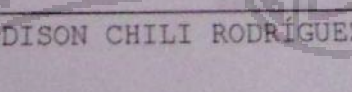
Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

PRESIDENTE DE JURADOS: 
Ing. M.Sc. PABLO PARI HUARCAYA

PRIMER MIEMBRO: 
Ing. M.Sc. FLORENTINO VICTOR
CHOQUEHUANCA CÁCERES

SEGUNDO MIEMBRO: 
Ing. M.Sc. SILVANA AGUILAR TUESTA

DIRECTOR DE TESIS: 
Ing. M.Sc. GENNY ISABEL LUNA MERCADO

ASESORES DE TESIS: 
Ing. EDISON CHILI RODRÍGUEZ

Ing. JERÓNIMO MARTÍN SARCO BURGOS

Área: Ingeniería y tecnología

Tema: Desarrollo de procesos y productos agroindustriales sostenibles y eficientes

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico con todo mi amor y cariño a Dios
y a mi madre Basilia Paredes Castillo;
por haberme dado la vida y
haberme dado todo lo que soy como persona,
todo ello con gran amor y sin pedir nada a cambio ,
a Juan Carlos Condori Cutipa quien
inicio el estudio de *B. edulis* pero por razones
de la vida no lo concluyó en su persona
pero de cierta manera lo concluye en mí.

A mi padre Sebastián Flores Rojas, a mis
hermanos María , Sergio , Sonia y mi cuñado Ronald
por el apoyo moral y amistad incondicional.

A mi amiga y compañera Yudi gracias por
depositar tu confianza en mí y haberte
dado el tiempo para que juntas ejecutemos
este trabajo.

Va por ustedes! ... por lo que valen, porque los admiro,
por darme apoyo y fortaleza en los buenos y malos
momentos de mi vida.

Milagros J. Flores P.

DEDICATORIA

Mi gratitud, principalmente está dirigida al Dios Todopoderoso por haberme dado la existencia y permitido llegar al final de mi carrera.

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, a mis padres **EFRAIN Y EPIFANIA** que me dieron la vida, quienes han sabido formarme con valores, especialmente por sus sabios consejos y por estar a mi lado en los momentos difíciles, lo cuál me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino. Gracias papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí.

A mi Mamita **EPIFANIA** por estar siempre dispuesta a escucharme, ayudarme y quien con su simpleza se convirtió en mi mejor amiga. ¡Gracias por darme la vida!

¡Te quiero mucho!

A mis hermanos **DANNY BRAYAN, MARIBEL, AYDEE Y ROGER** quienes me acompañan en silencio con una comprensión a prueba de todo y contagiarme la alegría de vivir, gracias a la confianza que siempre nos hemos tenido; por el apoyo y amistad los quiero mucho!

A mi amiga y compañera Milagros gracias por tu amistad y perseverancia para culminar bien este trabajo sobre todo gracias por la alegría que me brindaste durante el trayecto de esta aventura que emprendimos juntas.

YUDI Z. VALERO C.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, y a nuestra escuela profesional de Ingeniería Agroindustrial por nuestra formación profesional.

A nuestros miembros del jurado revisor Ing. Pablo, Ing. Víctor, Ing. Silvana, gracias por la paciencia, correcciones, y la confianza puesta en nosotras al permitirnos ejecutar este trabajo.

A nuestro director de tesis Ing. Genny Luna por la dirección en las diferentes etapas del presente trabajo; gracias por acompañarnos hasta la culminación del mismo.

A nuestros queridos docentes: Ing. Víctor Choquehuanca, Pablo Pari, Lizandro Fernández y Genny Luna. Con sus conocimientos, orientación, paciencia y motivación han sido capaces de ganarse nuestra lealtad y admiración, así como el sentirnos en deuda con ellos por todo lo recibido durante el periodo que duró nuestra formación profesional.

A nuestros padres y hermanos; por creer en nosotras y porque han contribuido positivamente para llevar a cabo esta difícil jornada.

A los trabajadores administrativos de la carrera: Srta. Nohemí, Sr. Pablo, Sr. Rufino, Sr. Germán gracias por las facilidades brindadas para el uso de laboratorios y lo más valioso la amistad que nos dieron.

Al Ing. Juan Carlos Condori Cutipa por la asesoría y apoyo en la ejecución del presente trabajo de forma desinteresada.

Al Ing. Gerónimo Sarco por la asesoría brindada.

A todos nuestros amigos y compañeros Sinthya Condori, Martha, Elvira, Yaqueline Doris, Julio Callo, Lenin, Beatriz, Liz Abado, Margarita, Yuri, Lizelle, Luzmila, Zenón, Brando, Russbel, Rachel, Irlanda; muchas gracias por estar con nosotras en todo este tiempo donde hemos vivido momentos felices y tristes, siempre los llevaremos en nuestro corazón.

A todas y todos quienes de una u otra forma han colocado un granito de arena para el logro de este Trabajo de Grado.

Gracias a todos ustedes que creyeron en nosotras, no los defraudaremos.

INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	ASPECTOS GENERALES DE LA MATERIA PRIMA.....	3
2.1.1.	HONGOS.....	3
2.1.2.	PRINCIPALES FORMAS DE VIDA DE LOS HONGOS.....	4
2.1.2.1.	Hongos saprófitos	4
2.1.2.2.	Hongos simbióticos	4
2.1.2.3.	Hongos parásitos	4
2.1.3.	SETAS U HONGOS DE SOMBRERO.....	4
2.1.3.1.	CARACTERÍSTICAS DE UN HONGO COMESTIBLE	5
2.1.4.	MORFOLOGÍA DE LAS SETAS.....	5
2.1.4.1.	Sombrero	5
2.1.4.2.	Cutícula	6
2.1.4.3.	El himenóforo	6
2.1.4.4.	Pie	6
2.1.4.5.	Anillo	6
2.1.4.6.	Volva	6
2.1.4.7.	Micelio	7
2.1.5.	VALOR NUTRITIVO.....	7
2.1.6.	CONSUMO DE SETAS COMESTIBLES.....	8
2.1.7.	SETA COMESTIBLE <i>Boletus edulis</i>	8
2.1.7.1	Valor nutricional de la seta <i>Boletus edulis</i> ..	10
2.1.7.6.	Potencialidades de la seta comestible	10
2.1.8.	MÉTODOS DE CONSERVACIÓN.....	10
2.1.8.1.	Conservación en natural	10
2.1.8.2.	Conservación en ácido acético (vinagre)	11
2.1.8.3.	Congelación	11
2.1.8.4.	Deshidratado	11
2.2.	CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN Y SECADO	11
2.2.1.	DESHIDRATACIÓN.....	12
2.2.2.	PROCESOS QUE OCURREN DURANTE EL DESHIDRATADO.....	13
2.2.3.	CAMBIOS OCURRIDOS DURANTE LA DESHIDRATACIÓN.....	13
2.2.3.1.	Encogimiento	13

2.2.3.2.	Oscurecimiento o pardeamiento de la seta durante el deshidratado	14
2.2.3.3.	Pardeamiento enzimático	15
2.2.3.4.	Pardeamiento no enzimático	16
	a) Reacciones de Maillard	16
	b) Reacciones de caramelización	16
2.2.4.	TECNICAS DE DESHIDRATACIÓN.....	16
2.2.5.	SECADO.....	18
	2.2.5.1. Parámetros que rigen el proceso de secado ...	18
	a) Humedad inicial	18
	b) Humedad de equilibrio	19
	c) Humedad libre	19
	d) Humedad Crítica	19
	e) Temperatura de bulbo seco	19
	f) Temperatura de bulbo húmedo	19
	g) Temperatura máxima	20
2.2.6.	CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO.....	20
	2.2.6.1. Conversión de los datos a curva de velocidad de secado	21
2.2.7.	ETAPAS DE LA VELOCIDAD DE SECADO.....	22
	2.2.7.1. Factores que afectan a la velocidad de secado	24
	a) Superficie del producto.....	24
	b) Temperatura.....	24
	c) Velocidad del aire.....	24
	d) Humedad del aire.....	25
2.2.8.	DIFUSION.....	25
	2.2.8.1. Ley de Fick	26
	2.2.8.2. Coeficiente de difusión	26
2.2.9.	MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL AJUSTE DE LOS DATOS.....	27
	a) Modelo exponencial o modelo de Newton .	28
	b) Modelo de Page	28
2.3.	SISTEMAS DE SECADO.....	29
2.3.1.	SECADO SOLAR TRADICIONAL.....	29
2.3.2.	SECADO SOLAR TÉCNICO.....	29
	2.3.2.1. Secado solar directo	30
	2.3.2.2 secado solar indirecto	30

2.3.2.3. Secado solar mixto	30
2.4. SECADORES POR ENERGÍA SOLAR (SECADORES SOLARES).....	30
2.4.1. SECADOR SOLAR INDIRECTO DE CONVECCION FORZADA.....	31
2.4.1.1. Partes del secador solar indirecto de convección forzada	32
2.4.1.1.1. Cámara de secado	32
2.4.1.1.2. Colector solar	32
A) Componentes básicos del colector solar	32
B) Orientación del colector solar	33
2.4.2. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SECADORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AIRE	33
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
3.1. MATERIALES.....	34
3.1.1. MATERIA PRIMA.....	34
3.1.2. MATERIAL DE LABORATORIO.....	35
3.1.3. EQUIPOS	35
3.1.4. REACTIVOS.....	36
3.1.5. MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO CON CIRCULACIÓN DE AIRE FORZADO	36
3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	37
3.2.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE SECADO, HUMEDAD DE SÓLIDO, DIFUSIVIDAD Y AJUSTE A LOS MODELOS EMPÍRICOS	37
3.2.1.1. Descripción del proceso	38
3.2.1.2. Cálculos en el proceso de secado de la seta.	39
3.2.1.3. Determinación del coeficiente de difusividad efectiva del agua.....	40
3.2.1.4. Determinación para ajuste a los modelos empíricos	41
3.2.2. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO CON AIRE FORZADO	41
3.2.3. METODOLOGÍA PARA COMPARAR EL SECADOR DE LECHO FIJO CON AIRE FORZADO Y EL SECADOR SOLAR INDIRECTO	43
3.2.3.1. Determinación de proteína	43
3.2.3.2. Determinación de grasa	43
3.2.3.3. Determinación de fibra cruda	44
3.2.3.4. Determinación de humedad	44
3.2.3.5. Determinación de ceniza	45

3.2.3.6. Determinación de carbohidratos	45
3.3. BALANCE DE MATERIA.....	46
3.4. CÁLCULOS PARA EL BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.....	47
3.4.1. Cálculos para el balance de materia.....	47
3.4.2. Cálculos para el balance de energía.....	47
3.5. FACTORES DE ESTUDIO	49
3.5.1. DISEÑO ESTADÍSTICO.....	50
3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL EN LA EVALUACION DEL DESHIDRATDO DE LA SETA COMESTIBLE <i>Boletus edulis</i>	51
3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL COMPARATIVO DE LOS DOS SECADORES.	52
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	53
4.1 RESULTADOS PARA LA VELOCIDAD DE SECADO, HUMEDAD DE SÓLIDO, DIFUSIVIDAD Y AJUSTE A LOS MODELOS EMPÍRICOS	53
4.1.1. EVALUACIÓN DE LAS CURVAS DE CINETICA SECADO.....	53
4.1.2. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EFECTOS DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE AIRE SOBRE LA VELOCIDAD DE SECADO	64
4.1.3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA DIFUSIVIDAD.....	72
4.1.4. RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	74
4.2. RESULTADOS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO CON AIRE FORZADO	76
4.2.1. DISEÑO DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO.....	76
A) Colector solar	76
b) Cámara de secado	77
c) Ducto de circulación de aire	78
d) Otros elementos del secador	78
4.3. COMPARACIÓN ENTRE AMBOS SECADORES.....	80
V. CONCLUSIONES.....	88
VI. RECOMENDACIONES.....	89
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	90
VIII. ANEXOS.....	99

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Morfología de una seta	7
Figura N° 2. Curva de cinética de secado.....	22
Figura N° 3. Curva de velocidad de secado.....	22
Figura N° 4. Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua	27
Figura N° 5. Parámetros para diseño y construcción de secadores solares.....	33
Figura N° 6. Metodología experimental para el deshidratado de la seta <i>Boletus edulis</i>	37
Figura N° 7. Diagrama de flujo para el diseño y construcción de un secador solar indirecto con aire forzado..	42
Figura N° 8. Balance de materia en el deshidratado de la seta.....	46
Figura N° 9. Diseño experimental en la evaluación del deshidratado de la seta comestible <i>B. edulis</i> ...	51
Figura N° 10. Diseño experimental para el comparativo de los dos secadores en el deshidratado de la seta	52
Figura N° 11. Curva de cinética de secado para la temperatura de 40 °C y velocidades de aire de 1 y 1,5 m/s... 53	53
Figura N° 12. Curva de cinética de secado para la temperatura de 50 °C y velocidades de aire de 1 y 1,5 m/s... 54	54
Figura N° 13. Curva de cinética de secado para la temperatura de 60 °C y velocidades de aire de 1 y 1,5 m/s... 55	55
Figura N° 14. Curva de cinética de secado ajustada a una regresión lineal para la temperatura de 40 °C y velocidades de aire de 1 y 1,5 m/s.	57
Figura N° 15. Curva de cinética de secado ajustada a una regresión lineal para la temperatura de 50 °C y velocidades de aire de 1 y 1,5 m/s..	58
Figura N° 16. Curva de cinética de secado ajustada a una regresión lineal para la T° de 60 °C y Vel. de aire de 1 y 1,5 m/s.....	58
Figura N° 17. Curvas de velocidad de secado de la seta <i>Boletus edulis</i> a T° 40°C y Vel. de aire de 1 y 1.5 m/seg..	60

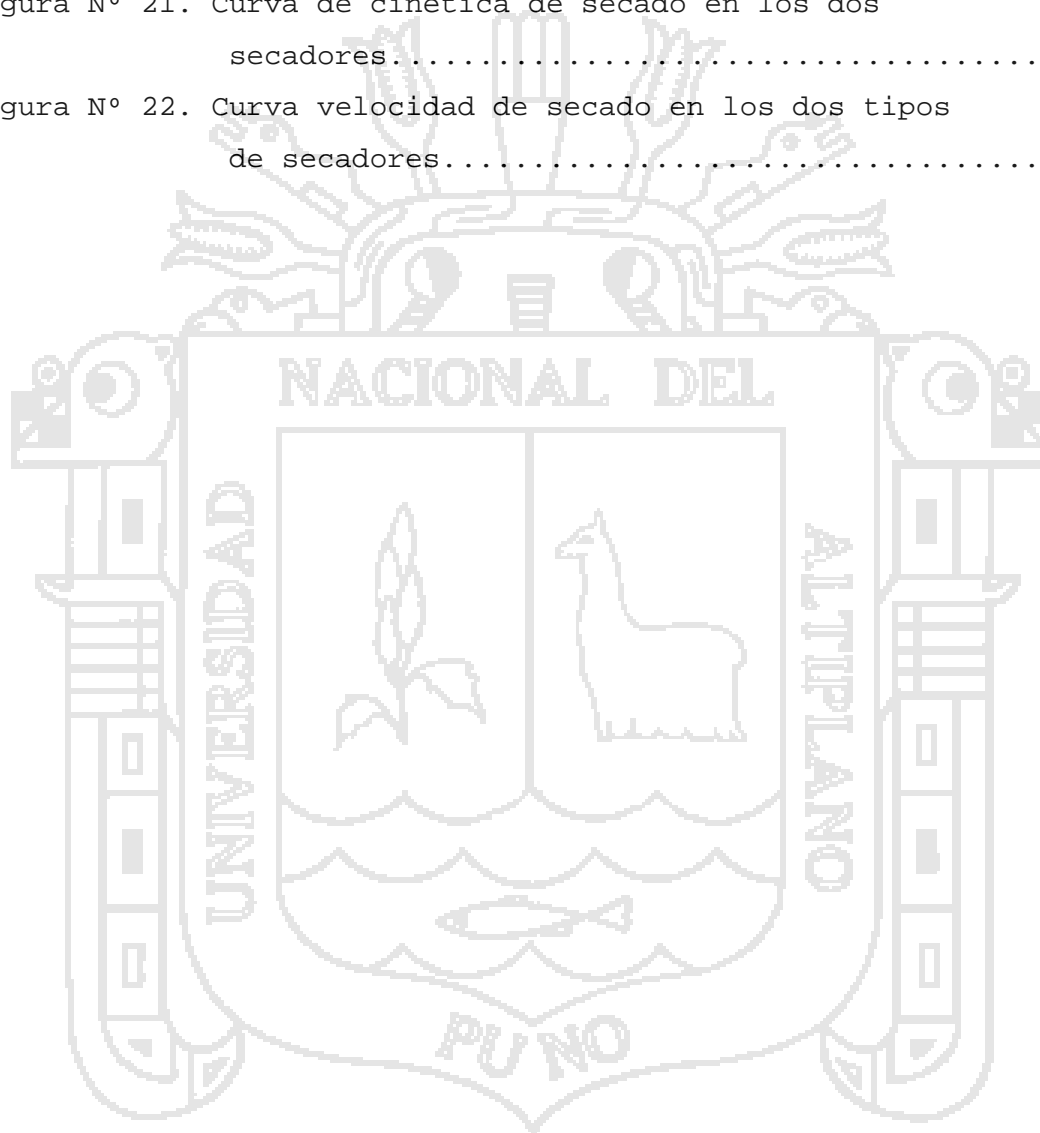
Figura N° 18. Curvas de velocidad de secado de la seta
B. edulis a temperatura 50 °C y velocidades
de aire de 1 y 1.5 m/seg..... 61

Figura N° 19. Curvas de velocidad de secado de la seta
Boletus edulis a T° 60 °C y Vel. de aire de
1 y 1.5 m/seg..... 62

Figura N° 20. Plano del secador solar.....79

Figura N° 21. Curva de cinética de secado en los dos
secadores..... 86

Figura N° 22. Curva velocidad de secado en los dos tipos
de secadores..... 87



INDICE DE TABLAS

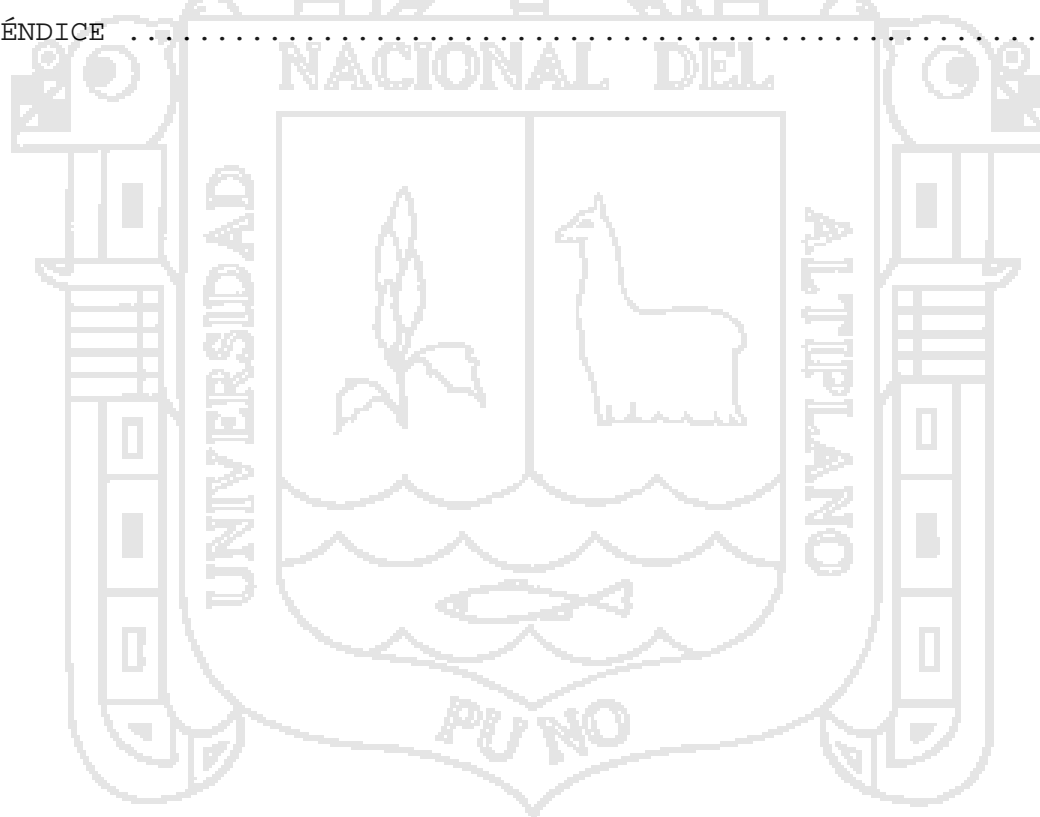
Tabla N° 1. Clasificación de los hongos.....	3
Tabla N° 2. Diferencias entre una seta comestible y venenosa...	5
Tabla N° 3. Consumo promedio de setas comestibles	8
Tabla N° 4. Composición nutricional de la seta comestible <i>Boletus edulis</i>	10
Tabla N° 5. Materiales empleados en el trabajo	35
Tabla N° 6. Equipos empleados en el trabajo	35
Tabla N° 7. ANOVA Punto "b".....	64
Tabla N° 8. Duncan para el punto "b".....	65
Tabla N° 9. Efecto simple de interacción velocidad dentro de temperatura para el punto "b".	65
Tabla N° 10. Efecto simple de interacción de la temperatura dentro de velocidad para el punto "b".....	66
Tabla N° 11. ANOVA Punto "c".....	67
Tabla N° 12. Duncan para el punto "c".....	67
Tabla N° 13. Efecto simple de interacción velocidad dentro de temperatura para el punto "c".	68
Tabla N° 14. Efecto simple de interacción temperatura dentro de velocidad para el punto "c".	68
Tabla N° 15. ANOVA Punto "d".....	69
Tabla N° 16. Duncan para el punto "d".....	70
Tabla N° 17. Efecto simple de interacción velocidad dentro de temperatura para el punto "d".	71
Tabla N° 18. Efecto simple de interacción temperatura dentro de velocidad para el punto "d".	71
Tabla N° 19. Coeficiente de difusividad efectiva del agua presente en la seta <i>Boletus edulis</i>	72
Tabla N° 20. ANOVA PARA LA DIFUSIVIDAD.	74
Tabla N° 21. Parámetros de la ecuación de Page para deshidratado de la seta <i>Boletus edulis</i>	75
Tabla N° 22. Parámetros de la ecuación de Newton para deshidratado de la seta <i>Boletus edulis</i>	75
Tabla N° 23. Niveles de calentamiento alcanzados en la placa absorbente del colector solar	77
Tabla N° 24. Niveles de calentamiento alcanzados en la placa absorbente en la cámara	78

Tabla N° 25. Resultados del análisis proximal de la seta comestible <i>Boletus edulis</i> fresca	81
Tabla N° 26. Resultados del análisis proximal de pulpa e himenio para <i>Boletus edulis</i>	83
Tabla N° 27. Análisis proximal de la seta.	83
Tabla N° 28. Pérdida de humedad en las dos formas de secado.	85



INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. DATOS DE VELOCIDAD DE SECADO DE LA SETA COMESTIBLE <i>Boletus edulis</i> OBTENIDOS EN EL SECADOR DE LECHO FIJO.....	99
ANEXO 2. CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.	105
ANEXO 3. RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVA DEL AGUA.	111
ANEXO 4. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE PAGE Y NEWTON PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS	113
ANEXO 5. CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DISEÑO DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO	114
ANEXO 6. PANEL FOTOGRÁFICO.....	121
APÉNDICE	127



RESUMEN

En el presente trabajo se estudiaron diferentes condiciones de secado para la seta comestible *Boletus edulis* (temperaturas de 40, 50 y 60°C con velocidad de aire de 1 y 1.5 m/s), el experimento se realizó en el departamento de Puno ubicado a 3827 m.s.n.m. para lo cuál se utilizó un Secador de lecho fijo implementado con control adaptativo (Software Labview). Se hicieron mediciones de temperatura y peso a la entrada y salida del equipo, estos datos permitieron realizar curvas de secado, evaluar la velocidad de secado, humedad y difusividad de la seta. De acuerdo a los resultados se puede decir que a mayor temperatura y velocidad de aire, mayor es la velocidad del secado, siendo el mejor tratamiento a temperatura de 60°C y 1,5 m/s de velocidad de aire por obtener una menor humedad. Respecto a la difusividad efectiva, determinada de acuerdo con la segunda ley de Fick modificada para placa, los valores varían desde 0.956×10^{-7} hasta 2.612×10^{-7} m²/s en la seta entera, también se observó mejor difusividad para la pulpa respecto al himenio con 1.81867×10^{-6} y 1.01621×10^{-6} m²/s respectivamente. El modelo que mejor se ajusta a las curvas de velocidad de secado es el modelo de Newton obteniendo valores mínimos para su constante K de 0.0065 - 0.012 que el modelo de Page con 0.7730 - 1.4875. Para complementar el estudio también se construyó un secador solar indirecto que consta de una cámara de secado, un colector solar inclinado a 25° respecto a la horizontal y dos ventiladores, cuya cámara llega a una temperatura de 38 - 40°C en días de radiación solar alta. Al comparar resultados finales entre ambos equipos, se obtuvo menor porcentaje de humedad en el secador de lecho fijo con 0.0053 Kg de H₂O respecto al secador solar indirecto con 0.0144 Kg de H₂O, ambos secadores conservaron las propiedades nutricionales de la seta.

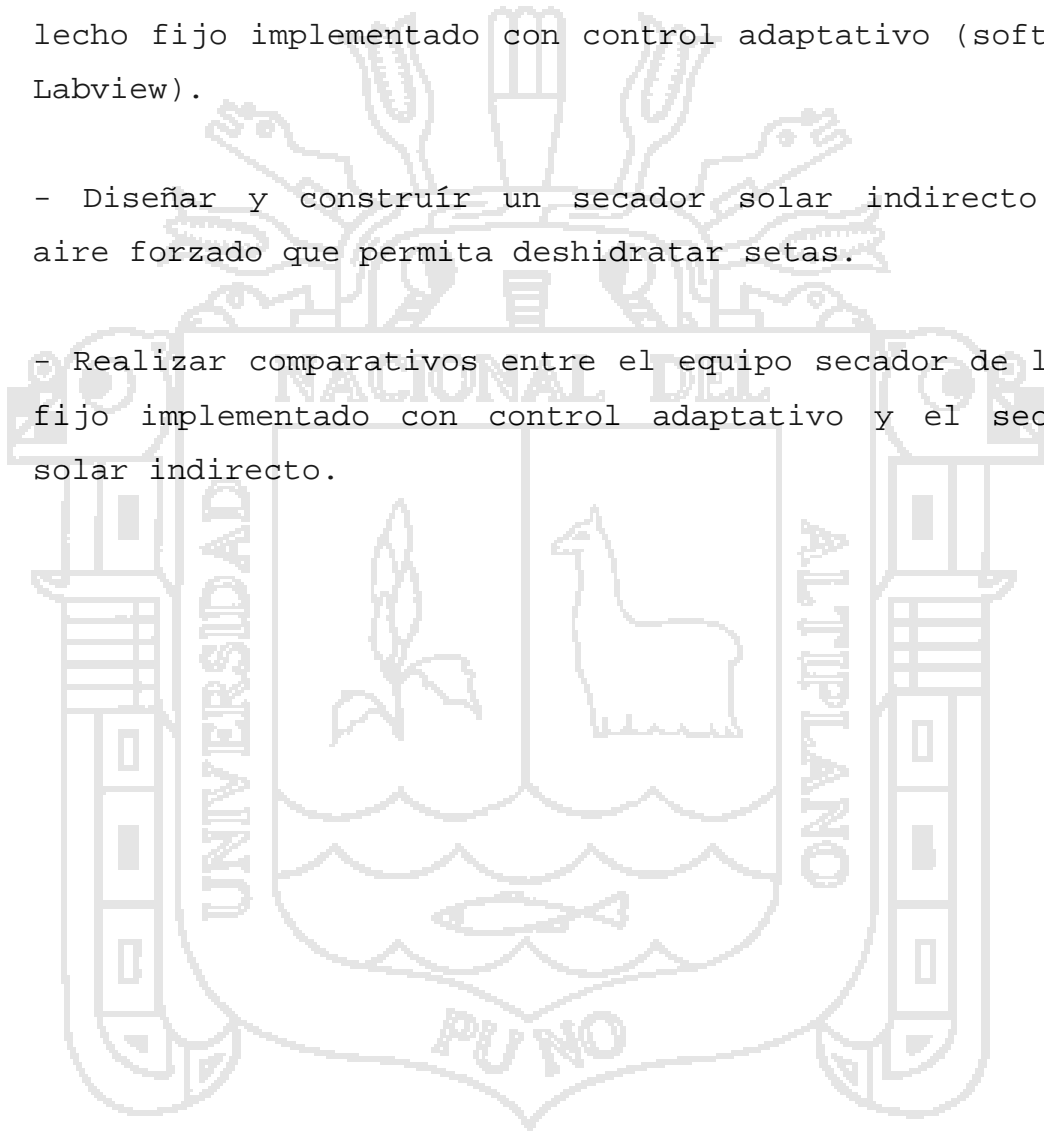
I. INTRODUCCIÓN

Boletus edulis es una seta comestible que crece en los bosques de coníferas, frondosas y pinares que se distribuyen por todo el mundo, en el departamento de Puno - Perú fructifica de forma silvestre en los bosques de pino durante los meses de Diciembre a Marzo (temporada de lluvia), es una seta de consumo poco difundido en la región, generalmente no se le explota lo que significa que la producción existente se echa a perder; a pesar de que posee todos los atributos que la distinguen como alimento de comprobada calidad y muy valorada en otros países en donde se le considera como alimento de élite. Debido a su composición de aproximadamente 90% de agua, la seta se descompone de tres a cuatro días, por lo que su tiempo de manejo es corto, siendo la deshidratación una excelente manera de alargar su vida útil y conservar sus propiedades nutricionales y organolépticas (SADLER, 2003). En la actualidad *Boletus edulis* se deshidrata en forma artesanal mediante luz directa del sol en campo abierto y sin control de parámetros, como temperatura y tiempo de deshidratado, dando como resultado un producto contaminado y de mala calidad.

En el presente trabajo se plantea el uso de diferentes métodos de secado, involucrando la deshidratación en lecho fijo con flujo de aire forzado y secado solar indirecto como alternativa para mejorar la calidad final de la seta debido a que la deshidratación es un tratamiento suave que no altera las propiedades nutricionales del producto.

Los objetivos del presente trabajo fueron:

- Determinar la curva de velocidad de secado, humedad de sólido y difusividad a temperaturas de 40, 50 y 60°C y velocidad de aire de 1 y 1.5 m/s, en la deshidratación de la seta comestible *Boletus edulis* y ajustar con los modelos empíricos de Page y Newton; en el secador de lecho fijo implementado con control adaptativo (software Labview).
- Diseñar y construir un secador solar indirecto con aire forzado que permita deshidratar setas.
- Realizar comparativos entre el equipo secador de lecho fijo implementado con control adaptativo y el secador solar indirecto.



II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

a. ASPECTOS GENERALES DE LA MATERIA PRIMA

2.1.1. HONGOS

Los hongos son organismos de tamaño muy variado, de reproducción preferentemente asexual (GONZÁLEZ, 2003). Los hongos son talofitas, por lo tanto carecen de clorofila; no tienen capacidad alguna como para cumplir funciones fotosintéticas pese a que su gama cromática es muy amplia pero nunca verde, característica que les hace imposible sintetizar los nutrimentos a partir de compuestos orgánicos como en las plantas superiores (CRESPO, 1994). Otra particularidad de los hongos es su consistencia tanto carnosa como esponjosa y la falta de raíz, tallos, hojas y flores. Su tallo, filamentosos y ramificado, conocido con el nombre de micelio, absorbe los principios orgánicos nutritivos que existen en el medio (SIERRA *et al*, 2002). Los hongos son organismos formados por hifas ramificadas, que corresponden a una o más células. Las membranas celulares están formadas por quitina y hemicelulosa (GRÜNERT *et al*, 1986).

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de los hongos.

Tabla N° 1. Clasificación de los hongos

CLASE	SUB CLASE	EJEMPLO
Ficomicetas	Ficomicetas	Moho blanco
Eumicetas	Ascomicetas	Trufas
	Basidiomicetas	Setas u Hongos de sombrero

Fuente: CRESPO (1994).

2.1.2. PRINCIPALES FORMAS DE VIDA DE LOS HONGOS

2.1.2.1. Hongos saprófitos

Son aquellos que crecen sobre la materia vegetal muerta y ayudan a su descomposición, son los mas abundantes en la naturaleza y que si en algunos casos provocan grandes trastornos en general son muy beneficiosos, ya que al desintegrar estos materiales muertos, los productos resultantes son fácilmente asimilados por los animales microscópicos y las plantas (AGREDA, 2006).

2.1.2.2. Hongos simbióticos

Viven asociados con animales y plantas, en este último caso forman una verdadera unidad o entidad viviente con mutuo aprovechamiento para los dos participantes que establecen contacto con plantas superiores, formadores de micorrizas con las plantas superiores y de líquenes en compañía de algas microscópicas; el hongo obtiene nutrientes de la planta y la planta obtiene agua y defensa contra patógenos gracias a la asociación simbiótica (AGREDA, 2006).

2.1.2.3. Hongos parásitos

Obtienen los nutrientes de plantas vivas, creciendo sobre sus hojas, ramas, troncos o incluso en los tejidos internos; a veces causan la muerte al vegetal parasitado (AGREDA, 2006).

2.1.3. SETAS U HONGOS DE SOMBRERO

La seta es la fructificación del hongo; lo que consumimos cuando es comestible (CRESPO, 1994); o por así decirlo son la parte visible, aparecen durante los

meses templados, tras periodos de lluvia, generalmente en primavera y otoño (MIRANDA et al, 2000).

2.1.3.1. CARACTERÍSTICAS DE UN HONGO COMESTIBLE

Para diferenciar entre setas comestibles y venenosas, se presenta una descripción de ambos grupos:

Tabla N° 2. Diferencias entre una seta comestible y venenosa.

COMESTIBLES	VENENOSAS
De color blanco a excepción del genero <i>Boletus</i> , generalmente no presentan anillo ni himenio laminar.	De color vivo, amarillo, rojo y azulado, al ser cortados cambian de color.
Se desecan en el medio ambiente sin entrar en descomposición.	Entran en putrefacción cuando se secan.
No escapa líquido alguno cuando se cortan.	Al ser cortado dejan escapar un líquido blanco, lechoso.
Generalmente se crían en campos laderas de montes y bosques.	Se desarrollan en lugares sombríos, húmedos y pantanos.

Fuente: CRESPO (1994).

2.1.4. MORFOLOGÍA DE LAS SETAS

Las partes constituyentes de una seta son: (BARAHONA, 2008)

2.1.4.1. Sombrero

Es una de las partes fundamentales del hongo. Su medida varía notablemente, desde tener unos pocos milímetros en algunas especies, pudiendo llegar a los 30cm en otras. Su forma también es muy variada y cuando es joven acostumbra a estar plegado alrededor del pie. En algunas especies puede cambiar varias veces de forma a medida que aumenta su edad.

2.1.4.2. Cutícula

La piel que cubre el sombrero se llama cutícula y puede presentar diversos aspectos como arrugas, grietas de aspecto aterciopelado o cubierta por escamas y que en realidad se trata del resto del velo general que lo cubría en estado joven.

2.1.4.3. El Himenóforo

Es la parte reproductora del hongo. Se trata de un tejido muy fino y que en realidad es un conjunto de elementos fértiles reproductores de esporas. El himenio puede presentar estructura laminar, arrugas, venosidades con tubos como el género *Boletus*, etc.

2.1.4.4. Pie

El pie es la parte del hongo que sostiene el sombrero, y que generalmente tiene forma cilíndrica. En él se encuentra una serie de detalles importantes para la identificación de la especie, como la forma, la facilidad de separación, la ornamentación, su colocación respecto al sombrero, su interior (macizo o hueco) y su consistencia.

2.1.4.5. Anillo

El anillo que presentan algunos ejemplares de hongos, es en realidad el resto del velo parcial encargado de proteger el himenio del hongo joven, que al no haberse desprendido del todo, queda enganchado alrededor del pie.

2.1.4.6. Volva

Cuando el velo general que cubre la mayoría de las especies se rompe para dejar pasar el sombrero, pueden pasar dos cosas: que desaparezca o que queden restos al

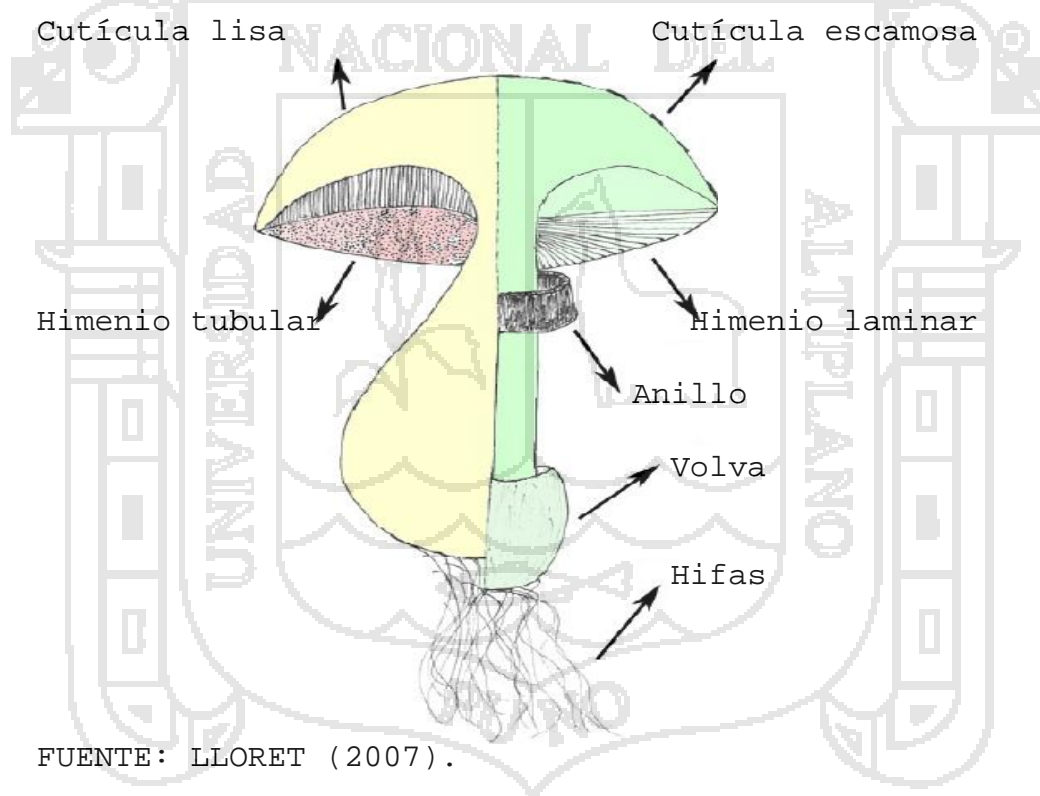
pie. Estos restos en forma de saco o funda que envuelven la base del pie se llama volva.

2.1.4.7. Micelio

Su misión consiste en tomar del suelo los diversos compuestos orgánicos para alimentarse. En ocasiones pueden parecer falsas raíces. Generalmente es de color blanco.

En la siguiente figura se señalan las partes de la seta:

Figura N° 1. Morfología de una seta.



FUENTE: LLORET (2007).

2.1.5. VALOR NUTRITIVO

Las setas ofrecen un valor nutritivo apreciable. Aportan a la dieta nutrientes inorgánicos (Fe, Cu, Zn, y K) que no existen en otros alimentos, proteínas, fibra

dietética así como la capacidad antioxidante (BLANCO, 2005).

2.1.6. CONSUMO DE SETAS COMESTIBLES

La siguiente tabla muestra el consumo de setas por habitante en algunos países durante el año 2002.

Tabla N° 3. Consumo promedio de setas comestibles

PAÍS	CONSUMO ANUAL DE SETAS POR HABITANTE
Alemania	4.0 kg
Japón	3.6 kg
Canadá	3.5 kg
Bélgica	3.2 kg
España	3.0 kg
Italia	3.0 kg
Estados Unidos	2.8 kg
Argentina	0.1 kg

FUENTE: Rodríguez (2007).

2.1.7. SETA COMESTIBLE *Boletus edulis*.

Boletus edulis es una seta comestible, también conocida como seta calabaza, boleto comestible, sureny en catalán, "omtozuri", "ondo" en vascuence. Edulis significa comestible, por lo que es un excelente comestible apreciado en muchos países (GRÜNERT *et al*, 1986).

Es una seta de sombrero hemisférico, que en su madurez, irá extendiéndose y aplanando. Normalmente tiene entre 8 y 20 cm. de diámetro pudiendo alcanzar 30cm. Bajo el sombrero presenta una capa de tubos largos y libres, blancos en los ejemplares jóvenes, luego amarillentos para pasar al final a amarillo verdoso. Su superficie es lisa y ligeramente viscosa en tiempo húmedo, seca y

brillante en tiempo seco, de color marrón claro, a veces decolorado hasta casi blanco y de poros con la misma coloración. Presenta un pie grueso con retículo, de hasta 20 cm de altura, de color parduzco, sin anillo y de forma cilíndrica, gruesa en la base y superficie blanquecina con tonalidades mas claras que las del sombrero y con un fino retículo blanco en la parte superior. Tienen poros blancos cuando son jóvenes y carne blanca de gran calidad (GONZALES, 2003).

Crece en bosques de coníferas de especies diversas (pinos, robles, álamos, castaños, etc.), sobre suelo ácido o silícico durante primavera y otoño; normalmente no crecen arracimados, aunque a veces lo hagan en grupos de dos o tres ejemplares. Fructifica desde finales de verano a otoño (GONZALES, 2003).

La reproducción de *Boletus edulis* se realiza mediante esporas: partículas diminutas formadas por un protoplasma (célula) y pared celular (LLORET, 2007).

Su clasificación taxonómica es (GRÜNERT et al, 1984):

Reino: Fungi

Filo: Basidiomycota

Clase: Homobasidiomycetes

Orden: Boletales

Familia: Boletaceae

Género: Boletus

Especie: *Boletus edulis*

2.1.7.1 Valor nutricional de la seta *Boletus edulis*.

En la tabla N° 4 se puede apreciar el valor nutricional de la Seta comestible *Boletus edulis*:

Tabla N° 4. Composición nutricional de la seta comestible *Boletus edulis*.

Alimento (100g) (peso fresco)	Proteína (g)	Grasa (g)	Agua (g)	Ceniza (g)	Fibra bruta (g)
<i>Boletus edulis</i>	5.40	0.40	87.1	1.0	1.00

Fuente: Crespo (1994).

2.1.7.1. Potencialidades de la seta comestible *Boletus edulis*

La seta comestible *Boletus edulis*, se puede consumir tanto guisado como crudo, incluso desecado, ya que no pierde sus cualidades, se trata de uno de los "Boletos" de mayor calidad gastronómica, usado comúnmente en infinidad de sopas. Se prepara de múltiples maneras: cortados en finas tiras, rallados, etc (GONZALES, 2003).

2.1.8. MÉTODOS DE CONSERVACIÓN

Existen varios métodos de conservación de setas, de estos métodos se mencionan los principales (GUEVARA, 1997):

2.1.8.1. Conservación en natural

Consiste en escaldar la pulpa de la seta por un periodo de 5 minutos a 85 °C, luego envasarla en caliente en envases herméticos.

2.1.8.2. Conservación en ácido acético (vinagre)

Conocida como encurtido, consiste en colocar las setas escaldadas en una solución básica de agua, vinagre y sal. Acompañada de un sellado hermético; a estas se le pueden agregar especias para mejorar sus características organolépticas; pero se pierde el color.

2.1.8.3. Congelación

Consiste en colocar las setas a temperaturas de 0 a -20 °C en envases de polietileno o vidrio en cantidades pequeñas; sin embargo tan pronto de se saca a temperatura ambiente se desintegra y transforma en una masa pulposa.

2.1.8.4. Deshidratado

Permite conservar todas las propiedades nutricionales intactas; a diferencia de las conservas que calientan mucho el alimento destruyendo sus propiedades o de la congelación que también somete al alimento a temperaturas extremas y cambia sus propiedades; el deshidratado es suave y gentil con el alimento.

2.2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN Y SECADO

El Departamento de Agricultura de Estados Unidos define como producto deshidratado al que no contiene mas de 2.5% de agua(base seca), mientras que el alimento seco es todo aquel producto alimenticio que contiene mas del 2.5% de agua (base seca)(BARBOSA Y VEGA, 2000).

2.2.1. DESHIDRATACIÓN

La deshidratación de alimentos consiste en la eliminación casi completa del agua que estos contienen, bajo condiciones de control que producirán solo un mínimo de cambios o ningún tipo de cambio en las propiedades del alimento. La humedad final de estos alimentos deshidratados es del 1 al 2.5% según el producto (POTTER, 1973). El proceso de deshidratación puede ser aplicado a todo tipo de alimentos, desde vegetales y hortalizas hasta carnes y pescados, pasando por frutas, especias, hierbas aromáticas, etc. (GEANKOPLIS, 1998). La finalidad del deshidratado y/o secado es reducir el contenido de humedad hasta un nivel razonablemente bajo, inmediatamente después de su recolección, para prevenir el desarrollo de hongos y también paralizar la acción bacteriana (HAWLADER *et al*, 1991).

La deshidratación puede afectar a la estructura de los tejidos celulares, modificando las propiedades físico-químicas del producto, siendo la temperatura de secado un factor determinante (SIMAL *et al.*, 2000). Estas modificaciones afectan principalmente a la textura, a la capacidad de rehidratación y al aspecto. La reducción de la capacidad de rehidratarse se origina como consecuencia de la contracción y distorsión celular y también por el efecto de la concentración de sales, que pueden desnaturalizar parcialmente las proteínas, que después no podrán reabsorberse plenamente y ligar el agua (GUERRERO Y NUÑEZ, 1991). Respecto a costos la deshidratación facilita y reduce el costo de transporte permitiendo obtener productos destinados a la fabricación de comidas preparadas, polvos solubles, alimentos dietéticos, etc.

2.2.2. PROCESOS QUE OCURREN DURANTE EL DESHIDRATADO

La deshidratación de un alimento consta de dos procesos simultáneos (SAN JUÁN, 1998):

- Transferencia de calor hacia el producto.
- Transferencia de materia desde el producto.

Los factores que regulan las velocidades de estos dos procesos de transferencia determinan la rapidez del secado. La velocidad y el tiempo total de secado están influidos por cuatro factores principales: las propiedades del producto, especialmente tamaño y geometría de la partícula, su ordenación geométrica en relación con el medio de transferencia, las propiedades físicas del medio de secado y las características del equipo de secado.

2.2.3. CAMBIOS OCURRIDOS DURANTE LA DESHIDRATACIÓN

2.2.3.1. Encogimiento

El encogimiento origina que el volumen del producto disminuya debido a que el agua es evaporada, produciendo que la estructura superficial durante el secado se deforme fácilmente provocando huecos, mientras que la parte interna tiene pocas rupturas, donde la difusividad es reducida debido a que el agua restante está ligada por puentes de hidrogeno. Por lo tanto se espera que la micro estructura de los poros y la porosidad en sí, jueguen un papel importante en el mecanismo de rehidratación (capilaridad, absorción, difusión) (SAGUY Y KAREL, 2004).

2.2.3.2. Oscurecimiento o pardeamiento de la seta durante el deshidratado

Durante el procesado y almacenamiento de los alimentos se producen cambios que afectan a su aspecto, olor, sabor, etc. La mayor parte de estos cambios conllevan un efecto de pardeamiento, producido por el desarrollo de unos pigmentos, consecuencia de reacciones enzimáticas y no enzimáticas. Esto se refleja en un amplio rango de colores, incluso en un mismo producto. Estos cambios están íntimamente ligados a la degradación de vitaminas y otros nutrientes (MISHKIN *et al*, 1984).

La velocidad con la que se producen los procesos de pardeamiento enzimático aumenta de forma constante a medida que lo hace la actividad de agua en un rango de a_w entre 0.30 y 0.85. (AGUILERA *et al*, 1987). En el caso de los productos con baja actividad de agua, como son los frutos deshidratados, la velocidad de pardeamiento no enzimático suele ser mucho mayor que la del enzimático (CAÑELLAS *et al*, 1993).

El tamaño de la muestra es importante en la calidad final del producto. Las rebanadas pequeñas tienden a oscurecerse fácilmente y adherirse a las bandejas del secador. Cuando el pardeamiento ha tenido lugar, es difícil identificar si el mecanismo ha sido enzimático o no enzimático.

2.2.3.3. Pardeamiento enzimático

El oscurecimiento enzimático es debido principalmente a la oxidación de compuestos fenólicos catalizada por la enzima llamados polifenoloxidasas (AMIOT *et al*, 1996).

Una gran cantidad de compuestos fenólicos son oxidados por la polifenoloxidasas; los más importantes son las catequinas, ésteres del ácido cinámico, 3,4-hidroxifenilalanina y tirosina.

El compuesto fenólico con un solo hidroxilo se oxida en presencia de O₂ y las polifenoloxidasas para dar un compuesto dihidroxilado, este oxida nuevamente para dar un derivado de quinona, Las quinonas condensan y reaccionan monoenzimáticamente con otros compuestos fenólicos, aminoácidos, etc, para formar complejos altamente coloreados, de estructura indeterminada llamados melanoidinas (SAPERS, 1993).

Factores ambientales como: intensidad de luz, cortes, herbicidas, senescencia, patógenos, metales pesados, lesiones, sustancias abrasivas pueden desencadenar el estrés oxidativo y nitrosativo (PRUTHI *et al*, 1998).

Diversos métodos se vienen empleando para prevenir el pardeamiento enzimático, tales como tratamientos térmicos, técnicas de sulfitado, adición de acidificantes y eliminación de oxígeno en la atmósfera de envasado (HAARD, 1998).

En relación a los tratamientos térmicos, hay tres aspectos de la inactivación enzimática que son relevantes en el procesado térmico de los alimentos; el primero corresponde a aspectos estructurales de la

enzima; el segundo está relacionado con la modelación matemática de la inactivación de la enzima por la temperatura; finalmente se encuentra la influencia que la enzima pueda tener en la calidad del alimento (ADAMS, 1991).

2.2.3.4. Pardeamiento no enzimático

Los productos coloreados asociados al pardeamiento no enzimático se producen por reacciones múltiples, que pueden clasificarse en los siguientes grupos (WEDZICHA, 1987):

a) Reacciones de Maillard de condensación amino-carbonilo, que incluyen las reacciones de aldehídos, cetonas y azúcares reductores con aminas, aminoácidos, péptidos y proteínas.

b) Reacciones de caramelización, que aparecen cuando compuestos carbohidratos se calientan en ausencia de compuestos amino. Tienen una gran similitud con las de Maillard, siendo la principal diferencia la necesidad de condiciones de reacción mucho más vigorosas en ausencia de aminas y la formación de productos coloreados sin nitrógeno.

2.2.4. TÉCNICAS DE DESHIDRATACIÓN

La deshidratación puede llevarse a cabo por medios mecánicos o por medios fisicoquímicos. Entre los primeros cabe destacar el prensado y la centrifugación y entre los segundos la evaporación superficial, liofilización, absorción, adsorción y ósmosis (GARCÍA *et al*, 1994).

La selección de un método de secado particular está en función de la materia prima y sus propiedades, forma física deseada y características del producto, condiciones y costes de producción requeridos, etc. El método más empleado para la deshidratación de productos hortofrutícolas es la evaporación superficial por convección forzada de aire caliente en túneles o cabinas de secado. Uno de los métodos de secado más antiguos es el secado solar. Sin embargo, el secado de frutas y hortalizas por exposición directa a la radiación solar presenta algunos inconvenientes, fundamentalmente derivados de las inclemencias atmosféricas y de las contaminaciones por polvo e insectos. Como alternativa a este método se ha recurrido al uso de secaderos en los que la radiación solar constituye la fuente energética principal (BERNA *et al*, 1988).

En este tipo de instalaciones es difícil controlar el suministro energético y ajustarlo a las exigencias del proceso, por lo que se han diseñado equipos mixtos, provistos de colectores que elevan la temperatura del aire de secado, o bien de equipos híbridos, dotados de una fuente auxiliar de energía convencional (CARBONELL *et al*, 1981). En su funcionamiento, estos secaderos pueden operar almacenando o no, de forma apropiada, parte de la energía solar captada durante las horas de insolación. La utilización de secaderos polivalentes basados en el empleo directo o indirecto de la energía solar constituye una opción interesante en regiones que disponen de abundante radiación solar. Intermedio entre el secado por exposición a la radiación solar y la deshidratación convencional con aire caliente se encuentra el secado con aire ambiente en circulación forzada (MADARRO *et al*, 1981).

2.2.5. SECADO

Separación de líquidos volátiles, casi siempre agua de los materiales sólidos (GEANKOPLIS, 1998). EL secado es un proceso en el que el agua se elimina para detener o aminorar el crecimiento de microorganismos perjudiciales así como ciertas reacciones químicas (BARBOSA Y VEGA, 2000).

En los procesos de secado los datos suelen expresarse como la variación que experimenta el peso del producto que se está secando con el tiempo. Aunque a veces, los datos pueden expresarse en términos de velocidad de secado. El contenido de humedad del producto se define como la relación de cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólidos secos y se expresa como (GEANKOPLIS, 1999):

$$X_t = \left(\frac{w_t - F_s}{F_s} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde: w_t es el peso total del material en un tiempo determinado, siendo F_s el peso de los sólidos secos, X_t es la humedad expresada como peso de agua / peso de sólido seco.

2.2.5.1. Parámetros que rigen el proceso de secado

a) Humedad inicial

El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se

sobreentiende que está expresado en base húmeda, es decir, como $(\text{kg agua}/\text{kg sólido húmedo}) 100 = [\text{kg humedad}/(\text{kg sólido seco} + \text{kg humedad})]$; $100 = X/(100 + X)$ (PERRY Y CHILTON, 1981).

b) Humedad de equilibrio

Después de haber expuesto el sólido un tiempo suficiente para alcanzar el equilibrio, llega un momento en que dicho sólido tiene un contenido de humedad definido. Este valor se conoce como contenido de humedad de equilibrio del material en las condiciones especificadas de humedad y temperatura del aire (GEANKOPLIS, 1998).

c) Humedad libre

La humedad libre es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas (PERRY Y CHILTON, 1981).

d) Humedad Crítica

Es el punto en el que termina la intensidad constante y reduce la intensidad de desecación (PERRY Y CHILTON, 1981).

e) Temperatura de bulbo seco

Es aquella temperatura que se mide con un termómetro común (IBARZ *et al*, 2005).

f) Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura que resulta de la evaporación del agua en una gasa húmeda colocada sobre el bulbo de un termómetro común. La temperatura de bulbo húmedo siempre será inferior a la temperatura de bulbo seco. La evaporación hace disminuir la temperatura del agua,

mientras que el aire se acerca más a las condiciones de saturación (IBARZ *et al*, 2005).

g) Temperatura máxima

Es la que soporta el producto sin cambiar sus propiedades, está en función a la madurez, humedad y tipo de producto (PERRY Y CHILTON, 1981).

El estudio de la cinética de secado es esencial para diseñar un correcto proceso de secado que permita además obtener un producto de calidad (OLIVAS *et al*, 1999). Por otro lado una de las maneras más utilizadas de obtener informaciones sobre la velocidad de secado es mediante experimentos en capa delgada. El aire fluyendo a través de una capa fina de material, puede ser considerado con propiedades constantes de velocidad, temperatura y humedad (BARROZO, 1998).

2.2.6. CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO

Para reducir el contenido de humedad en el secado de diversos materiales de proceso, por lo general se estima el tamaño del secador necesario, las diferentes condiciones de operación de humedad y la temperatura del aire empleado, y el tiempo necesario para lograr el grado de secado. No es posible predecir el contenido de humedad de equilibrio de diversos materiales, por lo que es necesario determinarlo por vías experimentales. De la misma manera, puesto que el conocimiento de los mecanismos básicos de las velocidades de secado es bastante incompleto, en muchos casos es indispensable obtener algunas mediciones experimentales de las velocidades de secado (GEANKOPLIS, 1998).

2.2.6.1. Conversión de los datos a curva de velocidad de secado

Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total W del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos (horas) en el periodo de secado. Estos valores se pueden convertir a datos de velocidad de secado por los siguientes procedimientos:

Después de haber establecido las condiciones de secado constante, en la ec. N° 1, se determina el contenido de humedad de total de equilibrio, X^* (kg. Humedad de equilibrio/kg de sólido seco). Con el se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X (kg de agua libre/kg de sólido seco), para cada valor de X_t .

$$X = X_t - X^* \quad \text{Ec. N° 2.}$$

Usando los datos calculados en la ecuación anterior, se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo t , como se muestra en la figura N° 2, para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica. Se calcula entonces la velocidad W para cada punto con la expresión:

$$W = -\frac{L_s}{A} \left(\frac{dX}{dt} \right) \quad \text{Ec. N° 3.}$$

Dónde:

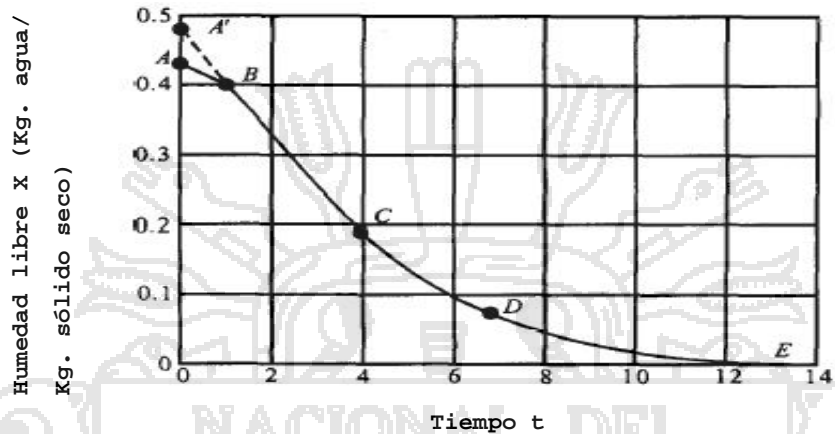
W : Velocidad de secado en kg $H_2O/h.m^2$.

L_s : Peso de sólido seco en kg.

A : Área superficial expuesta al secado en m^2 .

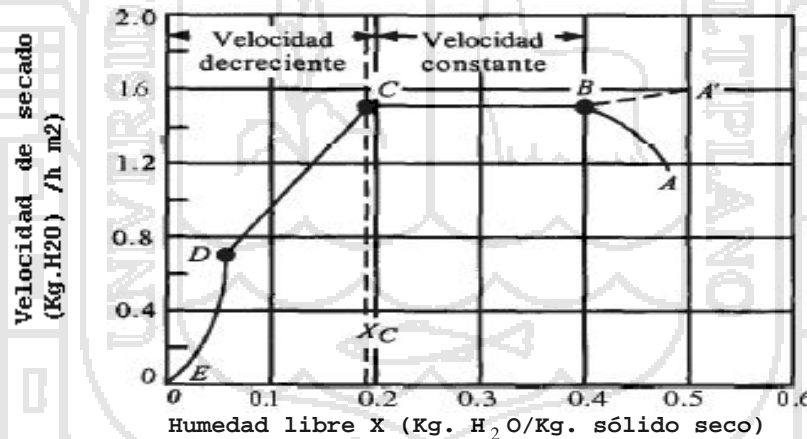
Por consiguiente la curva de velocidad de secado se obtiene graficando W en función del contenido de humedad X , tal como se aprecia en la figura N° 3.

Figura N° 2. Curva de cinética de secado.



FUENTE: Geankoplis (1998).

Figura N° 3. Curva de velocidad de secado.



FUENTE: Geankoplis (1998).

2.2.7. ETAPAS DE LA VELOCIDAD DE SECADO

La eliminación del agua ocurre generalmente en una serie de etapas diferenciadas por la velocidad de secado, después de un corto período de estabilización inicial donde el sólido está a baja temperatura y la velocidad

de evaporación aumenta a medida que sube la temperatura, se registra una etapa de velocidad de deshidratado constante, donde la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio (temperatura de bulbo húmedo del aire), lo que provoca una reducción importante del contenido de agua a temperatura y velocidad de secado constante, mientras la superficie del sólido se mantiene saturada de agua que migra desde el interior a la misma velocidad que ocurre la evaporación en la superficie (SINGH Y HELDMAN, 1998).

En la figura N° 3 se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va 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 principio de la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado.

La curva es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este periodo de velocidad constante de secado corresponde a la línea BC.

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

periodo de velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea CD 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 no existe, o bien, constituye la totalidad del periodo de velocidad decreciente (GEANKOPLIS, 1998).

2.2.7.1. Factores que afectan a la velocidad de secado

Los factores que afectan la velocidad de secado son (GUERRERO Y NUÑEZ, 1991):

a) Superficie del producto

La subdivisión acelera el secado, porque una mayor área proporciona más superficie en contacto con el medio de calentamiento.

b) Temperatura

Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y el alimento, mayor será la velocidad de transmisión de calor.

c) Velocidad del aire

El aire en movimiento absorbe el vapor de agua de la superficie del alimento, previniendo así la creación de atmósfera saturada. La velocidad del aire actúa aumentando los coeficientes globales de transferencia de materia y de calor, al disminuir el espesor de la capa límite, lo que disminuye el tiempo de deshidratado de los alimentos.

d) Humedad del aire

El aire seco tiene el poder de absorber y retener la humedad. Para muchos productos la velocidad de secado al principio es constante y posteriormente decrece, a veces a velocidades distintas. Respecto al agua perdida, el mayor porcentaje se elimina en un tiempo relativamente corto pero cuesta mucho más eliminar la humedad restante. La velocidad de aire afecta poco a la velocidad de deshidratado y la cantidad de agua contenida en el alimento fuertemente (WANG Y BRENNAN, 1992). Cuando más seco esté, mayor será la velocidad del proceso de secado.

2.2.8. DIFUSIÓN

La difusión se da en sólidos de estructura fina y en los capilares poros y pequeños huecos llenos con vapor, el vapor se difunde hacia afuera hasta que alcanza a la corriente global de aire (BARBOSA Y VEGA, 2000).

La difusión molecular (o transporte molecular) puede definirse como la transferencia (o desplazamiento) de moléculas individuales a través de un fluido por medio de los desplazamientos individuales y desordenados de las moléculas. Se puede imaginar a las moléculas desplazándose en línea recta y cambiando su dirección al rebotar otras moléculas cuando chocan. Puesto que las moléculas se desplazan en trayectorias al azar, la difusión molecular a veces se llama también proceso con trayectoria aleatoria.

El transporte en sólidos se puede clasificar en dos tipos de difusión: la difusión que sigue la ley de Fick y que no depende primordialmente de la estructura del

sólido; y la difusión en sólidos porosos, en la que la estructura real y los canales vacíos revisten gran importancia.

2.2.8.1. LEY DE FICK

A partir de la segunda Ley de Fick, es posible obtener modelos semi-empíricos para determinar el coeficiente de difusión efectivo D_{ef} en geometría de placa plana infinita y con diversas condiciones de contorno y de operación (CRANK, 1975).

$$\frac{dX}{dt} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad \text{Ec. N° 4.}$$

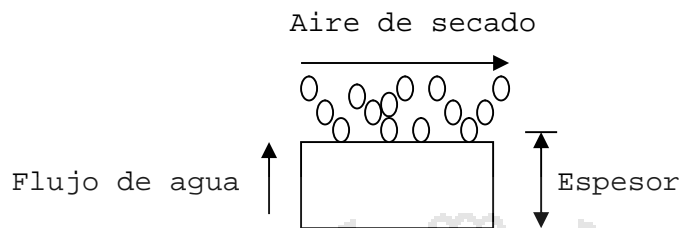
Una de las dificultades para analizar datos de difusión en el secado, es que la condición inicial para el periodo con control difusional corresponde a una distribución no uniforme de humedad en el sólido, especialmente cuando el periodo de velocidad constante precede al periodo de velocidad decreciente.

Durante el secado convectivo, con velocidad del aire suficientemente elevada, la resistencia externa es generalmente muy pequeña y la velocidad de secado es controlada por la difusión en el sólido. En estas condiciones, durante el periodo de velocidad decreciente, la humedad en la superficie está en equilibrio con el medio de secado y no hay agua libre.

2.2.8.2. Coeficiente de difusión

El coeficiente de difusión aumenta con la temperatura de secado. La forma de contacto de las muestras con el aire influye en los coeficientes. La difusión se define como el transporte neto debido al movimiento aleatorio.

Figura N° 4. Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua (BRUIN Y LUIBEN, 1980).



La solución de la ley de Fick modificada para placa es como sigue:

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_a^2} e^{\left(\frac{-h_a^2 f^2 D_{ef}}{4L^2}\right)} \quad \text{Ec. N° 5.}$$

Donde:

- Γ : Coeficiente de solución de la ley de Fick para distintas geometrías.
- X : contenido de humedad al tiempo t .
- X_0 : contenido de humedad inicial.
- X_s : contenido de humedad en la superficie.
- L : es el espesor de la lámina.

2.2.9. Modelos matemáticos para el ajuste de los datos

La cinética de secado muestra la variación de la humedad del material con el tiempo. Y las curvas de cinética de secado dan idea del tiempo necesario de secado, del consumo de energía, del mecanismo de transferencia de agua, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa, y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables de proceso tales como: temperatura, humedad de entrada velocidad del aire (DOYMAZ, 2004).

Un buen modelo matemático del proceso de secado puede considerarse como una herramienta muy eficiente para salvar obstáculos, tales como, daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste del equipo o la disminución del rendimiento (OLIVAS *et al*, 1999). Por este motivo, debido a su simplicidad, el modelo Page ha sido utilizado para describir el secado en capa delgada, resultando útil para estimar o predecir el tiempo de secado y como ecuación cinética diferencial para el modelado y simulación de secadores (BARROZO, 1998)

Los modelos matemáticos mas utilizados en investigaciones para describir el comportamiento cinético del deshidratado, derivan de una relación directa entre el contenido de humedad promedio y el tiempo de deshidratado, además de estar fuertemente relacionados con el modelo disfuncional de la segunda ley de Fick, y son los siguientes:

a) Modelo exponencial o modelo de Newton

$$\frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} = \exp(-K^1 t) \quad \text{Ec. N}^\circ 6.$$

b) Modelo de Page

$$\frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} = \left[(\exp(-K^2 t))^n \right] \quad \text{Ec. N}^\circ 7.$$

X_{wt} : Humedad al tiempo t (Kg. agua / Kg. m.s.)

X_{w0} : Humedad inicial (Kg. agua / Kg. m.s.)

X_{we} : Humedad en equilibrio (Kg. agua / Kg. m.s.)

K : Parámetro del modelo.

t : Tiempo.

2.3. SISTEMAS DE SECADO

En todos los casos el sistema de secado consiste en entregar una cierta cantidad de energía al producto para eliminar el agua que contiene, estas condiciones dependen de los contenidos de humedad inicial y final del producto (ANCCO, 1998).

Dentro de los sistemas de secado se puede mencionar los siguientes:

2.3.1. SECADO SOLAR TRADICIONAL

Es más utilizado en el mundo hasta ahora y de vieja tradición en el Perú. La energía requerida se obtiene de la radiación solar que incide sobre el producto. Habitualmente el secado suele ser: en la propia planta, a lado de la planta, en superficies planas de concreto o similar, en cajones o bandejas (ANCCO, 1998). El secado es difícil de programar y se corren riesgos de perder el producto por acción de las lluvias, vientos, insectos y roedores o disminuir la calidad del producto final.

2.3.2. SECADO SOLAR TÉCNICO

Este sistema, que busca compensar las desventajas del secado tradicional, generalmente consiste en el pasaje de aire pre calentado sobre y/o a través del producto por flujo natural o forzado. Para este calentamiento se puede usar energía de colectores solares (ANCCO, 1998).

Dentro de los sistemas de secadores solares técnicos se tiene (ANCCO, 1998):

2.3.2.1. Secado solar directo

En este sistema el material a secar es colocado en una cámara tipo invernadero expuesto al sol con la protección de una cobertura transparente de vidrio o plástico, el calor es generado por la adsorción de la radiación que incide sobre el producto y sobre algunas paredes de la cámara. El calor evapora el contenido de humedad del producto y favorece la termo circulación del aire.

2.3.2.1. Secado solar indirecto

El aire es precalentado en un colector solar de aire luego conducido a la cámara de secado que puede ser similar a los secadores convencionales. Este tipo de secado es adecuado para productos que no deben ser expuestos a la radiación solar.

2.3.2.3. Secado solar mixto

Combina la acción del pre-calentamiento del aire en colectores con adsorción directa de la radiación solar en la cámara del secado.

2.4. SECADORES POR ENERGÍA SOLAR (SECADORES SOLARES)

Los modernos secadores solares se han desarrollado en base a los conceptos utilizados con secaderos convencionales. Se debe añadir la radiación solar como fuente energía que mejora la operación. Los secadores solares se clasifican en dos grandes grupos (ANCCO, 1998):

1.- Por convección natural, en los que no se requiere ningún tipo de energía mecánica o eléctrica

2.- De convección forzada, que requiere la acción de ventiladores o soplantes para bombear el aire.

Las limitaciones más importantes del secado solar son:

- Falta de control sobre el proceso de secado, que puede dar lugar a un excesivo secado del alimento, pérdida de granos en germinación y cambios nutricionales.
- Falta de uniformidad del secado
- Contaminación por hongos, bacterias, etc.

Los secadores más comunes que se encuentran en la industria alimentaria son los del tipo directo y ambiente de convección natural, así como el tipo directo de convección forzada.

2.4.1. SECADOR SOLAR INDIRECTO DE CONVECCIÓN FORZADA

Este tipo de secador utiliza algún tipo de ventilador o soplante para la circulación de aire, se puede secar rápidamente una gran cantidad de productos agrícolas (BARBOSA Y VEGA, 2000).

El secado solar de los alimentos puede ser llevado a cabo en casi todas las locaciones, pero el tiempo que demanda, dependerá de la cantidad de radiación solar y la humedad relativa del lugar.

2.4.1.1. Partes del secador solar indirecto de convección forzada

2.4.1.1.1. Cámara de secado

Consiste de una caja, que puede ser de cartón, madera ó lámina galvanizada, por dentro tiene bandejas colocadas una entre otra, para colocar el producto en rodajas. Las bandejas para secar pueden ser construidas con madera, aluminio, ó algún otro material para el marco, se utiliza tela de mosquitero para colocar el producto pues no desprende olores ni reacciona con los ácidos de los productos.

2.4.1.1.2. Colector solar

Es una caja térmica donde el aire se calienta por la captación de la radiación solar. Esta constituido por dos placas metálicas entre las cuales fluye el aire, tiene una cubierta de vidrio, que deja pasar la radiación solar, pero no la dejar salir. La pintura negro mate de la placa superior permite absorber toda la radiación y no emitirla, transfiriendo todo el calor por la otra cara hacia el aire de secado, el cual se dirige a la cámara de secado (ESPINOZA, 1981). El colector solar, puede ser de cartón, madera ó lámina galvanizada, por dentro se le colocan: aislante, botes de aluminio y para evitar que el calor escape se utiliza vidrio, ó plástico transparente. Se elimina entre el 85 y 95% del agua que contiene, esto depende de la cantidad de agua que tengan los productos (ANCCO, 1998).

a) Componentes básicos del colector solar

Los colectores solares para calentamiento de aire están contruidos con cubierta transparente, aislamiento, superficie absorbente y recubrimiento.

b) Orientación del colector solar

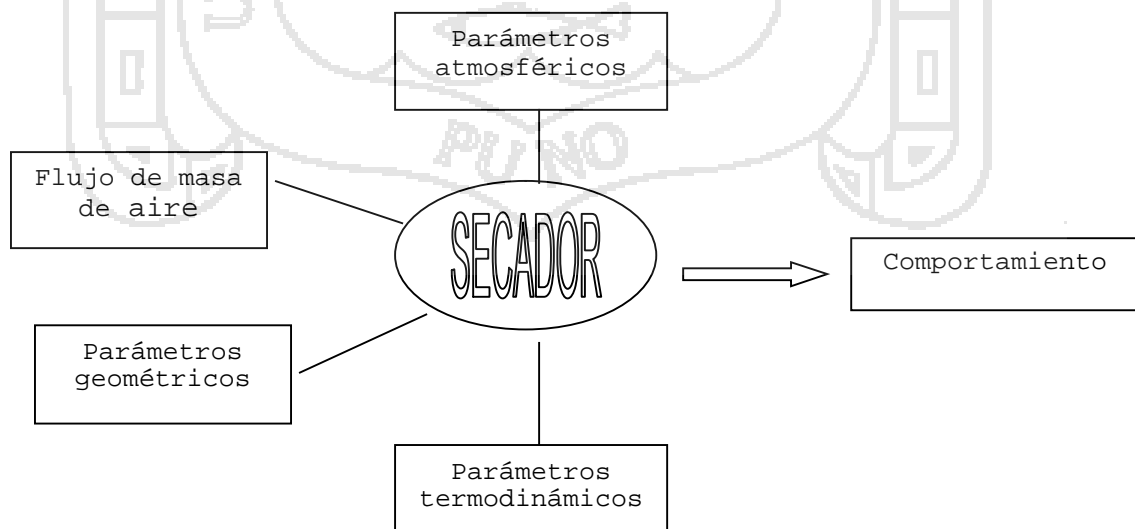
En un colector ideal los rayos del sol deberían caer en ángulo recto sobre la superficie (FUENTES, 1986).

En los países del hemisferio norte el colector será colocado orientado hacia el sur y en los países del hemisferio sur hacia el norte. El ángulo de la superficie del colector con respecto a la horizontal debe ser igual a la suma de la latitud del lugar más 10 o 15° para lograr la máxima eficiencia (ADEM Y MEYNEL, 1982).

2.4.2. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE SECADORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AIRE

Para diseñar un sistema de aprovechamiento de energía solar debe tenerse en cuenta la existencia de todas las condiciones circundantes como las esquematizadas en la figura las mismas que a influir en el funcionamiento, prestando atención al tipo de recurso energético a emplear en este caso la energía solar (ANCCO, 1998).

Figura N° 5. Parámetros para diseño y construcción de secadores solares.



Fuente: Ancco (1998).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se ejecutó en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA - PUNO.

- Laboratorio de Ingeniería (simulación y automatización)
- Laboratorio de Manejo Post Cosecha
- Laboratorio de Análisis Nutricional

3.1. MATERIALES

3.1.1. MATERIA PRIMA

Para realizar el presente estudio se utilizó setas recolectadas de los bosques de Pino de la provincia de Yunguyo. En este lugar solo se escogió setas de la variedad *Boletus edulis*, que se identificó por tener las siguientes características: el sombrero de color amarillo recubierto por una piel marrón, rodeado a su vez de un mucílago, con poros en la superficie, diámetro entre 10 - 20 cm, tallo de color amarillento de una altura comprendida entre 8 - 10 cm. Se seleccionó las setas de acuerdo a criterios sensoriales de madurez fisiológica.

3.1.2. MATERIAL DE LABORATORIO

Tabla N° 5: Materiales empleados en el trabajo.

MATERIAL	CARACTERISTICA	CAPACIDAD
Termómetro	Marca A-PRESICION	-10 a 150 °C.
Campanas desecadoras	Vidrio PIREX	
Lunas de reloj	5 cm de diámetro	
Crisoles de porcelana	10 cm de diámetro	
Balones de extracción		

3.1.3. EQUIPOS

Tabla N° 6: Equipos empleados en el trabajo.

EQUIPO	CARACTERISTICA	CAPACIDAD
Estufas	Marca THELCO modelo 16	Temperatura máx. de 200 °C.
Balanza digital	Marca OHAUS	1210g x 0.1 g.
Balanza analítica	Marca METTLER tipo H10T	Máxima de 160gr.
Mufla	Tipo GR-201/A NO.108-11786/3	Máxima de 500°C.
Secador de lecho fijo con recirculación de aire caliente.	Implementado con control adaptativo (Software Labview).	200g.
Secador solar indirecto	Con circulación de aire forzada.	800g
Mesas	Superficie lisa.	
Cuchillos	Acero inoxidable.	
Bisturís	Acero inoxidable.	
Vernier	Acero inoxidable.	
Equipo micro kjeldahl	Marca MIJSZERIPARI, tipo laboratorio	1481 OE -704,
Equipo de extracción	Soxhlet Buchii	

3.1.4. REACTIVOS

- Solución de digestión: 5 g de selenato de sodio en 50 ml de sulfato de cobre saturado en 1 l de ácido sulfúrico concentrado.
- Solución de ácido bórico al 2%
- Hidróxido de sodio al 0.5N.
- Ácido clorhídrico al 0.05 N tipificado.
- Ácido sulfúrico al 0.125 N.
- Hexano 150 ml por muestra.

3.1.5. MATERIALES EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO CON CIRCULACIÓN DE AIRE FORZADO.

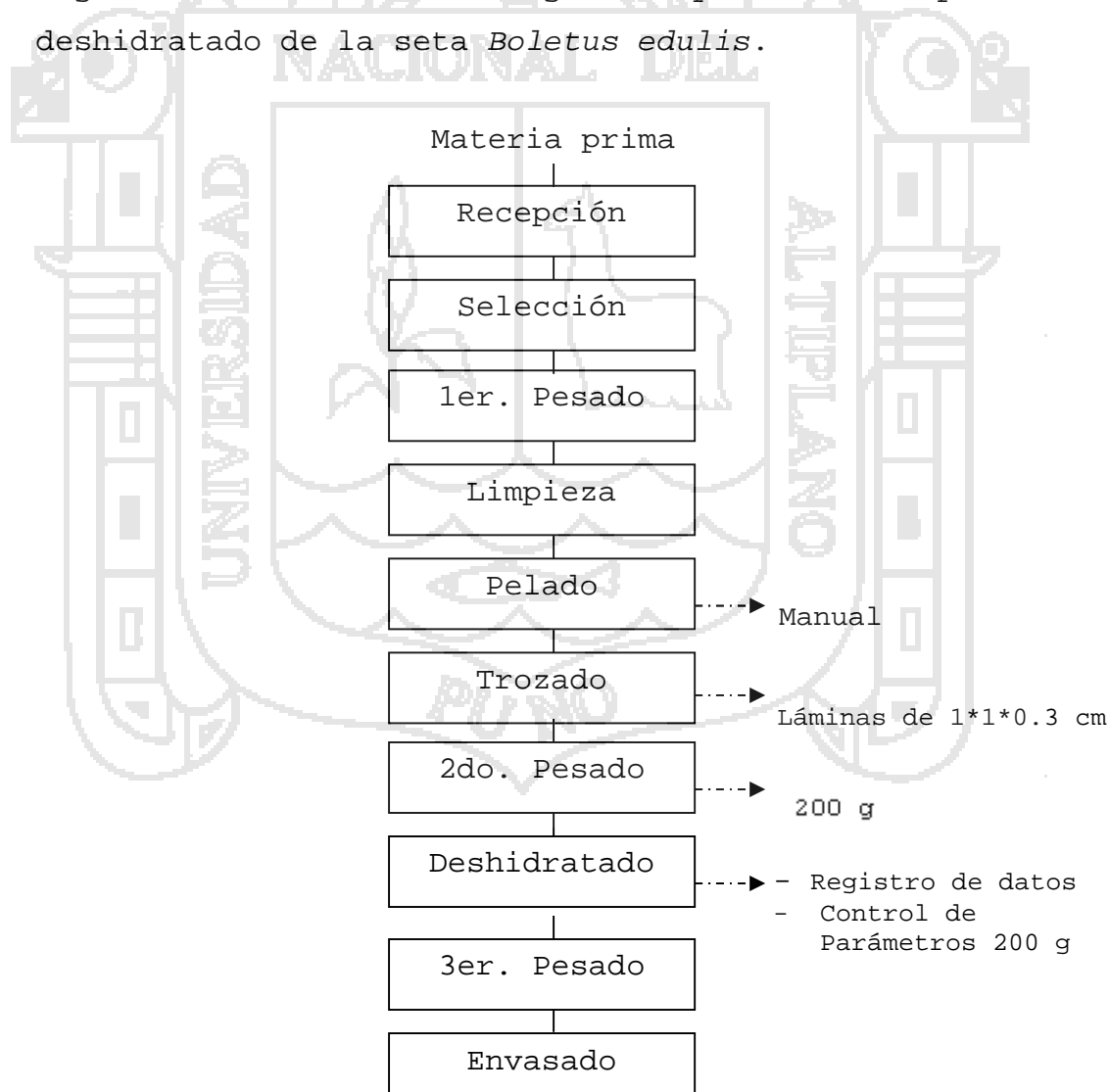
1. Planchas de acero inoxidable ASII 320, empleadas para el colector solar.
2. Planchas de fierro galvanizado, utilizado como placa de fondo del colector solar.
3. Planchas de calamina, utilizado como placa absorbente.
4. Varillas de aluminio, utilizado para la construcción de las bandejas.
5. Madera aguano, que se utilizó en la estructura de la cámara de secado.
6. Madera triplay de 8 mm, utilizado en los laterales de la cámara de secado.
7. Vidrio semi doble, empleado como cubierta transparente para el colector solar.
8. Plancha de Tecnopor, empleada en la base del colector solar para evitar pérdidas de calor.
9. Mallas de nylon, empleadas en las bandejas.
10. Pintura negro mate, empleada para el recubrimiento interior del colector solar.

11. Clavos, pernos, silicona ,cables eléctricos, entre otros; empleados en la unión de la estructuras
12. Dos ventiladores de 220V, utilizados para el colector y la cámara de secado.
13. Varilla de acero negro tipo "L", utilizado como estructura soporte del secador solar indirecto.

3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.2.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE SECADO, HUMEDAD DE SÓLIDO, DIFUSIVIDAD Y AJUSTE A LOS MODELOS EMPÍRICOS.

Figura N° 6. Metodología experimental para el deshidratado de la seta *Boletus edulis*.



Fuente: Elaboración propia (2011).

3.2.1.1. Descripción del proceso

a. Recepción

La seta recolectada en canastas se recibió en los laboratorios de la E.P. de Ingeniería Agroindustrial.

b. Selección

Se procedió a la clasificación de acuerdo al diámetro de sombrero, se escoge las setas de 12 - 15 cm esto para estandarizar el lote; además el tallo estuvo comprendido entre 8 -10 cm de altura aproximadamente.

c. Primer pesado

Se pesó las setas recolectadas para evaluar el rendimiento.

d. Limpieza

Se retiró manualmente los restos de paja, pasto, tierra y otros residuos que pudieron adherirse a la seta.

e. Pelado

Se procedió a pelar la cutícula que recubre al sombrero de la seta; con la ayuda de un cuchillo.

f. Trozado

Se realizó con la ayuda de un bisturí y un vernier, los cortes se realizaron en forma de láminas cuadradas (placa) uniformes de 1 *1 * 0,3 cm. ± 0.1 mm.

g. Segundo Pesado

Se pesó 200 g de seta trozada. Seguidamente estos trozos fueron dispuestos en las bandejas de secado de forma uniforme.

h. Deshidratado

Luego de cargar las bandejas en el equipo secador correspondiente, se procedió a deshidratar; en el caso del secador automatizado se programó diferentes velocidades de flujo de aire y temperaturas de deshidratado para adquirir datos, que sirvieron para determinar la curva de velocidad de deshidratado y pérdida de humedad.

i. Tercer Pesado

Se pesaron las muestras deshidratadas con el fin de calcular la humedad perdida en el proceso.

j. Envasado

La seta deshidratada fue envasada en envases de polietileno de alta densidad.

3.2.1.2. Cálculos en el proceso de secado de la seta

Para los cálculos y gráficos de las curvas de pérdida de peso y velocidad de secado se utilizó la metodología de OCÓN Y TOJO (1986), también se utilizó la siguiente ecuación para ajustar las curvas de secado obtenidas.

$$y = bx + a$$

Ec. N° 8

3.2.1.3. Determinación del coeficiente de difusividad efectiva del agua

Para determinar la difusividad efectiva del agua (D_0), se sometió a deshidratado 200 g de materia prima acondicionada; se trabajó a temperaturas de 40, 50 y 60°C y velocidad de aire de 1 y 1.5 m/s en un secador de lecho fijo con sistema de control adaptativo (software Labview) diseñado en la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA - Puno; en dónde se registraron los datos del proceso de secado para obtener curvas gráficas de deshidratado, para luego aplicar a estas la metodología tradicionalmente utilizada en el estudio de la transferencia de masa en estado no estacionario para el deshidratado de productos vegetales, esto es la ecuación de la segunda ley de Fick modificada para placa.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial X^2} \quad \text{Ec. N° 9}$$

Para resolver esta ecuación se consideró que el contenido de humedad inicial es uniforme y que la geometría se mantiene continua durante el proceso de deshidratación.

Ecuación de Fick modificada para placa:

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_a^2} e^{\left(\frac{-h_a^2 f^2 D_{ef}}{4L^2}\right)} \quad \text{Ec. N° 10}$$

Dónde:

Γ : Coeficiente de solución de la ley de Fick para distintas geometrías.

X : contenido de humedad al tiempo t .

X_0 : contenido de humedad inicial.

X_s : contenido de humedad en la superficie.

L : es el espesor de la lámina.

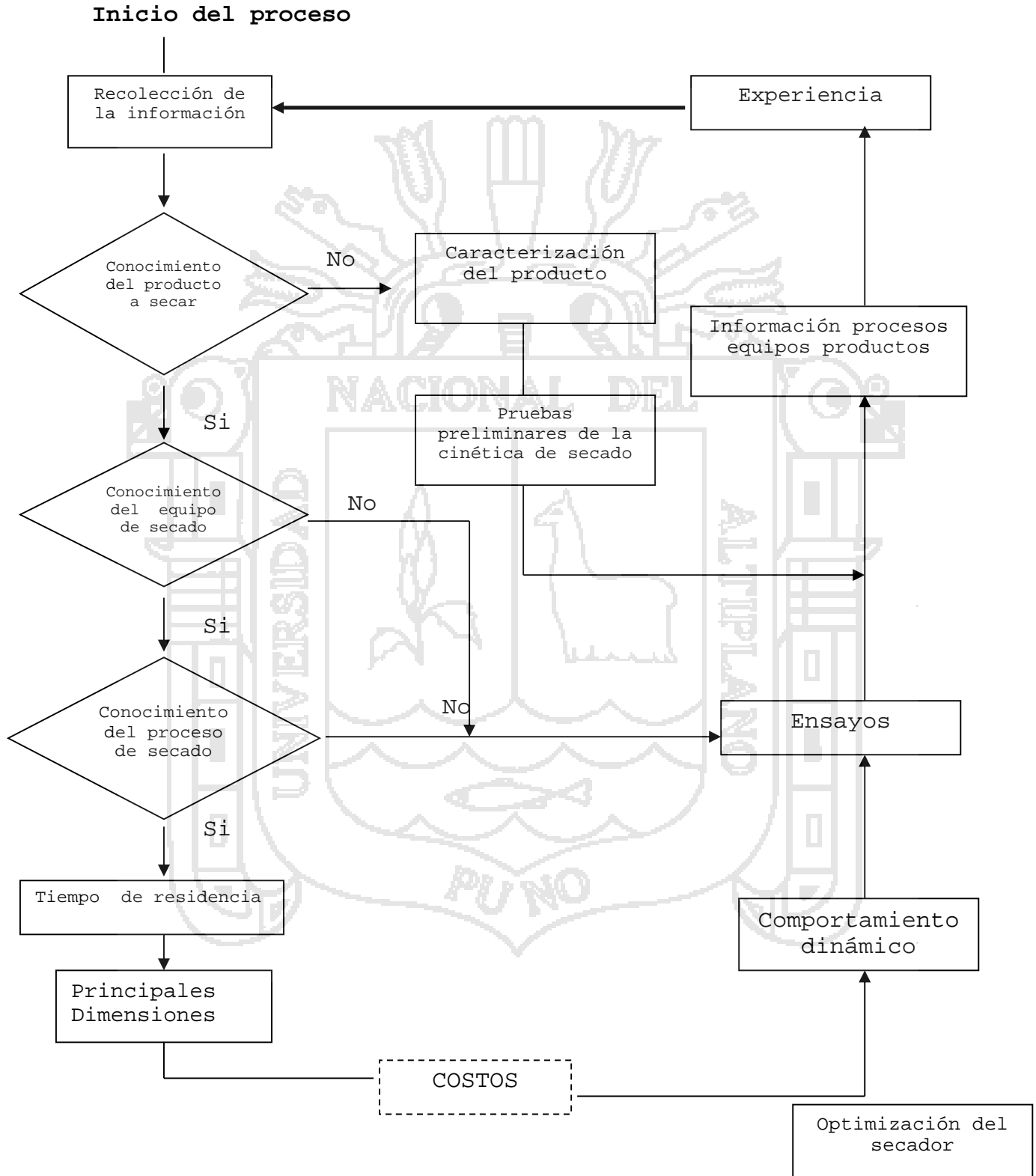
3.2.1.4. Determinación para ajuste a los modelos empíricos

Para ajustar a cada uno de los modelos empíricos (Newton y Page) luego del proceso de deshidratado, fué necesario obtener su relación gráfica (curvas cinética de secado) conocer además que estos modelos empíricos están fuertemente relacionados con la segunda ley de Fick y que derivan de una relación directa entre el contenido de humedad promedio y el tiempo de deshidratado del *Boletus edulis*.

Para estos dos modelos propuestos se evaluó la calidad de ajuste sobre los datos experimentales con los modelos experimentales de las ecuaciones N° 6 y 7 citadas en la bibliografía.

3.2.2. METODOLOGÍA EMPLEADA EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR SOLAR INDIRECTO CON AIRE FORZADO

Figura N° 7. Diagrama de flujo para el diseño y construcción de un secador solar indirecto con aire forzado.



Fuente: CHOQUEHUAYTA et al, (2007)

3.2.3. METODOLOGÍA PARA COMPARAR EL SECADOR DE LECHO FIJO CON AIRE FORZADO Y EL SECADOR SOLAR INDIRECTO

Para la determinación de las características fisicoquímicas la seta comestible *Boletus edulis* se sometió a los siguientes análisis:

3.2.3.1. Determinación de proteína; "Kjeldhal - Arnold - Gunning" (AOAC 1990)

Se determinó por el método Kjeldhal, usando el factor 6.25. El procedimiento comprendió tres fases: digestión, destilación y titulación. Se pesó 0.1 g de muestra, se envolvió en papel filtro, se introdujo en el balón Kjeldhal, se agregó 25 ml de H₂SO₄ concentrado y se colocó en la cocina para la digestión. A la muestra se le agrega NaOH inmediatamente se conecta el vapor para producir destilación, se conecta también el refrigerante y se recibe el destilado en un Erlemmeyer con contenido de ácido bórico mas indicador de Ph; la destilación termina cuando hay un viraje de color, luego se procede a la titulación y se anota el gasto de ácido clorhídrico.

$$\% \text{Nitrógeno} = \frac{\text{ml de HCL} \times \text{Normalidad} \times \text{meq}}{\text{gramos de muestra}} \times 100$$

Dónde: $\% \text{proteína} = 6.25 \times \% \text{nitrógeno}$

3.2.3.2. Determinación de grasa; Método por extracción con solvente orgánico (grasa bruta) (AOAC 1990)

Se procedió mediante el método soxleth, para lo cuál se pesó 2 g de la muestra, se empaquetó en papel filtro, se colocó el paquete en el cuerpo del aparato soxleth, previamente tarado libre de humedad y luego se agregó el hexano. Seguidamente se conectó a una fuente de calor

al calentarse se evaporó y ascendió a la parte superior del cuerpo del Soxhlet, allí se condensó por refrigeración y el hexano cayó nuevamente sobre la muestra, regresando al balón por sifón. Se evaporó el hexano remanente en el balón en una estufa a 60°C y se enfrió en una campana. Los cálculos se realizaron con la siguiente fórmula:

$$\%Grasa = \frac{\left(\text{peso de balón + grasa} \right) - \text{peso de balón vacío}}{\text{peso de la muestra}}$$

3.2.3.3. Determinación de fibra cruda; Método Gravimétrico (AOAC 1990)

a) Digestión ácida

Se pesó 3 g de muestra (exenta de grasa) en un vaso de 600 ml, se hirvió durante 30 min con 200 ml de H₂SO₄ al 1.25% luego de 30 min de hervido se filtró y se lavó con agua destilada caliente hasta neutralizar la acidez.

b) Digestión alcalina

Se añadió 200 ml de NaOH al 1.25% y se hirvió por 30 min se filtró al vacío en una cápsula de cerámica porosa, lavando con agua destilada caliente, luego se colocó a la estufa por 2 horas y se pesó, este peso se llamó P₁; luego se colocó a la mufla para eliminar la materia orgánica y así se obtuvo la cenizas y se pesó nuevamente P₂ los cálculos se realizaron de la siguiente forma:

$$Fibraneta = P_1 - P_2$$

3.2.3.4. Determinación de humedad; (AOAC 1990)

Se realizó por el método de desecación a estufa a 65°C con una muestra de 5 g hasta lograr peso constante

durante 72 horas, la determinación de humedad se realizó por diferencia de peso entre el peso inicial y el peso final, obteniéndose de forma directa el peso final:

$$\% \text{Humedad} = \frac{\text{peso total} - \text{peso inicial}}{\text{peso de muestra}} \times 100$$

Dónde:

Peso total= peso vaso + peso muestra húmeda.

Peso final= peso vaso + peso muestra seca.

3.2.3.5. Determinación de ceniza (AOAC 1990)

Se determinó calcinando la muestra en mufla a una temperatura de 600 °C, para quemar todo el material orgánico, se pesó 2 g de la muestra en un crisol previamente tarado y deshumedecido. Se calcinó en la mufla durante 4 horas hasta obtener un peso constante, en los 30 min de calcinación se sacó el crisol y se dejó enfriar, con el disgregador se rompieron las partículas incineradas de forma uniforme y se introdujo nuevamente en el crisol, transcurrido el tiempo de 3 horas de secado el crisol se dejó enfriar a temperatura ambiente, se colocó en un desecador y luego se pesó.

El porcentaje de ceniza se determinó de la siguiente manera:

$$\% \text{Ceniza} = \frac{\text{peso de crisol y ceniza} - \text{peso de crisol}}{\text{peso de muestra}} \times 100$$

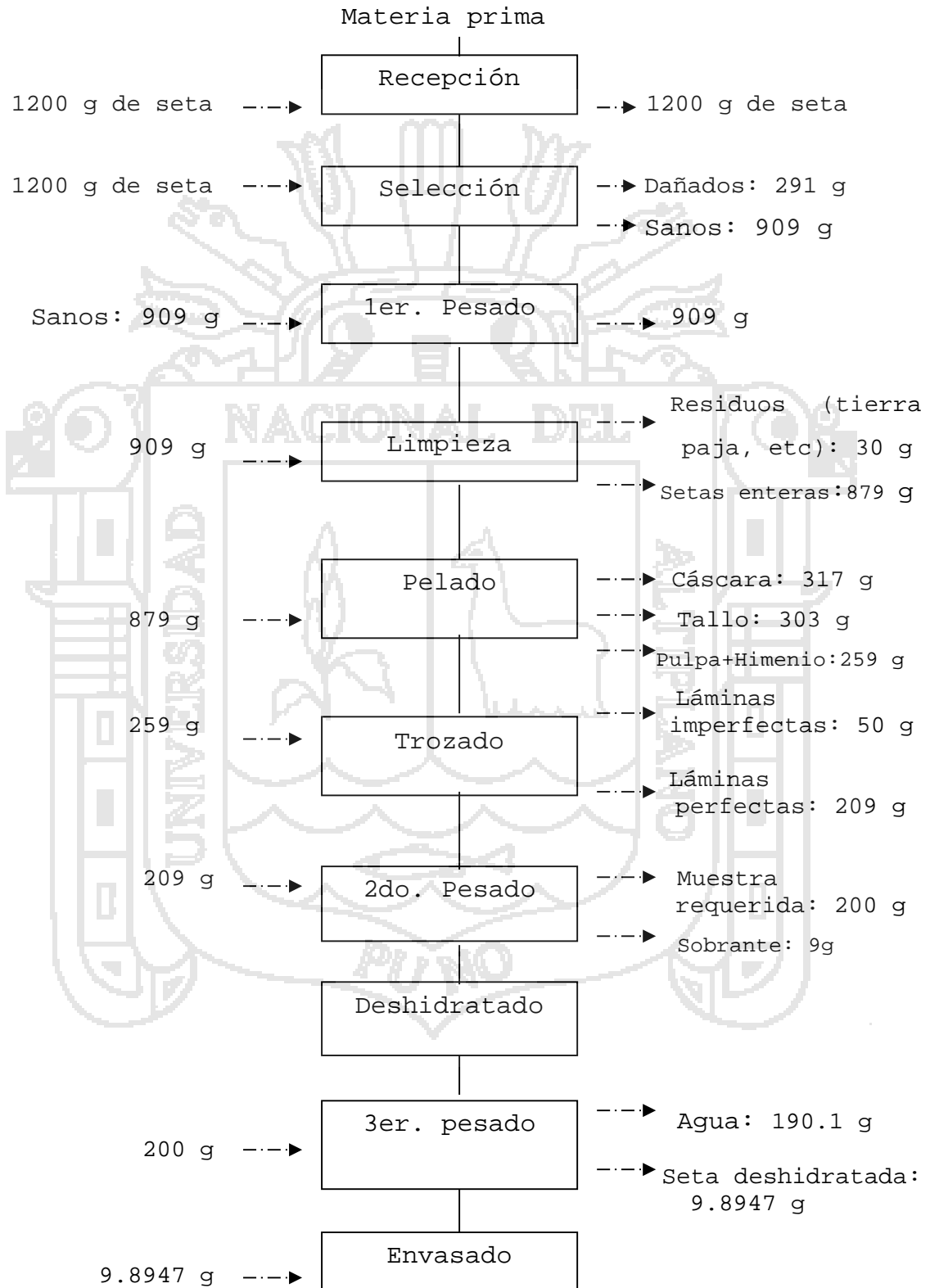
3.2.3.6. Determinación de carbohidratos totales

Se calculó por diferencia restando de 100, los porcentajes de humedad, proteína, grasa, fibra y ceniza:

$$\% \text{Carbohidratos} = 100 - (\% \text{cenizas} + \% \text{fibra} + \% \text{grasa} + \% \text{proteína} + \% \text{humedad})$$

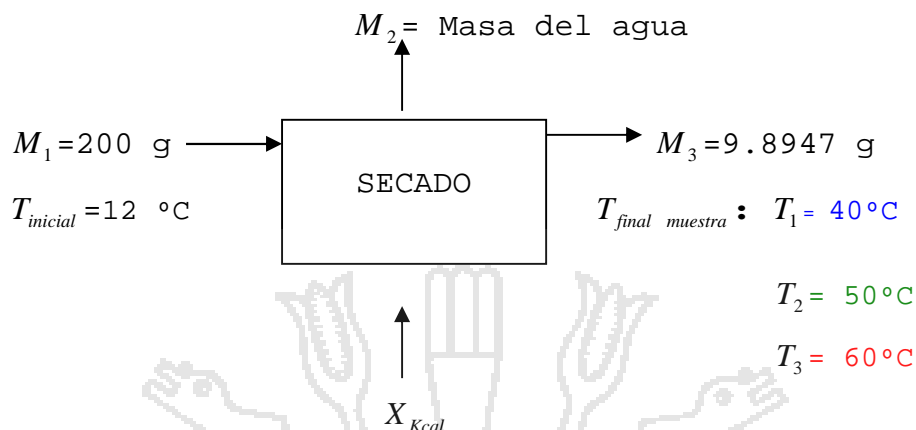
3.3. BALANCE DE MATERIA

Figura N° 8. Balance de materia en el deshidratado de la seta comestible *Boletus edulis*.



Fuente: Elaboración propia (2011).

3.4. CÁLCULOS PARA EL BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA



3.4.1. Cálculos para el balance de materia

$$M_1 = M_2 + M_3$$

$$200g = M_2 + 9.8947g \Rightarrow M_2 = 190.1053g$$

➤ Masa del agua 190.1053 g

3.4.2. Cálculos para el balance de energía

❖ Para 40°C:

$$Q_{ganado} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{latente} = M_{agua} * Q_{lat.vap.}$$

$$Q_{latente} = 0.190105Kg * 2.257 \frac{KJ}{Kg} \Rightarrow Q_{latente} = 0.42831KJ$$

$$Q_{sensible} = m * C_p * \Delta T$$

$$Q_{sensible} = 0.2Kg * 3.8828 \frac{KJ}{Kg \cdot K} * 30^\circ K \Rightarrow Q_{sensible} = 233.74456KJ$$

$$Q_{ganado} = 233.74456KJ + 0.42831KJ \Rightarrow Q_{ganado} = 234.17287KJ$$

Calor empleado en la evaporación del agua y calentar la seta:

$$\text{Energía necesaria/Kg de agua} = \frac{Q_{ganado}}{M_{agua}} = \frac{234.17287KJ}{0.1901053Kg} = 1231.8061 \frac{KJ}{Kg}$$

❖ Para 50°C

$$Q_{ganado} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{latente} = M_{agua} * Q_{lat.vap.}$$

$$Q_{latente} = 0.190105Kg * 2.257 \frac{KJ}{Kg} \quad \Rightarrow \quad Q_{latente} = 0.42831KJ$$

$$Q_{sensible} = m * C_p * \Delta T$$

$$Q_{sensible} = 0.2Kg * 3.8828 \frac{KJ}{Kg^{\circ}K} * 311^{\circ}K \quad \Rightarrow \quad Q_{sensible} = 241.5102KJ$$

$$Q_{ganado} = 241.5102KJ + 0.42831KJ \quad \Rightarrow \quad Q_{ganado} = 241.93847KJ$$

Calor empleado en la evaporación del agua y calentar la seta:

$$\text{Energía necesaria/Kg de agua} = \frac{Q_{ganado}}{M_{agua}} = \frac{241.93847KJ}{0.1901053Kg} = 1272.655 \frac{KJ}{Kg}$$

❖ Para 60°C

$$Q_{ganado} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{latente} = M_{agua} * Q_{lat.vap.}$$

$$Q_{latente} = 0.190105Kg * 2.257 \frac{KJ}{Kg} \quad \Rightarrow \quad Q_{latente} = 0.42831KJ$$

$$Q_{sensible} = m * C_p * \Delta T$$

$$Q_{sensible} = 0.2Kg * 3.8828 \frac{KJ}{Kg^{\circ}K} * 321^{\circ}K \quad \Rightarrow \quad Q_{sensible} = 249.2757KJ$$

$$Q_{ganado} = 0.42831KJ + 249.2757KJ \quad \Rightarrow \quad Q_{ganado} = 249.70407KJ$$

Calor empleado en la evaporación del agua y calentar la seta:

$$\text{Energía necesaria/Kg de agua} = \frac{Q_{ganado}}{M_{agua}} = \frac{249.70407KJ}{0.1901053Kg} = 1313.50399 \frac{KJ}{Kg}$$

3.5. FACTORES DE ESTUDIO

- Para el primer objetivo: Se utilizó el secador con implementación de control adaptativo porque permitía un control minucioso de parámetros en la evaluación sometida a:

Factores de estudio

- Temperatura (40,50 y 60 °C).
- Velocidad de aire (1 y 1.5 m/s).

Variables de respuesta

- Peso de *Boletus edulis* controlado de 0 a 4 horas.
- Difusividad.

- Para el segundo objetivo (Diseño y construcción de un secador solar indirecto) y tercer objetivo de comparación entre ambos secadores (secador de lecho fijo implementado con control adaptativo y el secador solar indirecto) las variables de estudio fueron las siguientes:

Factores de estudio

- Equipo deshidratador solar.
- Equipo deshidratador de lecho fijo implementado con control adaptativo (Software Labview).

Variables de respuesta

- Contenido de humedad final.
- Tiempo de secado.

3.5.1. DISEÑO ESTADÍSTICO

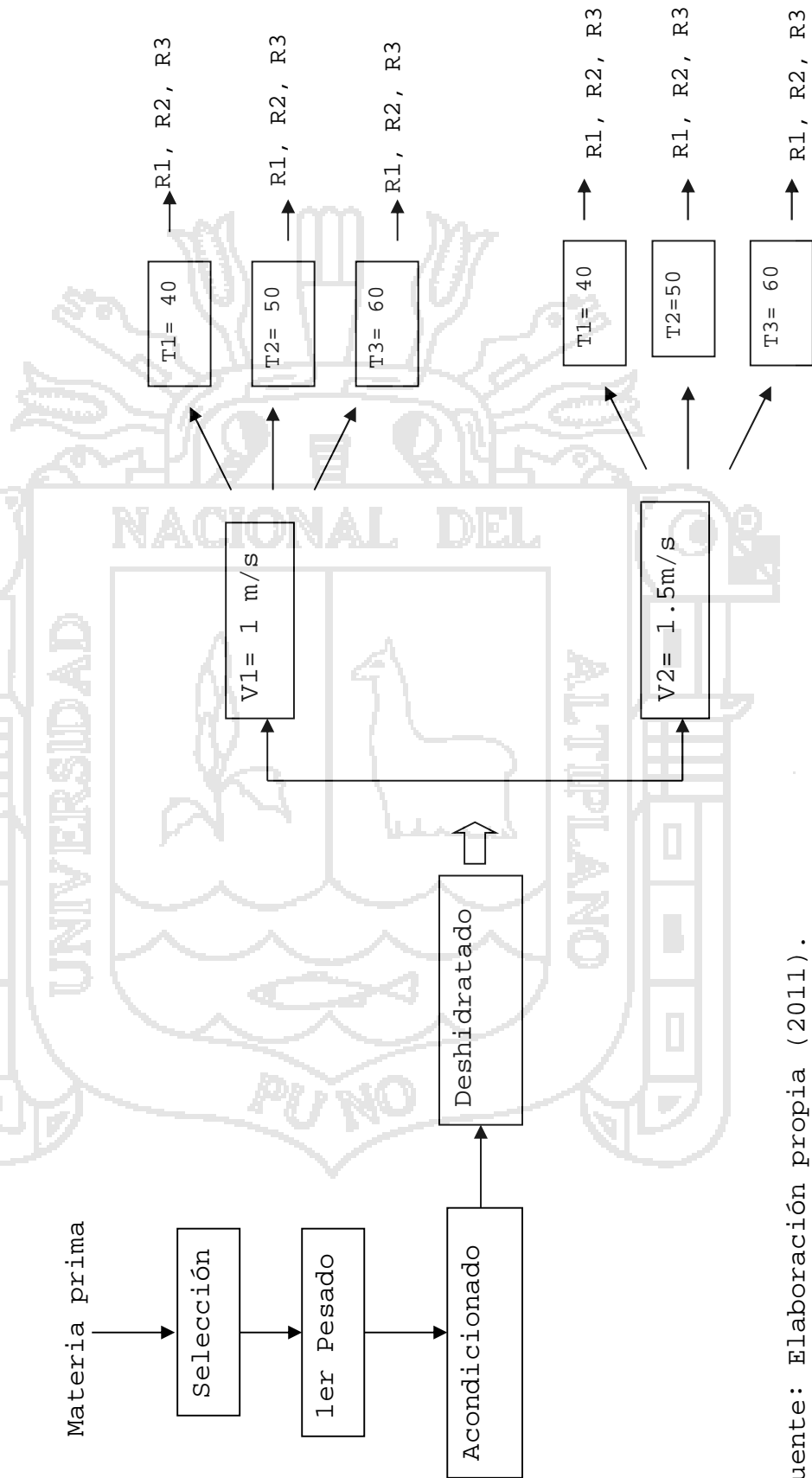
- Para el presente estudio se utilizó el siguiente diseño estadístico para el primer objetivo:
 - DCA (Porque se trabajo con unidades experimentales homogéneas).
 - Diseño factorial de $3 \times 2 \times 3$ (Para hallar una respuesta combinatoria de los distintos tratamientos).
 - Regresión lineal (Para ajustar las curvas de secado).
 - ANOVA (Para contrastar los resultados obtenidos y su variabilidad).
 - Prueba de Duncan (Útil para la comparación entre medias).
- Para el segundo y tercer objetivo no se utilizó diseño estadístico por ser descriptivos.

Los parámetros de control y diseño experimental se presentan en la siguiente figura:

En la figura N° 9 se observa que el estudio se realizo a dos velocidades y tres temperaturas con tres repeticiones cada una.

3.6. DISEÑO EXPERIMENTAL EN LA EVALUACIÓN DEL DESHIDRATADO DE LA SETA COMESTIBLE *Boletus edulis*.

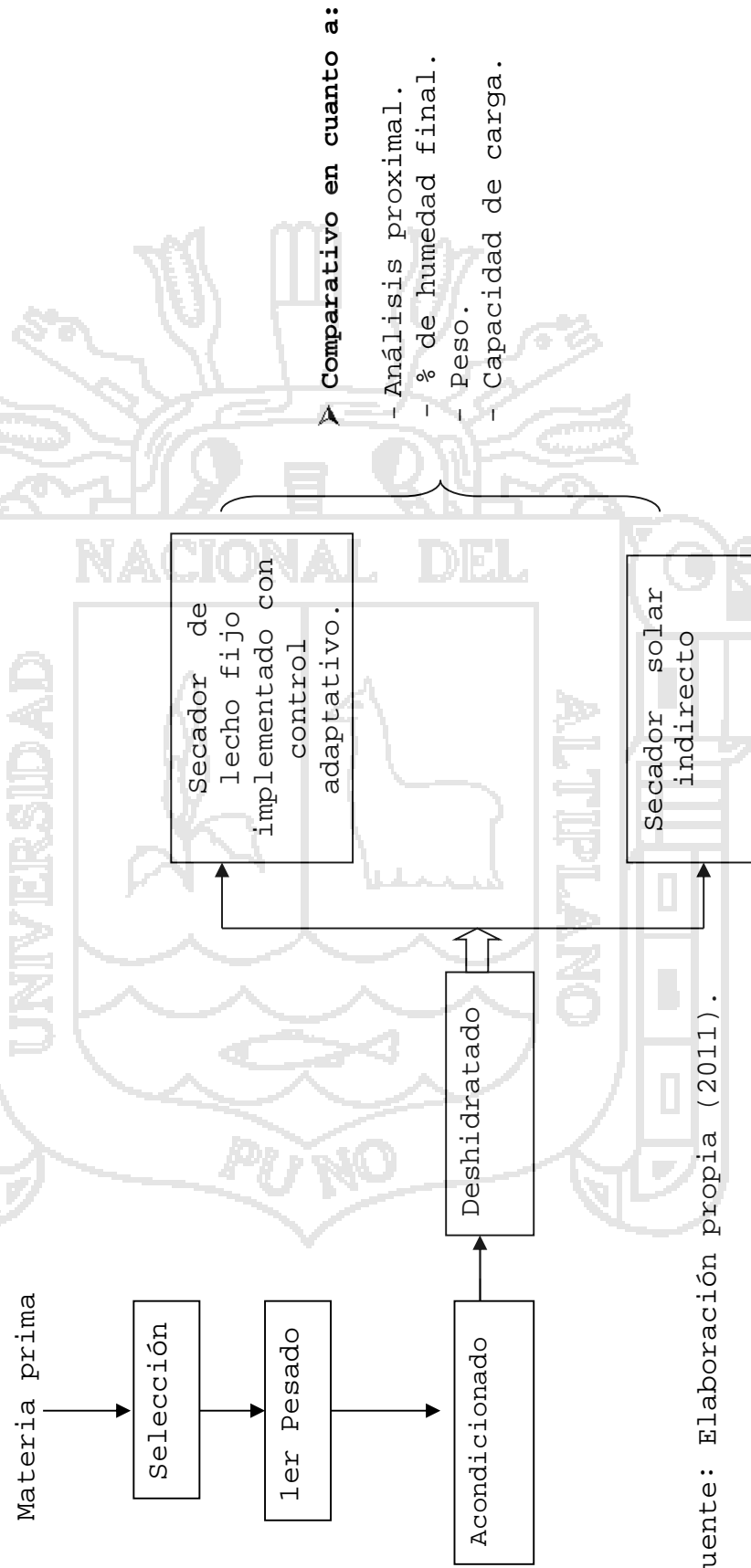
Figura N° 9. Diseño experimental en la evaluación del deshidratado de la seta comestible *Boletus edulis*.



Fuente: Elaboración propia (2011).

3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL COMPARATIVO DE LOS DOS SECADORES.

Figura N° 10. Diseño experimental para el comparativo de los dos secadores en el deshidratado de la seta comestible *Boletus edulis*.



Fuente: Elaboración propia (2011).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

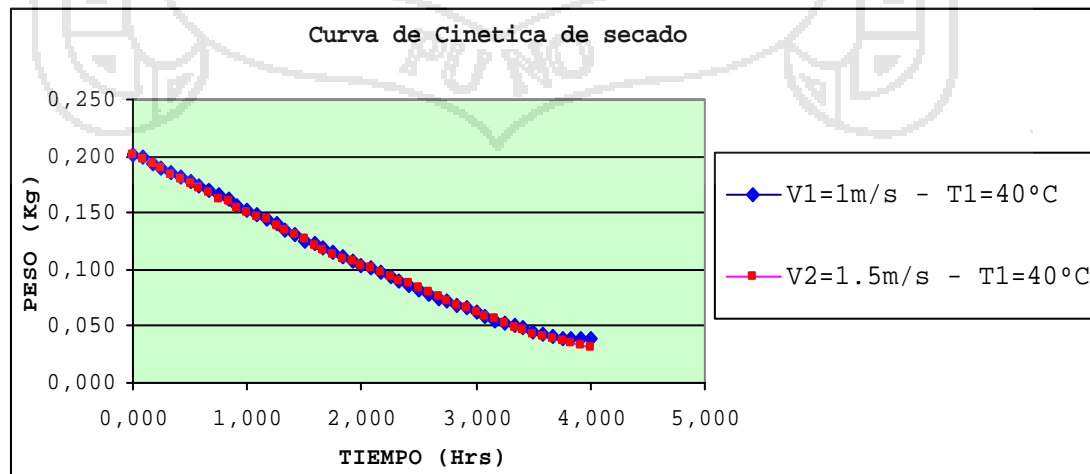
4.1 RESULTADOS PARA LA VELOCIDAD DE SECADO, HUMEDAD DE SÓLIDO, DIFUSIVIDAD Y AJUSTE A LOS MODELOS EMPÍRICOS

4.1.1. EVALUACIÓN DE LAS CURVAS DE CINÉTICA DE SECADO

En pruebas preliminares se determinó un tiempo de secado promedio de cuatro horas para la seta; razón por la que se evaluó el comportamiento del secado a las distintas temperaturas hasta las cuatro primeras horas. Se observó la contracción del volumen total de las láminas con el cambio de la estructura del tejido debido a la pérdida de humedad, los datos de origen para estas curvas se muestran en el ANEXO 1.

En las Figuras N° 11, 12 y 13 se muestran las cinéticas de deshidratación obtenidas para la seta *Boletus edulis*, las cuáles siguen los patrones típicos de la deshidratación de los alimentos descritas por GEANKOPLIS (1998).

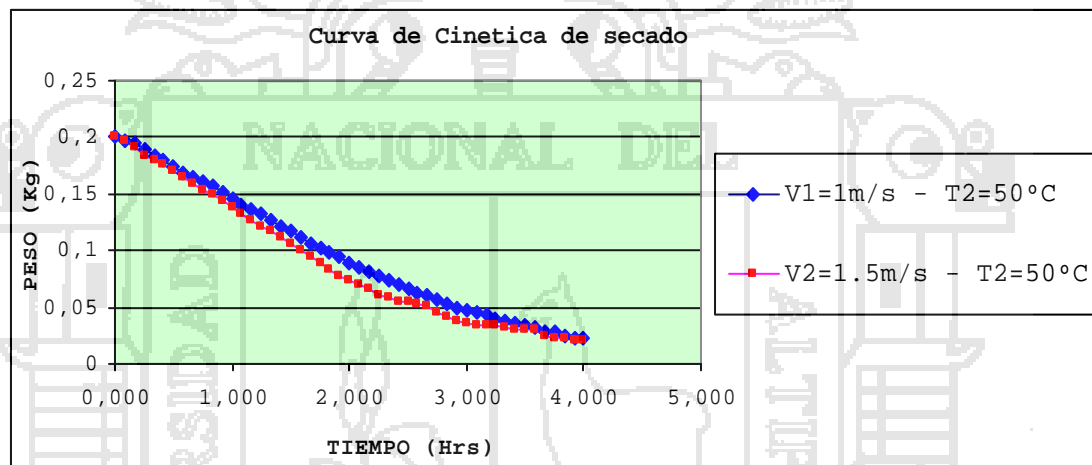
Figura N° 11. Curva de cinética de secado para la temperatura de 40 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s.



Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 11 se observa que la pérdida de agua es más rápida al inicio del proceso de secado, la pendiente es mayor durante las dos primeras horas en comparación a las dos horas restantes del control donde la pendiente disminuye lentamente. También se observa una ligera variación del peso cuando se trabajó a 1.5 m/s de velocidad de aire respecto a la velocidad de 1 m/s.

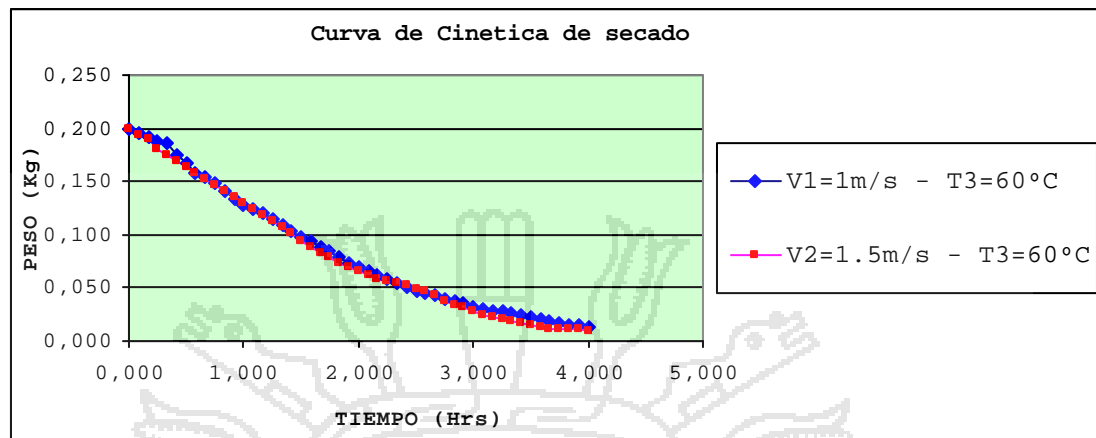
Figura N° 12. Curva de cinética de secado para la temperatura de 50 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s.



Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 12 se observa que la pérdida de agua es rápida debido a que la pendiente es elevada en casi todo el proceso de secado y solo disminuye en la última hora de control; cabe resaltar también la existencia de ligeras variaciones del peso que van de 0.0219 Kg a 0.0214 Kg cuando se trabajó a 1.5 m/s de velocidad de aire respecto a la velocidad de 1 m/s.

Figura N° 13. Curva de cinética de secado para la temperatura de 60 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s.



Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 13; se observa que la pérdida de agua es más rápida al inicio del proceso de secado como en las dos figuras anteriores, se aprecia que la pendiente es elevada en casi todo el proceso de secado y solo disminuye en la última hora mostrando una tendencia muy similar a la del secado a 40 y 50 °C.

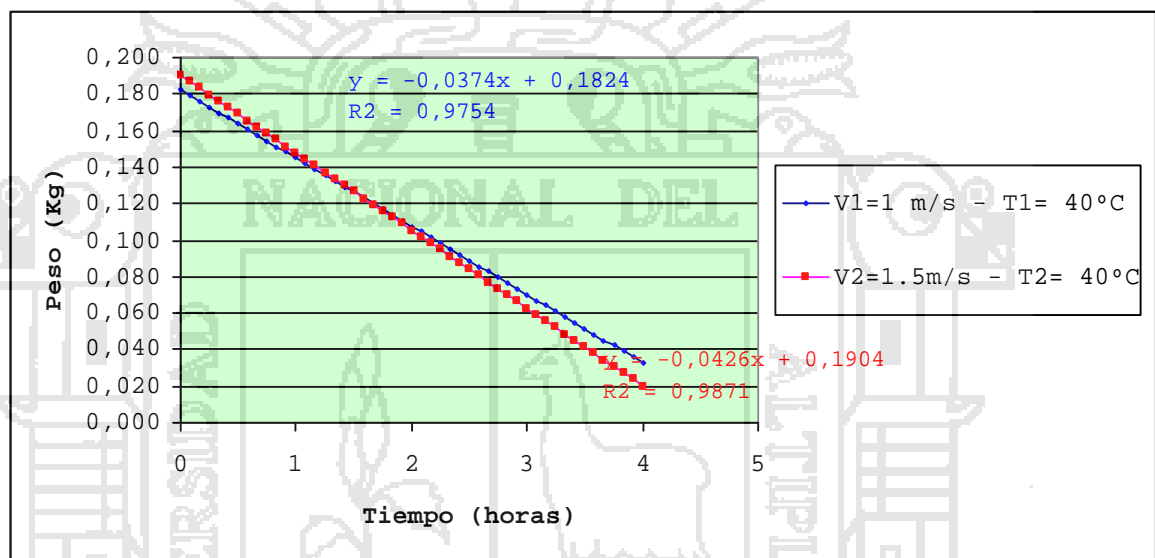
En general en las gráficas N° 11, 12 y 13 se observa que la combinación entre temperatura y velocidad de aire disminuyen la humedad del producto con mayor rapidez; implicando como consecuencia una mayor disminución del peso durante el tiempo de tratamiento; al aumentar la velocidad de aire incrementa ligeramente la velocidad de secado como se aprecia en las tendencias de las curvas de cinética de secado a la misma temperatura y diferentes velocidades de aire; este comportamiento se fundamentó en el hecho de que al elevarse la velocidad del aire aumenta la eliminación de humedad superficial del producto, este comportamiento fue descrito también por SINGH Y HELDMAN, (1998) quien lo justifica por el mayor recambio de aire y la mayor remoción de agua libre

que es arrastrada por este flujo; sin embargo en el presente experimento al observarse muy ligeras las variaciones de peso para una misma temperatura se pudo deducir que estas ocurren debido a que la cinética de secado no esta fuertemente influenciada por la velocidad de aire y que el empleo de temperaturas más elevadas es lo que reduce visiblemente el peso de la seta; se observa que el contenido de agua para distintas temperaturas fue muy diferente, indicando que la temperatura es una variable que influencia bastante el proceso de secado; coincidiendo con HOLDSWORTH, (1986) quien señaló que este acontecimiento ocurre debido a que las temperaturas elevadas del aire producen mayores flujos de secado; coincidiendo también con lo observado por PRADO *et al*, (2000) y ALMEIDA (2002) secando Tamaras (*Phoenix dactylifera L.*) y vainas de Algarroba (*Ceratonia siliqua*) respectivamente; en el presente experimento se observó también que el tiempo de deshidratación depende de ciertas condiciones como la geometría, humedad inicial del producto, entre otros.

La cinética de secado de la seta tiene características semejantes a la mayoría de los frutos a pesar de que no se ha encontrado estudios de cinética de secado de setas comestibles. En cuanto a las humedades obtenidas al final del proceso se detalla en el ANEXO N° 1; en ellas puede observarse que para un tiempo de secado de cuatro horas ofreció mejor resultado en cuanto a humedad final el tratamiento a 60 °C y 1.5 m/s de velocidad de aire con una humedad final de 0.0004 Kg de H₂O respecto a los otros tratamientos en donde se obtuvieron valores de: 0.004, 0.115, 0.120, 0.022, 0.027 de Kg de H₂O.

En las figuras N° 14, 15 y 16 se presenta las curvas de cinética de secado de la seta *Boletus edulis* ajustadas a una regresión lineal; en ellas se observa que a mayor velocidad de secado la pendiente muestra una tendencia a aumentar.

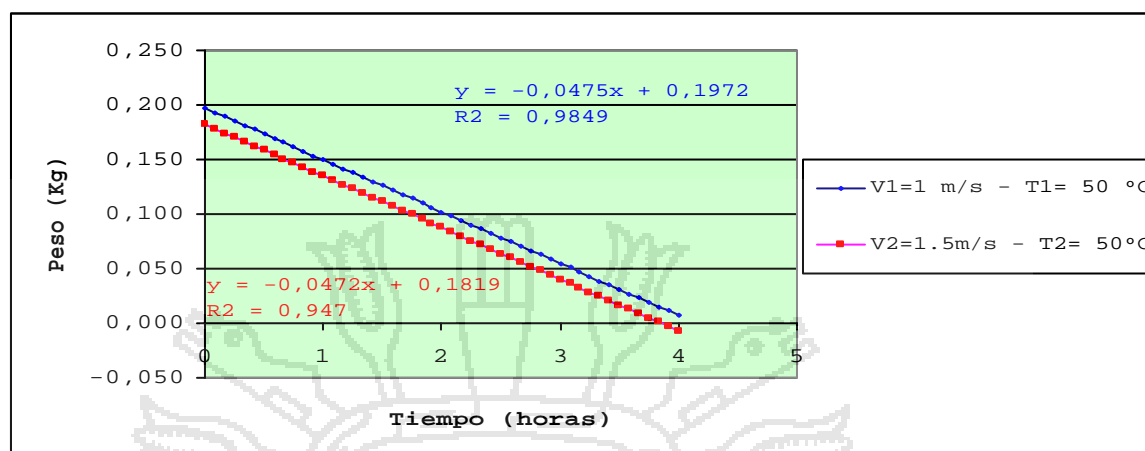
Figura N° 14. Curva de cinética de secado ajustada a una regresión lineal para la temperatura de 40 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s.



Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 14 se observa la curva de cinética de deshidratado a temperatura de 40 °C con diferentes velocidades de aire; ambos ajustes presentan pendiente moderada alcanzando un peso de 0.037 kg para velocidad de aire de 1 m/s y 0.032 kg para 1.5 m/s a las cuatro horas para ambos casos.

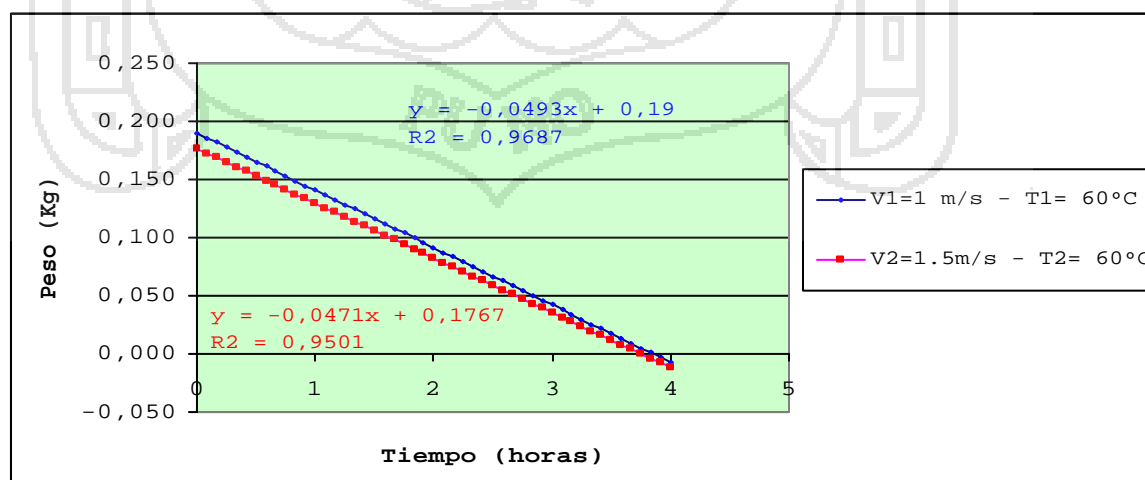
Figura N° 15. Curva de cinética de secado ajustada a una regresión lineal para la temperatura de 50 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s.



Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 15 se observa que al aumentar la temperatura a 50 °C, la pérdida de peso se incrementa respecto al caso anterior; obteniéndose 0.0219 kg para 1 m/s y 0.0214 kg para 1.5 m/s, las curvas de secado ajustadas a la regresión lineal son prácticamente coincidentes así como los pesos.

Figura N° 16. Curva de cinética de secado ajustada a una regresión lineal para la temperatura de 60 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s.



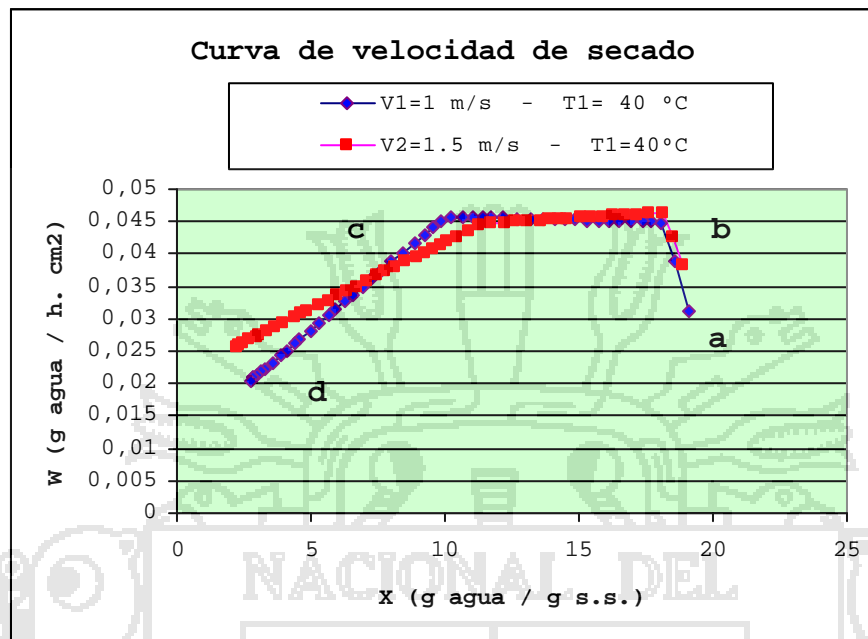
Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 16 se observa que a la temperatura de 60°C la remoción de humedad es superior a la que se consigue a temperaturas inferiores obteniéndose pesos de 0.0130 g y 0.0103 g para 1 m/s y 1.5 m/s de velocidad de aire; por otro lado se observa la existencia de una ligera influencia de la velocidad del aire en las cinéticas de deshidratación cuando aumenta la velocidad de aire de secado.

En las figuras 14, 15 y 16 se aprecia las curvas de cinética de secado que por su tendencia se ajustan a una regresión lineal; se observa que al aumentar la temperatura las curvas de deshidratación tienen mayor pendiente; así como lo explica BIMBENET *et al.* (1985) a mayor temperatura la humedad relativa del aire es menor, para el presente experimento se observa una considerable influencia del incremento de la temperatura sobre la velocidad de secado de la seta. Al aumentar la temperatura de 40 a 60 °C, la pérdida de humedad se incrementa notablemente; en cambio entre velocidad 1 y 1.5 m/s las cinéticas de secado son prácticamente coincidentes; es decir, no existe mucha influencia, de la velocidad del aire de secado en la deshidratación.

En las figuras N° 17, 18 y 19 se presentan las curvas de velocidad de secado obtenidas para la seta comestible *Boletus edulis*; estas figuras muestran las velocidades del proceso de secado de la seta a diferentes temperaturas, para una masa inicial de 200 g y velocidad de flujo de aire caliente de 1 y 1.5 m/s. Se observan diferentes periodos de velocidad de secado.

Figura N° 17. Curvas de velocidad de secado de la seta *Boletus edulis* a temperatura 40°C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/seg.



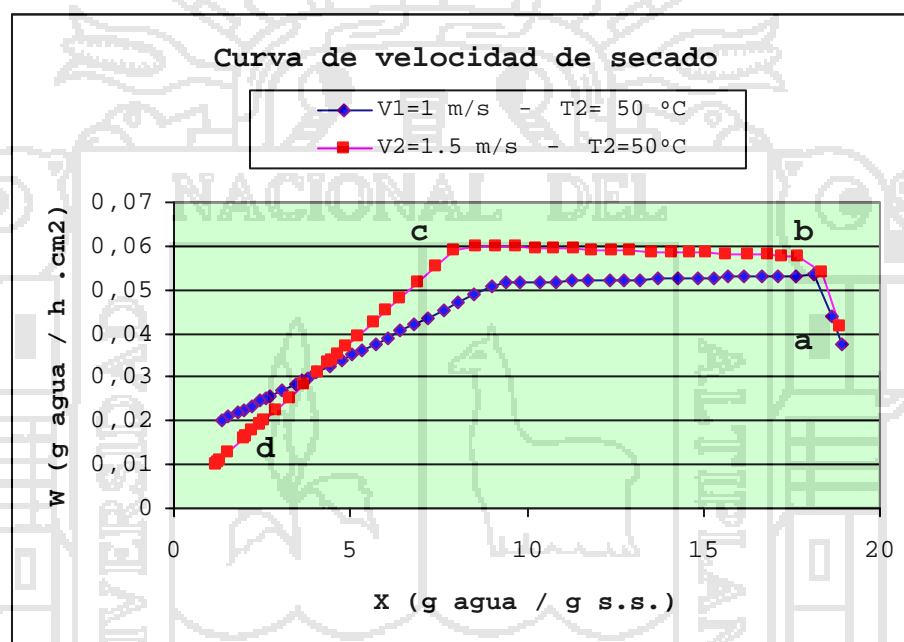
Fuente: Elaboración propia (2011).

Al analizar la figura N° 17 fue posible evidenciar la presencia de tres periodos de velocidad de deshidratado, donde se inicio con la humedad del sólido de 19.258 g agua/g s.s. y 19.265 g agua/g s.s, finalizando cuando llega a 2.753 g agua/g s.s y 2.213 g agua/g s.s. para 1 y 1.5 m/s de velocidad de aire respectivamente.

Se puede observar el periodo a - b ó periodo de estabilización en los dos primeros puntos, esto ocurre porque la muestra al momento de ser introducida en el secador no se encuentra a la temperatura requerida (40°C) porque tiene una temperatura inferior, en la sección anexos tablas 1 y 2; se puede observar que el tiempo que dura este periodo es de 10 min., seguidamente se nota el periodo b - c que se caracteriza por un aumento constante de la velocidad de deshidratado, según FOUST (1997) el corto periodo de velocidad constante se explica porque al trabajar con estructuras fibrosas el

movimiento del líquido es por difusión. Seguidamente la curva de velocidad inicia a decaer lentamente, dando comienzo al periodo de velocidad decreciente o periodo c - d, que inicia con una humedad de crítica de 9.874 g agua/g s.s. para 1 m/s y 11.238 g agua/g s.s. para de 1.5 m/s de velocidad de aire.

Figura N° 18. Curvas de velocidad de secado de la seta *Boletus edulis* a temperatura 50 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/seg.

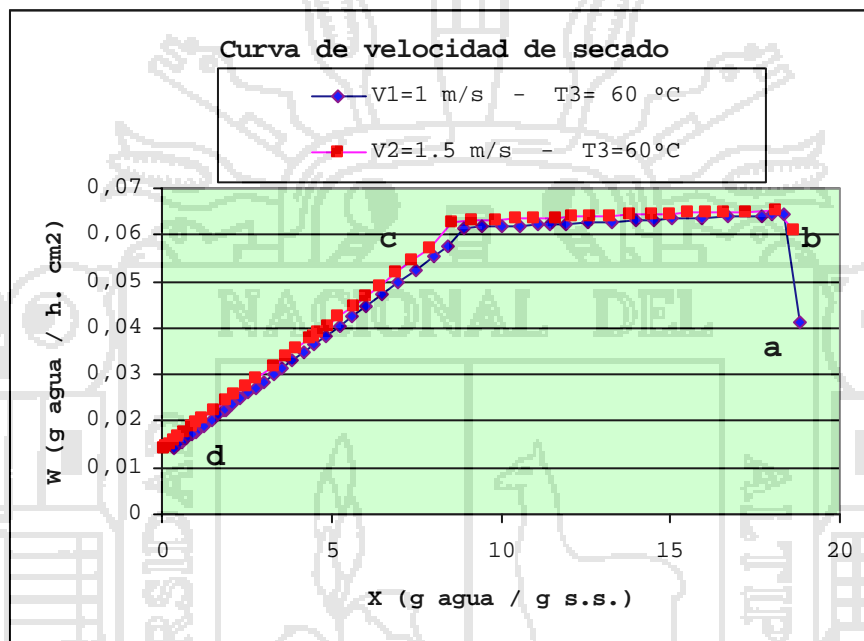


Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 18 se observa las curvas de velocidad de secado y los cambios que experimenta la misma en función de la humedad del sólido, durante el proceso de deshidratación de la seta a 50 °C al analizar la figura se evidenció la presencia de tres periodos de deshidratado, donde se inicio con la humedad del sólido de 19.2479 g agua/g s.s. y 19.2256 g agua/g s.s, finalizando cuando llega a 1.2098 g agua/g s.s y 1.1627 g agua/g s.s. para 1 y 1.5 m/s de velocidad de aire respectivamente. Posteriormente, la velocidad de deshidratado comienza a decaer lentamente, dando

comienzo al periodo de velocidad decreciente o periodo c - d, que inicia con una humedad de crítica de 8.9927 g agua/g s.s. para de 1 m/s y 7.9137 g agua/g s.s. para 1.5 m/s de velocidad de aire.

Figura N° 19. Curvas de velocidad de secado de la seta *Boletus edulis* a temperatura 60 °C y velocidades de aire de 1 y 1.5 m/seg.



Fuente: Elaboración propia (2011).

En la figura N° 19 se observa las curvas de velocidad de secado y los cambios que experimenta la velocidad de secado en función de la humedad del sólido, durante el proceso de deshidratación de la seta a 60 °C al analizar la figura fue posible evidenciar la presencia de los tres periodos de deshidratado, donde se inicio con la humedad del sólido de 19.206 g agua/g s.s. y 19.2047 g agua/g s.s, finalizando cuando llega a 0.361 g agua/g s.s y 0.0441 g agua/g s.s. para 1 y 1.5 m/s de velocidad de aire respectivamente. La humedad crítica fue de 8,437 g agua/g s.s. para 1 m/s y 7.9137 g agua/g s.s. para 1.5 m/s de velocidad de aire. Las curvas de 60 °C presentaron mayor remoción de humedad en comparación a

las de 40 y 50 °C su periodo de velocidad de secado constante se da en promedio a 0.06 g agua/h.cm² mientras que la de 50°C se da entre 0.05 y 0.06 g agua/h.cm² y la de 40 se encuentra entre 0.04 - 0.045 g agua/h.cm². Se puede observar que las curvas a 60 °C son muy similares lo que indicaría que a esta temperatura la velocidad de aire influye poco en la remoción de la humedad a esta misma temperatura la pendiente es idéntica a las distintas velocidades de aire de secado lo que pudo deberse a la mejor transferencia de calor en comparación a las temperaturas de 40 y 50 °C.

En general en las gráficas presentadas el corto periodo de inducción duró de 5 - 10 minutos aproximadamente, por ser un periodo muy corto generalmente se le omite como lo sugiere OCON Y TOJO (1986), seguidamente se observa que la velocidad de secado va en aumento debido a que elimina el agua libre que se evapora con mayor rapidez en cada uno de los experimentos; se puede establecer que existe una mayor remoción de humedad libre (agua no ligada) durante este proceso, es decir la disminución de la humedad es rápida. Según RUGEL *et al*, (2010) esto ocurre por la disponibilidad de la moléculas de agua para la evaporación (difusión externa) en las gráficas presentadas también se observa una tercera etapa donde la velocidad es lenta debido a la poca disponibilidad de agua en el periodo decreciente c - d, la velocidad de secado disminuye tardando aproximadamente 2.5 horas hasta llegar a su peso final, esto ocurre por que la remoción de humedad es proporcional a la concentración de agua del producto según McCABE *et al*, (1991) esto se debe a que la difusión desde el interior, no puede suministrar todo el líquido que se evaporaría en la superficie en consecuencia la velocidad de transferencia

de agua de la superficie al medio de arrastre disminuye. También se puede observar que las curvas presentadas se caracterizan por tener un comportamiento muy variable en la zona de velocidad decreciente que domina el proceso de deshidratación experimental, al igual que en el secado de otros materiales, como refiere GEANKOPLIS (1998) esta alta variabilidad implica aumentos y disminuciones abruptas de la velocidad de secado, atribuibles a la escasa transferencia de calor y masa en algunos lapsos durante el secado.

4.1.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EFECTOS DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD DE AIRE SOBRE LA VELOCIDAD DE SECADO.

En la tabla N° 7, se presenta los resultados obtenidos del análisis de varianza en el punto "b" de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 7. ANOVA Punto "b".

F. de V.	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig.
VELOC	1	0.00594050	0.00594050	14.11	0.0027	**
TEMPE	2	0.10245511	0.05122756	121.70	<.0001	**
VELOC*TEMPE	2	0.00612933	0.00306467	7.28	0.0085	**
ERROR	12	0.00505133	0.00042094			
Total	17	0.11957628				

Fuente: Elaboración propia (2011).

Coef. Var = 3.816314%

En la tabla N° 7 se muestra el análisis de varianza hasta llegar al punto "b" a pesar de ser una etapa que se omite según OCON Y TOJO, (1986) cabe resaltar que hasta el punto "b", tanto el factor temperatura como velocidad de aire son altamente significativos, lo que indica que en la etapa inicial ambos factores juegan un

rol importante en el secado; adquiere mayor importancia los efectos de la combinación de ambos.

En la tabla N° 8, se presenta los resultados para la prueba de Duncan, para el efecto de la velocidad de aire para el punto "b" de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 8. Prueba de Duncan para el Punto "b".

Velocidad	N° Observaciones	Promedio	Significancia
1 m/s	6	0.519444	a
1.5 m/s	6	0.555778	b
1 - 1.5		*-0.036334	

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la tabla N° 8 se muestra el análisis estadístico del efecto de la velocidad de aire, para el punto "b" correspondiente al periodo (a-b), donde se observa que hasta este punto; la velocidad 1.5 m/s tuvo mejor efecto en eliminar la humedad adherida a las láminas del *Boletus edulis* comparativamente con la velocidad 1 m/s lográndose eliminar en promedio 0.555778 g. H₂O/g.SS y 0.519444 g. H₂O/g.ss respectivamente.

En las tablas N° 9 y 10 se presentan la interacción; para efectos de la temperatura y velocidad de aire en el punto "b" de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 9. Efecto simple de interacción velocidad dentro de temperatura para el punto "b".

Temperatura	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig
40	1	0.002948	0.002948	7.00	0.0213	**
50	1	0.008894	0.008894	21.13	0.0006	**
60	1	0.000228	0.000228	0.54	0.4757	n.s.
Total	3	0.01207				

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la tabla N° 9 se muestra la interacción de la velocidad dentro de la temperatura para el punto "b" en donde se aprecia una diferencia altamente significativa entre los niveles 1 y 1.5 m/s, bajo los niveles 40 y 50 °C, es decir que a estas temperaturas la velocidad de aire si cumple un rol importante en el secado excepto para la mas alta temperatura que es 60°C donde la velocidad de aire es no significativa, lo que indica que a temperaturas altas el proceso de secado esta regido mas por la temperatura que por la velocidad de aire de secado.

Tabla N° 10. Efecto simple de interacción de la temperatura dentro de velocidad para el punto "b"

Velocidad	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig.
1 m/s	2	0.059822	0.029911	71.06	<.0001	**
1.5 m/s	2	0.048763	0.024381	57.92	<.0001	**

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la tabla N° 10 se puede observar la interacción de la temperatura dentro de la velocidad de aire donde existe una diferencia altamente significativa para los niveles 40, 50 y 60 °C bajo los niveles 1 y 1.5 m/s, lo que indica que la temperatura influye bastante sobre el rol de la velocidad de aire.

En la tabla N° 11, se presenta los resultados obtenidos del análisis de varianza en el punto "b" de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 11. ANOVA Punto "c".

F. de V.	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig
VELOC	1	0.01155200	0.01155200	34.91	<.0001	**
TEMPE	2	0.10877478	0.05438739	164.34	<.0001	**
VELOC*TEMPE	2	0.00718633	0.00359317	10.86	0.0020	**
Error	12	0.00397133	0.00033094			
Total	17	0.13148444				

Fuente: Elaboración propia (2011).

Coef. Var = 3.403886%

En la tabla N° 11 se muestra Para el punto c al igual que en el caso anterior tanto temperatura como la velocidad de aire son altamente significativos y al actuar en combinación reducen significativamente el contenido de humedad de la seta se observa menos diferencia entre si para Fc, que en el caso anterior por lo que se analiza a profundidad el efecto de la interacción de ambos factores.

En la tabla N° 12, se presenta los resultados para la prueba de Duncan, para el efecto de la velocidad de aire en cada punto de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 12. Prueba de Duncan para el Punto "c".

Velocidad	N° Observaciones	Promedio	Significancia
1 m/s	6	0.509111	a
1.5 m/s	6	0.559778	b
1 - 1.5		* - 0.050667	

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la tabla N° 12 se observa la prueba de comparaciones múltiples Duncan desde el punto "b" hasta el punto "c" en donde se obtuvo 0.509111 g. H₂O/g. SS para la velocidad 1 m/s y 0.559778 g. H₂O/g. SS para la velocidad 1.5 m/s; también se observa que hasta este

punto; la velocidad 1.5 m/s tuvo mejor efecto en eliminar la humedad adherida a las láminas del *Boletus edulis*.

En las tablas N° 13 y 14, se presentan los resultados obtenidos de la interacción; para efectos de la temperatura y velocidad de aire en el punto "c" de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 13. Efecto simple de interacción velocidad dentro de temperatura para el punto "c".

Temperatura	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig
40	1	0.002993	0.002993	9.04	0.0109	**
50	1	0.015708	0.015708	47.46	<.0001	**
60	1	0.000037500	0.000037500	0.11	0.7422	n.s.

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la tabla N° 13. Interacción de la velocidad dentro temperatura para el punto "c", existe diferencia altamente significativa entre los niveles 1 y 1.5 m/s bajo los niveles 40 y 50°C. Pero se observa que a 60°C es no significativo, lo que indica que a esta temperatura, la velocidad influye menos que la temperatura sobre el secado.

Tabla N° 14. Efecto simple de interacción temperatura dentro de velocidad para el punto "c".

Velocidad	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig
1 m/s	2	0.057654	0.028827	87.10	<.0001	**
1.5 m/s	2	0.058308	0.029154	88.09	<.0001	**

Fuente: Elaboración propia (2011).

En tabla N° 14. se muestra la interacción de la temperatura dentro de velocidad en el punto "c" existe diferencia altamente significativa entre los niveles 40, 50 y 60°C bajo los niveles 1 y 1.5 m/s, lo indica que temperatura y velocidad se complementan ejerciendo un rol mas importante la temperatura sobre la velocidad de aire de secado.

En la tabla N° 15 se presenta los resultados obtenidos del análisis de varianza en el punto "d" de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 15. ANOVA Punto "d".

F. de V.	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig
VELOC	1	0.00361250	0.00361250	128.76	<.0001	**
TEMPE	2	0.00891100	0.00445550	158.81	<.0001	**
VELOC*TEMPE	2	0.02383033	0.01191517	424.70	<.0024	**
Error	12	0.00033667	0.00002806			
Total	17	0.03669050				

Fuente: Elaboración propia (2011).

Coef. Var = 3.272966 %

En la tabla N° 15. Del punto "d" como en los casos anteriores la temperatura y la velocidad de aire son altamente significativos y al actuar en combinación reducen significativamente el contenido de humedad de la seta, razón por la que se realizo una interacción entre ambos factores para ver el grado de importancia que tienen estos en la remoción de la humedad para el punto "d".

En la tabla N° 16, se presenta los resultados para la prueba de Duncan, para el efecto de la velocidad de aire en cada punto de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 16. Prueba de Duncan para el Punto "d".

Velocidad	N° Observaciones	Promedio	Significancia
1 m/s	6	0.176	a
1.5 m/s	6	0.147667	a
1 - 1.5		0.028333	

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la tabla N° 16 para el punto "d" donde se observa un valor de velocidad promedio 0.176 g. H₂O/g. y 0.147667 g. H₂O/g. para velocidad 1 m/s y 1.5 m/s respectivamente donde se aprecia que ambas velocidades tuvieron similar efecto en eliminar la humedad, lo que pudo deberse a que a temperaturas de 60 °C la velocidad pierde significancia es decir quien acelera el arrastre de agua es el calor; más no el flujo de aire como señala HOLDSWORTH, (1986) las temperaturas elevadas producen mayor secado, por causa del aumento de calor. Por su parte MONTES *et al* (2008), menciona que al aumentar la temperatura del aire de secado disminuye significativamente el tiempo de secado, así para la seta se necesita menos tiempo para finalizar el secado con la temperatura de 60 °C que para las temperaturas de 50 y 40 °C.

En las tablas N° 17 y 18 se presentan los resultados obtenidos de la interacción; para efectos de la temperatura y velocidad de aire en el punto "d" de la curva de velocidad de secado.

Tabla N° 17. Efecto simple de interacción velocidad dentro temperatura para el punto "d".

Temperatura	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig
40	1	0.006273	0.006273	223.58	<.0001	**
50	1	0.019153	0.019153	682.70	<.0001	**
60	1	0.002017	0.002017	71.88	<.0002	**

Fuente: Elaboración propia (2011).

Al analizar la tabla N° 17 de interacción de la velocidad dentro temperatura para el punto "d", existe diferencia altamente significativa entre los niveles 1 y 1.5 m/s bajo los niveles 40, 50 y 60°C, lo que indica que para este punto ambos son factores ejercen una acción igualmente importante para el secado.

Tabla N° 18. Efecto simple de interacción temperatura dentro de velocidad para el punto "d".

Velocidad	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig
1 m/s	2	0.005521	0.002760	98.39	<.0001	**
1.5 m/s	2	0.027221	0.013610	485.12	<.0001	**

Fuente: Elaboración propia (2011).

Al igual que en la tabla N° 18 la tabla N° 17 muestra la interacción de la temperatura dentro de velocidad en el punto "d" en donde existe diferencia altamente significativa entre los niveles 40, 50 y 60°C que corrobora la interdependencia de ambos factores para el proceso de secado en el punto "d".



4.1.3. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LA DIFUSIVIDAD

En la Tabla N° 19. Se presentan los valores de difusividad efectiva del agua, así como los valores para el cálculo de la misma como son: R² y pendiente para los diferentes tratamientos de temperatura y velocidad de aire de secado.

Los cálculos se realizaron según la ecuación de la ley de Fick modificada para lámina:

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_a^2} e^{\left(\frac{-h_a^2 f^2 D_{ef}}{4L^2}\right)}$$

$$D_{ef} = \frac{4bL^2}{h_n^2 f^2}$$

Tabla N° 19. Coeficiente de difusividad efectiva del agua presente en la seta *Boletus edulis*.

	T (°C)	Vel. de Aire (m/s)	R ²	pendiente	D (m ² /s)	D total (m ² /s)
tramo 1	40	1	0.0019	-0.0012	-4.37705*10 ⁻⁹	1.2219*10 ⁻⁷
tramo2	40	1	0.4614	0.0347	1.2657*10 ⁻⁷	
tramo1	40	1.5	0.0038	0.0025	9.11886*10 ⁻⁹	8.4258*10 ⁻⁸
tramo 2	40	1.5	0.3553	0.0206	7.51394*10 ⁻⁸	
tramo 1	50	1	0.0074	0.0019	-3.65*10 ⁻⁹	2.601*10 ⁻⁷
tramo 2	50	1	0.6766	0.0404	2.637*10 ⁻⁷	
tramo 1	50	1.5	0.0103	-0.0026	-3.65*10 ⁻⁹	2.612*10 ⁻⁷
tramo 2	50	1.5	0.6618	0.0705	2.648*10 ⁻⁷	
tramo 1	60	1	0.002	0.003	1.09426*10 ⁻⁸	2.0682*10 ⁻⁷
tramo 2	60	1	0.8615	0.0537	1.95873*10 ⁻⁷	
tramo 1	60	1.5	0.0047	0.0025	9.11886*10 ⁻⁹	2.0864*10 ⁻⁷
tramo 2	60	1.5	0.0025	0.0547	1.99521*10 ⁻⁷	
tramo 1 H	50	1.5	1.7781	0.1118	4.07796*10 ⁻⁷	1.01621*10 ⁻⁶
tramo 2 H	50	1.5	2.666	0.1668	6.08411*10 ⁻⁷	
tramo 1 P	50	1.5	3.5539	0.2218	8.09026*10 ⁻⁷	1.81867*10 ⁻⁶
tramo 2 P	50	1.5	4.4418	0.2768	1.00964*10 ⁻⁶	

Fuente: Elaboración propia (2011)

En la tabla N° 19 se observa que los coeficientes de difusividad efectiva varían entre $8.4258 \cdot 10^{-8}$ y $1.81867 \cdot 10^{-6}$ estos resultados se mostraron próximos a los reportados por OLIVEIRA *et al*, (2005) en su estudio sobre la cinética de secado de Anacardo en secador de lecho fijo con difusividad efectiva variando entre $1.71 \cdot 10^{-7}$ y $1.97 \cdot 10^{-7}$. Para determinar mejor la difusión efectiva del agua se trabajó con láminas de $1 \cdot 1$ cm. de lado y 3mm de grosor, con el fin de que la difusión se realice en menor tiempo y sea homogénea para toda la muestra, la tasa de secado aumenta con la disminución del espesor de las láminas de la seta, de acuerdo a los coeficientes de difusión efectiva determinados, sin embargo se observó que en algunos casos se unieron las laminas entre sí retardando así la difusión, además las láminas al perder agua se contrajeron pero este es un proceso despreciable según BARBOSA Y VEGA, (2006) porque la teoría de difusión no tiene en cuenta el encogimiento coincidiendo también con GEANKOPLIS (1998), quien enuncia que los materiales fibrosos como vegetales y otros productos alimenticios, se contraen al eliminarse la humedad.

En el experimento realizado los valores de difusividad efectiva encontrados para el *Boletus edulis* son de este orden, la pulpa presenta valores de difusividad mayores respecto al himenio que van desde $1.81867 \cdot 10^{-6}$ y $1.01621 \cdot 10^{-6}$ m²/s respectivamente debido a que en la pulpa se encuentran mayor porcentaje de agua libre y presenta mayor porosidad coincidiendo con RIZVI, (1986) quien señala que la difusividad efectiva se encuentra relacionada con las características y composición de un alimento.



La tabla N° 20 muestra un análisis de varianza para la difusividad donde se aprecia que los factores de temperatura y velocidad de aire son significantes, es decir que tanto la temperatura y velocidad tienen efectos importantes en la difusión del agua, sin embargo la temperatura resulta altamente significativa y es un factor mas relevante que la velocidad de aire, es decir el aumento de la temperatura favoreció la transferencia de masa y como consecuencia el aumento de la difusividad efectiva, por lo cual se le determina un valor óptimo de 50.37 °C para la difusión de la seta (himenio y pulpa).

Tabla N° 20. ANOVA PARA LA DIFUSIVIDAD.

F. de V.	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig.
VELOC	1	3.9808212*10 ⁻⁸	3.9808212*10 ⁻⁸	0.59	0.4561	*
TEMPE	2	3.4285499*10 ⁻⁷	1.7142749*10 ⁻⁷	2.55	0.1190	**
VELOC*TEMPE	2	9.5481876*10 ⁻⁸	4.7740938 *10 ⁻⁸	0.71	0.5105	*
Error	12	8.0521381 *10 ⁻⁷	6.7101151*10 ⁻⁸			
Total	17	1.2833589*10 ⁻⁶				

Fuente: Elaboración propia (2011).

Utilizando como modelo para la optimización: $y = -0.000010 + 4.237564e-7t - 4.20612e-9t^2$

Se obtiene una temperatura óptima para difusividad de T = 50.37

4.1.4. PARA EL AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMATICOS

En la Tabla N° 21 y 22 se presentan los valores de los diferentes parámetros para los modelos de Page y Newton. Obtenidos para nuestros datos experimentales de secado de la seta comestible *Boletus edulis* a diferentes temperaturas y velocidades de aire.

Tabla N° 21. Parámetros de la ecuación de Page para deshidratado de la seta *Boletus edulis*.

Temperatura (°C)	Velocidad de aire (m/s)	K	n
40	1	0.7730 ± 0.5170	0.0231 ± 0.0216
	1.5	1.1630 ± 1.1460	0.0158 ± 0.0098
50	1	0.3385 ± 1.2925	0.0196 ± 0.0175
	1.5	2.3770 ± 2.3330	0.0549 ± 0.0139
60	1	1.5870 ± 1.5030	0.0278 ± 0.0260
	1.5	1.4875 ± 1.4005	0.0365 ± 0.0265

Fuente: Elaboración propia (2011)

Los cálculos se realizaron según el modelo de Page, modelo difusional de tipo exponencial con dos parámetros K y n para todos los casos como se muestra:

$$\frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} = \left[\exp(-K^2 t) \right]^n \quad \Leftrightarrow \quad \ln \left(\ln \left(\frac{X_{wt}}{X_{wo}} \right) \right) = -\ln k + n \ln t$$

Tabla N° 22. Parámetros de la ecuación de Newton para deshidratado de la seta *Boletus edulis*.

Temperatura (°C)	Velocidad de aire (m/s)	K
40	1	0.0065 ± 0.0005
	1.5	0.0650 ± 0.025
50	1	0.0070 ± 0.0050
	1.5	0.0415 ± 0.0285
60	1	0.0265 ± 0.0035
	1.5	0.012 ± 0.0030

Fuente: Elaboración propia (2011)

Los cálculos se realizaron según el modelo Newton, modelo difusional de tipo exponencial con un parámetro K

como se muestra:

$$\frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} = \exp(-K^1 t) \quad \Leftrightarrow \quad \ln\left(\ln\left(\frac{X_{wt}}{X_{w0}}\right)\right) = -\ln k + \ln t$$

Puede observarse que el modelo de Newton se ajusta mejor a los datos obtenidos por tener valores mínimos para su constante "K" tal como determino VEGA Y LEMUS, (2006) en su estudio de modelado de la Cinética de secado de la Papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*) y Simulación matemática del proceso de secado de la Gracilaria chilena (*Gracilaria chilensis*) obteniendo valores mínimos de constante "K" para el modelo de Page razón por la cual este se ajustó mejor a sus experimentos.

4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO CON AIRE FORZADO.

4.2.1. DISEÑO DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO

El diseño final del equipo se realizó en base a los cálculos obtenidos por ANCCO (1998) para la construcción de un secador solar; de forma que el equipo construido respondió plenamente en el secado, dentro de las diferentes partes que lo conforman se tiene:

a) Colector solar

Se logró construir un colector de 1.4 m de longitud por 0.6 m de ancho y 0.16m de alto, con un espacio de aire de estanco de 0.003mm, con un ducto del colector de 1,4m de largo por 0.6 m de ancho y 0.12m de alto; con cubierta de vidrio transparente, aislamiento de tecnopor de 0.001m de espesor, placa absorbente de acero galvanizado y una placa colectora de calamina. El alto del ducto de aire se encuentra dentro de los valores

recomendados por DÍAZ (1997) quien indica que este valor debe fluctuar entre 5 a 35 cm. Así mismo el espacio de aire de estanco de 0.003m esta por encima de los valores mínimos siendo este de 2.5 cm. lo que nos permite obtener una buena acumulación de aire caliente.

Tabla N° 23. Los niveles de calentamiento alcanzados en la placa absorbente del colector solar son los siguientes:

Hora	T Ducto
8:00	16
9:00	18
10:00	27
11:00	36
12:00	53
13:00	57
14:00	54
15:00	47
16:00	37

Fuente: Elaboración propia (2011)

La temperatura máxima alcanzada fue de 57 °C (12:00 a 13:00 horas) en días radiantes. En cuanto a instalación y orientación del colector solar se trabajo según ADEM y MEYNEL (1982) mencionan que el ángulo de la superficie del colector respecto a la horizontal debe ser igual a la suma de la latitud del lugar más 10 ó 15° para lograr la máxima eficiencia. Tomando en cuenta esta consideración se elevó el colector con un ángulo de 25° respecto a la horizontal.

B) Cámara de secado

Por su geometría y características se tiene un buen aprovechamiento y captación de radiación solar, permitiendo mantener temperaturas de 38 a 40°C y adecuado flujo de aire. Las bandejas para el secado,

son de bordes de aluminio mallas de acero galvanizado inoxidable y recubierto con malla de nylon para que haya una transferencia de calor uniforme en toda la geometría del producto. La capacidad de carga de la cámara es de 2 Kg aproximadamente de seta comestible *Boletus edulis* fresco. En la tabla N° 24 se presentan los valores de temperatura alcanzados por la cámara de secado en las diferentes horas de incidencia solar.

Tabla N° 24. Los niveles de calentamiento alcanzados en la placa absorbente en la cámara son los siguientes:

Hora	T cámara
8:00	23
9:00	25
10:00	35
11:00	33
12:00	38
13:00	37
14:00	35
15:00	36
16:00	32

Fuente: Elaboración propia (2011)

C) Ducto de salida de aire

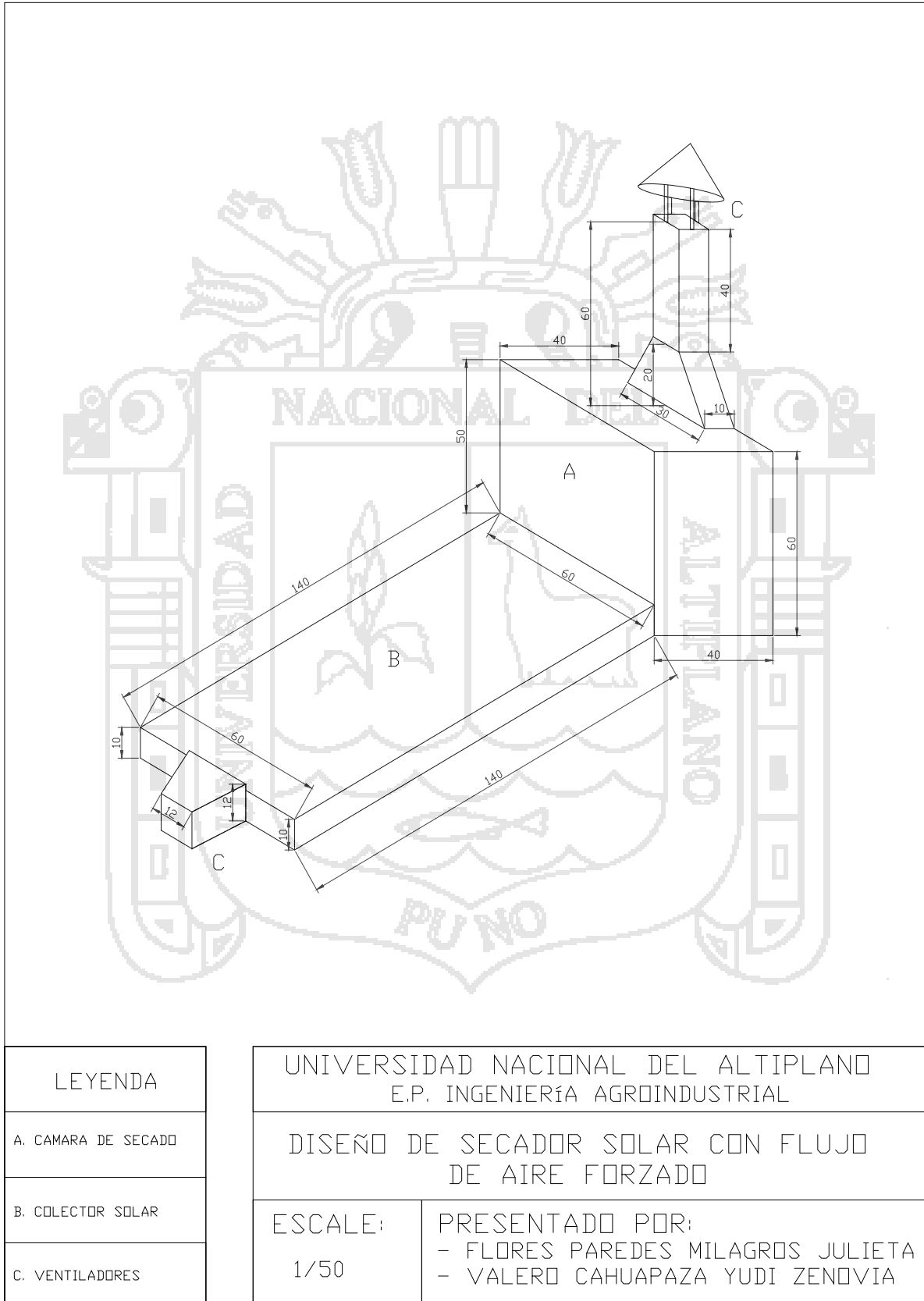
Es de tipo rectangular de 0.7 m de largo con una altura de 0.1 m que esta conectado a la cámara de secado para la salida del aire húmedo.

D) Otros elementos del secador

Utiliza un ventilador de corriente continua, el cual se caracteriza por tener un voltaje de operación de 220V y la velocidad máxima que genera es de 1.5 m/s para la absorción e impulsión de aire, ubicado en la parte inferior del colector solar; y otro ventilador el cual absorbe la humedad del interior de la cámara situado en la cima del ducto de circulación de aire.

En la figura N° 20 se muestra el plano del secador solar indirecto construido para el presente estudio.

Figura N° 20. Plano del secador solar Indirecto.



4.3. COMPARACIÓN ENTRE AMBOS SECADORES.

La cinética de deshidratado con energía convencional (secador lecho fijo con recirculación de aire caliente implementado con control adaptativo) y no convencional (Secador solar indirecto) es similar; la diferencia básica entre ambos equipos son los tiempos de secado y los costos de funcionamiento.

4.3.1 DEL SECADO

En el secador de lecho fijo con recirculación de aire caliente implementado con control adaptativo (Software Labview) se determinó que al cabo de 4 horas 30 minutos y con temperatura de 60 °C de un peso inicial de 200 g se reduce a un peso final de 10.33 g, a temperatura de 50 °C llega a peso final de 10.42 g al cabo de 5 horas y llega a un peso final de 10.411 g en 5 horas con 45 minutos a 40 °C mientras que en el secador solar indirecto en un tiempo de 6 horas a 38 °C se encontró que alcanzaba un peso constante de 11.3 g, lo cual coincide con el tiempo de secado de vegetales con contenido de humedad inicial de 92.11% y 92.2 % como el brócoli y coliflor estudiado por MALDONADO Y PACHECO (2003).

4.3.2 DEL ANÁLISIS PROXIMAL

En la tabla N° 25, se presenta los valores obtenidos en el análisis proximal para la seta.

Tabla N° 25. Resultados del análisis proximal de la seta comestible *Boletus edulis* fresca.

Componentes	Porcentaje (%)	
	Seta Fresca	Seta Seca
Humedad	95.33	4.67
Ceniza	0.24	5.13
Proteína	1.07	22.93
Grasa	0.30	6.39
Fibra	1.18	25.30
Carbohidratos	1.88	40.25

Fuente: Elaboración propia (2011)

En la tabla N° 25 se observa que el componente más abundante de la seta en estado fresco es el agua; el cuál es mas elevado que 87.1% valor reportado por CRESPO, (1994) cuya diferencia se debe al estado de madurez de la muestra con la que se trabajó ya que según LLORET (2007), la pulpa es dura en estadio joven y más esponjosa en la madurez. Seguidamente encontramos a los carbohidratos con un valor de 1.88%. Respecto a proteínas la muestra analizada contiene un promedio de 1.7%, su contenido de grasas es de 0.30 %, y en fibras 1.1%; por su parte CRESPO, (1994), reporta los siguientes valores para el *Boletus edulis*: Proteínas 5.40%, Grasa 0.40%, Fibra bruta 1.0% y Ceniza 1.00%; y BLANCO, (2005) reporta 3.8% para proteínas, 0.7% en grasas y 0.5% en fibra; las diferencias encontradas en los resultados reportados entre la literatura consultada y el presente trabajo se deben a que las muestras analizadas proceden de zonas diferentes, y han tenido cuidados culturales distintos, siendo nuestra materia prima silvestre y las estudiadas por los autores son setas cultivadas además ARDÓN, (2004), señala que el contenido de proteína para las setas se relaciona

significativamente con el contenido de nitrógeno del substrato. Se observa también un rico contenido en proteínas, fibra y carbohidratos; a lo que CHANG Y MILES, (1989) exponen que las setas frescas en general, tienen un contenido proteínico de alrededor dos veces más que los vegetales a excepción de las arvejas y ACOSTA *et al*, (1998) señala que en comparación con el contenido de proteínas de otros alimentos, el de los hongos en fresco es el doble que el de los vegetales y cuatro a doce veces mayor que el de las frutas, sin embargo, es inferior al de la carne, pescado, huevos y lácteos. Respecto al contenido de fibra ARDÓN, (2004) Sostiene que durante el desarrollo del micelio la seta utiliza mucha lignina, celulosa y hemicelulosa en la formación del corpóforo, y este material pasa a formar parte de la estructura fibrosa de la seta madura. Al comparar estos componentes nutricionales con los del champiñón (especie más representativa de setas comestibles) se tiene según VEDDER, (1996) para champiñón valores de: Agua 90%, Proteínas 3.5%, carbohidratos 4.0%, Grasas 0.3%. Existiendo gran similitud entre ambos y una mínima diferencia entre sus componentes que reafirma la elevada calidad nutricional y comercial de la seta comestible *Boletus edulis*.

En la tabla N° 26, se presentan diferencias en cuanto a composición químico proximal de la pulpa respecto al himenio; este último tiene mayor porcentaje en ceniza, proteína, grasa, fibra y carbohidratos.

Tabla N° 26. Resultados del análisis proximal de pulpa e himenio para *Boletus edulis*.

Componentes	Pulpa (%)	Himenio (%)
Humedad	95,68	92,00
Ceniza	0,39	0,69
Proteína	0,48	1,74
Grasa	0,16	0,59
Fibra	0,64	1,75
Carbohidratos	2,66	3,22

Fuente: Elaboración propia (2011)

Respecto a fibra, la seta en su etapa de crecimiento inicial obtiene lignina y celulosa; al madurar esta se concentra en sus partes más rígidas como el himenio, según FISHER, (1990) la celulosa es la que se encarga de proveer de fuerza y rigidez; se observó que el himenio tiene una estructura tubular caracterizada por ser fuerte y rígida, que no se deforma fácilmente. LLORET, (2007) indica que la pulpa tiene una estructura esponjosa; mediante este estudio se apreció que al ejercer presión sobre ella se deforma fácilmente expulsando el agua libre atrapada en sus tejidos.

En la tabla N° 27, se muestra los resultados del análisis proximal para los diferentes tratamientos.

Tabla N° 27. Análisis proximal de la seta a diferentes tratamientos.

V (m/s)	T (°C)	Análisis proximal en base seca						Fibra	Carbohidratos
		M.S.	Humedad	Ceniza	Proteína	Grasa			
1	40	90.35	9.65	6.37	20.39	8.81	15.50	39.28	
1.5	40	90.48	9.52	6.35	20.25	8.36	15.42	40.10	
1	50	91.81	8.19	6.58	19.59	8.46	15.87	41.31	
1.5	50	92.04	7.96	7.28	19.37	8.75	15.63	41.01	
1	60	92.05	7.95	7.05	19.37	8.68	16.01	40.94	
1.5	60	93.89	6.11	7.30	19.45	8.96	16.22	41.96	
S. solar I.		90.79	9.21	8.8	20.26	9.38	17.35	35.00	

Fuente: Elaboración propia (2011).

En la tabla N° 27 se observa mayores cambios en la humedad y proteína a temperaturas de 60 °C; según GEANKOPLIS, (1998) a altas temperaturas se obtiene un producto con menos porcentaje de humedad debido que a mayor temperatura la transferencia de masa (agua) es más rápida. En cuanto a proteína se observa que a 60 °C es ligeramente menor que los otros tratamientos, esto pudo deberse a que sufrió una ligera desnaturalización por la alta temperatura y largo tiempo de exposición, según FELLOWS, (1994), la deshidratación no cambia sustancialmente el valor biológico y la digestibilidad de las proteínas de la mayor parte de los alimentos; por lo que esta variación obtenida no altera la calidad nutricional de la seta. Conforme se eleva la temperatura en el experimento las grasas, fibra, ceniza y carbohidratos se van concentrando más, esto se debe a que se encuentran en su mayor parte en la materia seca del alimento. Para el secador solar se observa que los valores obtenidos para el análisis proximal se asemejan al tratamiento de 40 °C esto es debido a que la temperatura en la cámara del secador solar llegó a rangos de 38 - 40 °C observando que el secador solar conservó de cierta manera mejor la proteína presente en el producto.

En la tabla N° 28 se muestra el comparativo para los secadores en cuanto a tiempo, peso, contenido de humedad total, contenido de humedad de sólido y otros valores necesarios para realizar las curvas de secado y velocidad de secado.

Tabla N° 28. Pérdida de humedad en las dos formas de secado.

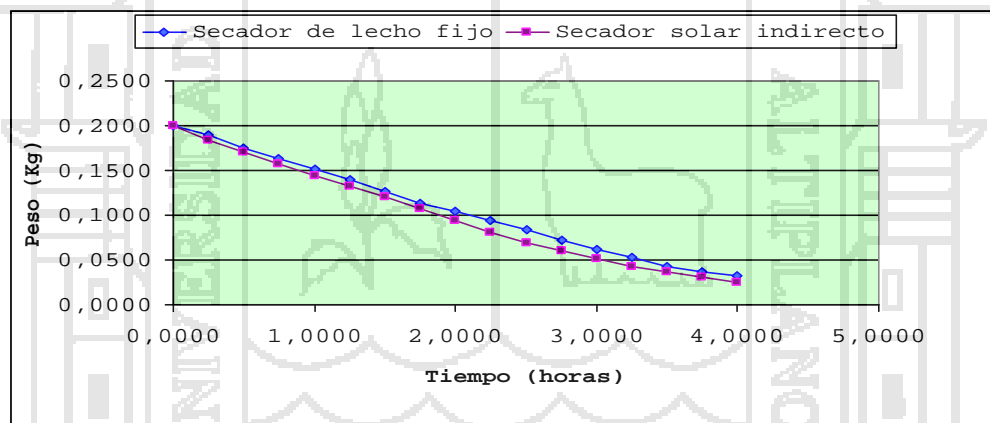
N° Datos	Tiempo (min)	Tiempo (h)	SECADO EN LECHO FIJO CON CONTROL ADAPTATIVO					SECADO SOLAR INDIRECTO				
			peso en Kg	Humedad total en Kg	X kg agua/kg s.s.	Valor Promedio	W Kg agua/h.m ²	peso en Kg	Humedad total en Kg	X kg agua/kg s.s.	Valor Promedio	W Kg agua/h.m ²
0	0	0.0000	0.2005	0.1906	19.2647			0.2007	0.1908	19.28359		
1	15	0.2500	0.1890	0.1791	18.1015	18.3079	0.4446	0.1843	0.1744	17.62613	18.45486	0.39559777
2	30	0.5000	0.1752	0.1653	16.7102	16.9271	0.4674	0.1706	0.1607	16.24155	16.93384	0.33046887
3	45	0.7500	0.1631	0.1532	15.4810	15.7028	0.4778	0.1572	0.1473	14.88729	15.56442	0.32323232
4	60	1.0000	0.1509	0.1410	14.2497	14.3860	0.2937	0.1447	0.1348	13.62399	14.25564	0.30152269
5	75	1.2500	0.1393	0.1294	13.0750	13.3117	0.5098	0.1319	0.1220	12.33037	12.97718	0.30875923
6	90	1.5000	0.1261	0.1162	11.7469	12.0046	0.5550	0.1201	0.1102	11.13781	11.73409	0.28463742
7	105	1.7500	0.1130	0.1031	10.4206	10.6495	0.4932	0.1071	0.0972	9.823976	10.48089	0.3135836
8	120	2.0000	0.1041	0.0942	9.5197	9.6782	0.3413	0.0937	0.0838	8.469716	9.146846	0.32323232
9	135	2.2500	0.0944	0.0845	8.5379	8.7375	0.4300	0.0807	0.0708	7.155881	7.812799	0.3135836
10	150	2.5000	0.0841	0.0742	7.4987	7.6467	0.3190	0.0697	0.0598	6.044175	6.600028	0.26533997
11	165	2.7500	0.0726	0.0627	6.3363	6.5199	0.3954	0.0605	0.0506	5.114384	5.57928	0.2219207
12	180	3.0000	0.0620	0.0521	5.2685	5.4596	0.4117	0.0515	0.0416	4.204807	4.659596	0.21709634
13	195	3.2500	0.0533	0.0434	4.3891	4.5217	0.2857	0.0431	0.0332	3.355867	3.780337	0.20262325
14	210	3.5000	0.0431	0.0332	3.3523	3.5027	0.3239	0.0363	0.0264	2.668631	3.012249	0.16402834
15	225	3.7500	0.0366	0.0267	2.6997	2.8247	0.2693	0.03148	0.0216	2.181501	2.425066	0.11626715
16	240	4.0000	0.0318	0.0219	2.2131	2.2763	0.1364	0.0243	0.0144	1.45586	1.818681	0.17319463

Fuente: Elaboración propia (2011).

4.3.2 EN CUANTO A TIEMPO DE SECADO

En el secado de lecho fijo automatizado se determinó que al cabo de 4 horas de un peso inicial de 200g se reduce a un peso de 31.8 g y en el secador solar indirecto con aire forzado al mismo tiempo se encontró que el peso se reduce a 24.30 g, estos resultados se presentan en la tabla N° 14 con los que se determinó las respectivas curvas de secado dónde observamos para ambos secadores que el comportamiento se ajusta a curvas características de secado. Las curvas de velocidad de secado para cada caso se presentan en las figuras N° 21 y 22.

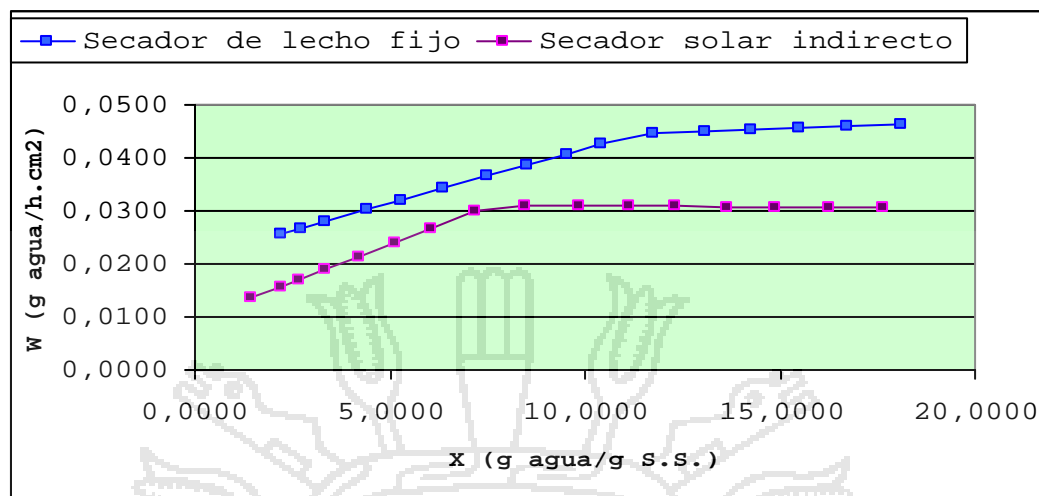
Figura N° 21. Curva de cinética de secado en los dos tipos de secadores.



Fuente: Elaboración propia (2011).

La cinética de secado utilizando diferentes fuentes de energía: solar y eléctrica es similar la diferencia básica es el peso y humedad del producto a un determinado tiempo; de acuerdo a lo mostrado en las curvas obtenidas.

Figura N° 22. Curva velocidad de secado en los dos tipos de secadores.



Fuente: Elaboración propia (2011).

La figura N° 22 indica que las condiciones ambientales afectan más al secador solar indirecto que al secador de lecho fijo en cuanto a velocidad de secado, porque en este último la operación es controlada por tener una fuente de energía más estable. El periodo constante para el secador de lecho fijo varía entre 0.4 y 0.5 g de agua/h.cm² más elevado respecto al secador solar indirecto cuya velocidad de secado constante se mantiene en 0.3 g de agua/h.cm² mostrando un periodo constante más prolongado. Si las condiciones ambientales se mantuvieran constantes el periodo velocidad constante sería similar en ambos equipos, pero la radiación solar aumenta o disminuye a medida que avanza el día afectando a la velocidad de secado debido a que la temperatura de la cámara solar es dependiente de las condiciones ambientales. MUÑOZ Y CABRERA, (1996) evidencia que el deshidratador solar elimina la menor cantidad de agua sin embargo es el de menor costo en el sentido energético y ambiental.

V. CONCLUSIONES

- 1.- Se observó una marcada influencia de la temperatura sobre la velocidad de secado evidenciándose para ambas velocidades de aire de secado mejores resultados a temperatura de 60°C; por presentar valores inferiores de humedad final de 0,0004 y 0.004 Kg de H₂O respecto a las demás temperaturas. Para la difusividad la mejor temperatura fue la de 50°C y 1,5 m/s de velocidad de aire ya que se obtuvo $2,612 \cdot 10^{-7}$ m²/s esto en geometría de láminas permitiendo la mayor migración de humedad respecto a los otros tratamientos. De los modelos propuestos para ajustar las curvas de cinética de secado resultó mejor el modelo de Newton por presentar valores mínimos para su constante K de 0.0065 ± 0.0005 .
- 2.- Se realizó el diseño y construcción de un secador solar indirecto, para un mayor aprovechamiento de la energía solar por el colector solar indirecto se realizó una elevación con una inclinación de 25 grados; con un ducto del colector de 1,4m de largo por 0,6 m de ancho por 0,12m de alto.
- 3.- En cuanto a la comparación de los dos secadores: el secador de lecho fijo permite obtener miles de datos registrados por su software; las diferencias en cuanto a humedad son pocas, su instalación resulta demasiado costosa, requiere un manejo cuidadoso y de personal capacitado para el manejo del mismo, mientras que el secador solar permite analizar pocos datos, conserva mejor la proteína, su costo de instalación es menor y su manejo es sencillo respecto al tiempo de secado fue mas eficiente el primer secador.

VI. RECOMENDACIONES

- 1.- Resulta de interés que estudios futuros evalúen el efecto de las condiciones de secado sobre las variaciones del color de la seta.
- 2.- Analizar el contenido de aminoácidos de la seta comestible *Boletus edulis* y otras variedades de setas en su base seca.
- 3.- En cuanto a los equipos de secado se recomienda realizar pruebas con diferentes productos de la región y optimizar los tiempos de secado para los mismos.
- 4.- Se recomienda adicionar a los secadores otros instrumentos de medición como un higrómetro para la obtención de valores más exactos para evaluar en detalle el proceso de secado.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Adem B., Meynel. 1982. Aplicaciones de la Energía Solar. Edit. Reverte S.A. Barcelona - España.
2. Adams J. 1991. Review: Enzyme inactivation during heat processing of food-stuffs. Int. J. Food Sci. Technol.
3. Agréda T., 2006. El recolector de setas en castilla y león. Edit. Proyecto Micología y Calidad. Chile
4. Aguilera J., Oppermann K., Sánchez F. 1987. Kinetics of browning of sultana grapes. J. Food Sci.
5. Alberto de Dios C. 1996. Secado de granos y secadoras. Edit. Trazos S.R.L. Santiago-Chile.
6. Almeida F. 2002. Secamen natural e artificial de vagens de algaroba. Revista Brasileira de Armazenamento. Brasil.
7. Amiot M., Forget F., Goupy P. 1996. Polyphenol, oxidation and colour: Progress in the chemistry of enzymatic and non-enzymatic derived product. Pág. 237-247. Edit. Herbapolonica.
8. Ancco T. 1998. Construcción de un Secador Solar con aire forzado y su evaluación en el secado de quinua (*Chenopodium quinoa willd*). Puno - Perú.
9. Ardón C. 2004. Evaluación de pericarpio de jacaranda (*Jacaranda mimosaeifolia*) y pasto estrella africana (*Cynodon plectostachyus*), para el cultivo artesanal del hongo ostra (*pleurotus ostreatus*, Ecosur -0112). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
10. Barahona S. 2008. Benchmarking del modelo Taiwanés en la producción y comercialización de hongos a mercados internacionales. Guatemala.

11. Barbanti D., Mastrocola D., Severini C. 1994. Air drying of plums: a comparison among twelve cultivars. *Sciences des aliments*.
12. Barbosa G.; Vega M., H. 2000. *Deshidratación de alimentos*. Edit. Acribia S. A. España.
13. Barrozo, M. ,Sartori D. y Freire, J. 1998. Secagem de grãos em camada fina: um estudo sobre as equações de secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Química*. Brasil.
14. Berna A., Rosselló C., Mulet A. y Catalá P. 1988. *Deshidratación de alimentos por energía solar. Descripción de un prototipo experimental y ensayos exploratorios con zanahorias*. España.
15. Bimbenet, JJ; Daudin, JD; Wolff, e. 1985. air drying kinetics of biological particles. In: *proceeding Fourth International Drying Symposium, Kyoto*. Washington, Dc. 178-185.
16. Blanco E. 2005. *Propiedades nutricionales de las setas*.
17. Bruin S. y Luyben K.1980. *Drying of food materials*. In *Advances in drying vol.I* edit. S. A. Mujumdar - New York.
18. Cañellas J., Rosselló C., Simal S., Soler L. y Mulet A. 1993. *Storage conditions affect quality of raisins*.
19. Carbonell J., Madarro A., Piñaga F., Peña J. 1984. *Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente. IV. Cinética de adsorción y desorción de agua en zanahorias*. Valencia - España.
20. Chang, S. Miles P.G. 1989. *Edible Mushrooms and their Cultivation*, Florida: CRC press.
21. Chenlo F. 2005. *Mathematical modelling of drying kinetics of chestnut (castanea sativa)*

- Mill.): influence of the natural shells.
Food Bioprod.J. (en prensa).
22. Choquehuayta A., Gutiérrez R. 2007. Diseño y construcción de un secador por convención forzada y su evaluación en el secado de carne de alpaca. Puno - Perú.
 23. Córdova M. 2006. Estadística Aplicada. Edit. Moshera S.R.L. Lima - Perú.
 24. Crank J. 1975. The mathematics of diffusion. 2da Edition. Clarendon Press. Gran Bretaña - Inglaterra.
 25. Crespo M. 1994. Cultivo Comercial de Champiñón. Edit. Albatros.
 26. Díaz A. 1987. Cálculo y Diseño de Colectores solares Para Calentamiento de Aire. División de Energías. Lima - Perú.
 27. Doymaz I. 2004. Drying kinetics of white mulberry. Journal of Food engineering. Chile.
 28. Espeleta E. 1992. Secado solar de hongos comestibles. Costa Rica.
 29. Espinoza R. 1981. Método y recomendaciones para diseño de secadores solares. UNI - Lima - Perú.
 30. Fellows P. 1994. Tecnología del procesado de los alimentos. Principios y prácticas. Edit. Acribia; Zaragoza, España.
 31. Foust, A., L. Wenzel, C. Clump, L. Maus y L. Andersen. 1997. Principios de operaciones unitarias. 2da Ed. Sexta Re impresión. Compañía editorial continental, S.A. de C.V. Mexico.
 32. Fuentes K. 1986. Experiencias en el secado solar de alimentos. Boletín informativo. Lima - Perú.

33. García-Reverter J., Bourne M. y Mulet A. 1994. Low temperature blanching affects firmness and rehydration of dried cauliflower florets. *J. Food Sci.*, 59, (6), 1181-1183.
34. Geankoplis Christie. 1999. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Editorial Continental. México.
35. Geankoplis Christie. 1998. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Editorial Continental. México.
36. González G. 2003. Vamos a buscar hongos. Edit. Junta de comunidades de Castilla. España.
37. Grünert H., Grünert, R. 1986. Guías de naturaleza Blume: SETAS. Edit. Blume S. A. Barcelona.
38. Grünert H.; Grünert, R. 1984. Guías de naturaleza Blume: setas. Edit. Blume S. A. Pág. 202. Barcelona.
39. Guerrero L. y Núñez, M. J. 1991. El proceso de secado en los alimentos. Alimentación, equipos y tecnología. España.
40. Guevara P. Américo. 1997. Conservación de alimentos. Edit. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima - Perú.
41. Gutiérrez H., de la Vara R. 2004. Análisis y Diseño de Experimentos. Edit. Mc Graw Hill. Mexico.
42. Haard N.F. 1998. Foods as cellular systems: impact on quality and preservation. En *Food storage stability*, ed. I.A. Taub and R.P. Singh. CRC Press, Boca Raton.
43. Hawlader M., Uddin M., Ho JC., Teng A. 1991. Drying characteristics of tomatoes. *J. Food Engng.* Valencia - España.
44. Holdsworth, S. D. 1986. Concentration and drying of food. Elsevier, London.

45. Honorato G., Oliveira E., Alsina O. y Magalhães M. 2009. Estudio del Proceso cinético del secado de Cefalotórax de Camarón. Univ. Fed. Rio Grande do Norte. Brasil.
46. Ibáñez V. 2003. Diseños Estadísticos. Edit. Universidad Nacional del Altiplano. Puno - Perú.
47. Ibarz A; Canovas. G.; Barbosa G. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Edit. Mundi- Prensa .España - Madrid.
48. Jaramillo Carmenza y Rodríguez Nelson. 2005. Cultivo de hongos comestibles del género sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. En: Boletín Técnico, CENICAFÉ, Manizales, N° 27 Pág. -56. Edit. Acribia.
49. Juárez E. 2002. Uso de la energía solar, en deshidratación de frutas y verduras. México.
50. Krokida M., Karathanos V., Maroulis Z., Marinoukouris D. 2003. Drying kinetics of some vegetables. Revista de Ingeniería de Alimentos.
51. Lloret B. 2007. Cuatro especies de Boletus. Escola Municipal del Treball. Barcelona - España.
52. Madarro A., Piñaga F., Carbonell J.V. y Peña J.L. 1981. Deshidratación de frutas y hortalizas con aire ambiente. I. Ensayos exploratorios con zanahorias. Rev. Agroquím. Tecnol. Aliment. España.
53. Maldonado R., Pacheco T. 2003. Curvas de deshidratación del brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *Itálica* Plenck) y coliflor (*Brassica oleracea* L. var. *Botritis*). Revista de la facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Vol. 20.

54. McCabe, WL; Smith, Jc; Harriott, p. 1991. Operaciones Unitarias en ingeniería química. 4 ed. mcgraw-Hill, Madrid.
55. Melquiádes Yendi L, Clara R. y Marta E. 2009. Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*daucus carota*) deshidratadas. México.
56. Mishkin M., Saguy I., Karel M. 1984. A dynamic test for kinetic models of chemical changes during processing: ascorbic acid degradation in dehydration of potatoes. J. Food Sci.
57. Miranda R., Fernández M, Carrillo C, Sánchez F. 2000. Setas de la región de Murcia. Edit. Consejería de Industria y Medio Ambiente, Dirección General del Medio Natural.- España.
58. Montes E., Torres R., Andrade D., Pérez O., Marimon J., Meza I. 2008. Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea rotundata*) en capa delgada. Bogota Colombia.
59. Murphy T. D. 1977. Design and analysis of industrial experiments. Chemical engineering
60. Muñoz D., Cabrera, G. 2006. El secado directo e indirecto de piña. Cauca - México.
61. Ocón y Tojo. 1986. Problemas de Ingeniería Química. Tomo V. Ediciones Aguilar. Madrid - España.
62. Olivas, R., Molina, F., Pérez A. y Ortega E., 1999. "Development of mathematical model for drying of Jalapeño peppers in batch process", Conference in Annual Meeting of American Institute of Chemical Engineers, New York, U.S.A.
63. Oliveira E., Machado A., Santos E., Oliveira J. 2010. Estudio del Secado de Anacardo (*Anacardium occidentale L.*) mediante Secador

- Solar de Radiación Directa. Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN. Brazil.
64. Parra, A., Hernández, J. 1997. Fisiología post cosecha de frutas y hortalizas., Colombia.
65. Peralta E. I. 1976 "Drying of staw mushroom caps. nsdb. technology journal".
66. Perez D., Guardamio, C., Mendieta, O., Medina, M. 2005. Cinetica de secado de hojas de Ramio (*Boehmeria nivea*) por flujo de aire caliente. Tarapoto - Perú.
67. Perry, R. 1973. Biblioteca del Ingeniero Químico, Mc-Graw- Hill, México, vol. 6
68. Perry R. y Chilton, C. 1981. Manual del Ingeniero Químico. Mc-Graw- Hill. Nueva York.
69. Pineda M., Chacón A., Cordero G. 2009. Efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (*Morus alba*). Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
70. Potter N. 1973. La ciencia de los alimentos. México. Edit. Edutex, 1ra Ed.
71. Prado M., Park K. Alonso F. 2000. Shrinkage of dates (*Phoenix dactilyfera*). Drying Technology.
72. Pruthi J., Gopalakrisman M, Bhat A. B. 1998. Estudios on the hydration of tropical paddy-straw mushroom (*Volvariella volvacea*). INDIA.
73. Rizvi, S.S.H. 1986 . "Thermodynamic properties of foods in dehydration. In Engineering Properties of Foods". M.A. Rao and S.S.H. Rizvi. Marcel Dekker, New York.
74. Rodríguez A. Nelson. Modelamiento y simulación matemática en el secado. Edit. Departamento

- de matemáticas y estadística de la Universidad de Tolima. Colombia
75. Rodríguez G. 2007. Cultivo de hongos comestibles. Boletín de fruticultura y diversificación. Argentina.
 76. Rugel J., Rodriguez E., Vargas E. 2010. Efectos de los procesos de deshidratación osmótica y secado con aire caliente sobre las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del cilantro (*Coriander sativium*). Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogota - Colombia.
 77. Sadler, M. 2003. Nutritional properties of edible fungi. Edit. Nutrition Foundation. Nutrition Bulletin.
 78. Saguy I. y Karel M. 2004. Modeling of quality deterioration during food processing and storage. Food Technol.
 79. San Juan N. 1998. Influencia de las condiciones de proceso y almacenamiento en la calidad del brócoli deshidratado. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
 80. Sapers, G.M. 1993. Browning of foods: control by sulfites, antioxidants and other means. Food Technol.
 81. Sharma S., Mulvaney S., Rizvi S. 2003. Ingeniería de alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Edit. Limusa Wiley. México.
 82. Sierra J., López T., García J. 2002. Las setas cultivadas. Edit. Rubin S. L. España.
 83. Simal S., Femenía A., Llull P. y Rosselló C. 2000. Dehydration of aloe vera: simulation of drying curves and evaluation of functional properties.

84. Singh R. P., Heldman D.R. 1998. Introducción a la ingeniería de los alimentos. Ed. Acribia. S.A. Zaragoza. España.
85. Talavera R., Chura E., Banegas M., Marca S., Sucari J. 2008. Buenas prácticas agrícolas en el cultivo de la quinua. Proyecto: Desarrollo de Capacidades de la Cadena Productiva de Quinua en la Región Puno. Puno-Perú.
86. Vega A., Andrés A. y Fito P. 2005. Modelado de la cinética de secado del Pimiento Rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo) Edit. Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Alimentos. Chile
87. Vega A., Tello C., Lemus R. 2007. Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*Gracilaria chilensis*). *Ingeniare: revista chilena de ingeniería*.
88. Vega A. Antonio y Lemus A. Roberto. 2006. Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*) *Ingeniare: revista chilena de información Tecnológica*. Chile.
89. Wang N. y Brennan I. 1992. Effect of water binding on the drying behaviour of potato. En *Drying 92*, ed. A.S. Mujumdar. Amsterdam.
90. Wedzicha B. 1987. Review: Chemistry of sulphur dioxide in vegetable dehydration. *Int.J. Food Sci. Technol.*



VIII. ANEXOS

ANEXO 1. DATOS DE VELOCIDAD DE SECADO DE LA SETA COMESTIBLE

Boletus edulis OBTENIDOS EN EL SECADOR DE LECHO

FIJO.

Cuadro N° 1. Datos registrados a: $V_1 = 1$ m/seg. y $T_1 = 40^\circ\text{C}$

Área bandeja = 0,11024		Peso S.S. = 0,0098947					
N° Datos	Tiempo (min)	Tiempo (h)	peso en Kg	Humedad total en Kg	X	Valor	W
					kg agua/kg s.s.	Promedio	Kg agua/h.m ²
0	0	0,000	0,200	0,191	19,258		
25	5	0,083	0,199	0,189	19,109	19,183	0,161
50	10	0,167	0,194	0,184	18,606	18,858	0,541
75	15	0,250	0,189	0,179	18,093	18,350	0,553
100	20	0,333	0,185	0,175	17,708	17,901	0,416
125	25	0,417	0,182	0,172	17,387	17,547	0,345
150	30	0,500	0,178	0,168	16,975	17,181	0,444
175	35	0,583	0,173	0,164	16,528	16,751	0,482
200	40	0,667	0,169	0,159	16,119	16,323	0,441
225	45	0,750	0,166	0,156	15,734	15,927	0,414
250	50	0,833	0,161	0,151	15,295	15,514	0,474
275	55	0,917	0,157	0,147	14,872	15,083	0,456
300	60	1,000	0,153	0,143	14,448	14,660	0,457
325	65	1,083	0,149	0,139	14,096	14,272	0,379
350	70	1,167	0,145	0,135	13,644	13,870	0,486
375	75	1,250	0,140	0,131	13,198	13,421	0,480
400	80	1,333	0,135	0,125	12,668	12,933	0,572
425	85	1,417	0,130	0,121	12,184	12,426	0,521
450	90	1,500	0,126	0,116	11,696	11,940	0,525
475	95	1,583	0,123	0,113	11,405	11,550	0,314
500	100	1,667	0,119	0,110	11,077	11,241	0,353
525	105	1,750	0,115	0,105	10,655	10,866	0,455
550	110	1,833	0,111	0,101	10,189	10,422	0,502
575	115	1,917	0,108	0,098	9,874	10,031	0,339
600	120	2,000	0,104	0,095	9,559	9,716	0,339
625	125	2,083	0,101	0,091	9,230	9,395	0,354
650	130	2,167	0,097	0,088	8,852	9,041	0,408
675	135	2,250	0,093	0,083	8,426	8,639	0,458
700	140	2,333	0,089	0,079	8,016	8,221	0,442
725	145	2,417	0,085	0,075	7,606	7,811	0,441
750	150	2,500	0,082	0,072	7,254	7,430	0,380
775	155	2,583	0,079	0,069	6,936	7,095	0,343
800	160	2,667	0,075	0,065	6,541	6,739	0,424
825	165	2,750	0,072	0,062	6,306	6,424	0,254
850	170	2,833	0,068	0,059	5,916	6,111	0,420
875	175	2,917	0,066	0,056	5,661	5,788	0,274
900	180	3,000	0,062	0,052	5,294	5,478	0,395
925	185	3,083	0,059	0,049	4,967	5,131	0,353
950	190	3,167	0,055	0,045	4,576	4,772	0,421
975	195	3,250	0,053	0,043	4,372	4,474	0,220
1000	200	3,333	0,050	0,040	4,074	4,223	0,321
1025	205	3,417	0,048	0,038	3,855	3,965	0,235
1050	210	3,500	0,045	0,035	3,559	3,707	0,319
1075	215	3,583	0,042	0,033	3,293	3,426	0,287
1100	220	3,667	0,041	0,031	3,162	3,228	0,141
1125	225	3,750	0,039	0,029	2,950	3,056	0,229
1150	230	3,833	0,038	0,028	2,867	2,908	0,090
1175	235	3,917	0,038	0,028	2,855	2,861	0,013
1200	240	4,000	0,037	0,027	2,753	2,804	0,110



Cuadro N° 2. Datos registrados a: $V_2 = 1,5 \text{ m/seg.}$ y $T_1=40^\circ\text{C}$

Área bandeja = 0,11024		Peso S.S. = 0,0098947					
N° Datos	Tiempo (min)	Tiempo (h)	peso en Kg	Humedad total en Kg	X	Valor Promedio	W
					kg agua/kg s.s.		Kg agua/h.m ²
0	0	0	0,201	0,191	19,265		
25	5	0,083	0,197	0,187	18,908	19,087	0,384
50	10	0,167	0,193	0,183	18,514	18,711	0,425
75	15	0,250	0,189	0,179	18,102	18,308	0,445
100	20	0,333	0,184	0,174	17,597	17,849	0,543
125	25	0,417	0,180	0,170	17,144	17,371	0,488
150	30	0,500	0,175	0,165	16,710	16,927	0,467
175	35	0,583	0,171	0,161	16,283	16,497	0,460
200	40	0,667	0,167	0,158	15,925	16,104	0,386
225	45	0,750	0,163	0,153	15,481	15,703	0,478
250	50	0,833	0,159	0,149	15,096	15,289	0,414
275	55	0,917	0,154	0,144	14,522	14,809	0,618
300	60	1,000	0,151	0,141	14,250	14,386	0,294
325	65	1,083	0,147	0,138	13,901	14,076	0,375
350	70	1,167	0,144	0,134	13,548	13,725	0,380
375	75	1,250	0,139	0,129	13,075	13,312	0,510
400	80	1,333	0,135	0,125	12,645	12,860	0,463
425	85	1,417	0,131	0,121	12,262	12,454	0,413
450	90	1,500	0,126	0,116	11,747	12,005	0,555
475	95	1,583	0,121	0,111	11,238	11,493	0,548
500	100	1,667	0,118	0,108	10,878	11,058	0,388
525	105	1,750	0,113	0,103	10,421	10,649	0,493
550	110	1,833	0,110	0,100	10,099	10,260	0,346
575	115	1,917	0,107	0,097	9,837	9,968	0,283
600	120	2,000	0,104	0,094	9,520	9,678	0,341
625	125	2,083	0,101	0,091	9,220	9,370	0,323
650	130	2,167	0,098	0,088	8,937	9,079	0,305
675	135	2,250	0,094	0,084	8,538	8,737	0,430
700	140	2,333	0,090	0,080	8,101	8,319	0,471
725	145	2,417	0,087	0,077	7,795	7,948	0,329
750	150	2,500	0,084	0,074	7,499	7,647	0,319
775	155	2,583	0,080	0,070	7,075	7,287	0,457
800	160	2,667	0,076	0,066	6,703	6,889	0,400
825	165	2,750	0,073	0,063	6,336	6,520	0,395
850	170	2,833	0,069	0,059	5,980	6,158	0,383
875	175	2,917	0,066	0,056	5,651	5,816	0,355
900	180	3,000	0,062	0,052	5,269	5,460	0,412
925	185	3,083	0,058	0,048	4,878	5,073	0,421
950	190	3,167	0,056	0,046	4,654	4,766	0,240
975	195	3,250	0,053	0,043	4,389	4,522	0,286
1000	200	3,333	0,049	0,039	3,989	4,189	0,431
1025	205	3,417	0,046	0,036	3,653	3,821	0,361
1050	210	3,500	0,043	0,033	3,352	3,503	0,324
1075	215	3,583	0,041	0,031	3,096	3,224	0,276
1100	220	3,667	0,039	0,029	2,950	3,023	0,157
1125	225	3,750	0,037	0,027	2,700	2,825	0,269
1150	230	3,833	0,034	0,024	2,473	2,586	0,244
1175	235	3,917	0,033	0,023	2,340	2,406	0,144
1200	240	4,000	0,032	0,022	2,213	2,276	0,136

Cuadro N° 3. Datos registrados a: $V_1 = 1 \text{ m/seg.}$ y $T_2 = 50^\circ\text{C}$

Área bandeja = 0,11024		Peso S.S. = 0,0098947					
N° Datos	Tiempo (min)	Tiempo (h)	peso en Kg	Humedad total en Kg	X kg agua/kg s.s.	Valor Promedio	W Kg agua/h.m ²
0	0	0,0000	0,2003	0,1905	19,2479		
25	5	0,0833	0,1969	0,1870	18,9014	19,0746	0,3732
50	10	0,1667	0,1944	0,1845	18,6436	18,7725	0,4409
75	15	0,2500	0,1895	0,1796	18,1473	18,3955	0,5345
100	20	0,3333	0,1841	0,1742	17,6098	17,8786	0,5790
125	25	0,4167	0,1794	0,1696	17,1355	17,3727	0,5108
150	30	0,5000	0,1745	0,1646	16,6313	16,8834	0,5431
175	35	0,5833	0,1695	0,1596	16,1306	16,3809	0,5392
200	40	0,6667	0,1652	0,1553	15,6914	15,9110	0,4731
225	45	0,7500	0,1614	0,1515	15,3067	15,4990	0,4143
250	50	0,8333	0,1566	0,1467	14,8299	15,0683	0,5136
275	55	0,9167	0,1514	0,1415	14,2970	14,5634	0,5739
300	60	1,0000	0,1457	0,1358	13,7279	14,0125	0,6130
325	65	1,0833	0,1404	0,1305	13,1868	13,4573	0,5828
350	70	1,1667	0,1360	0,1261	12,7424	12,9646	0,4786
375	75	1,2500	0,1319	0,1220	12,3299	12,5362	0,4443
400	80	1,3333	0,1261	0,1162	11,7467	12,0383	0,6282
425	85	1,4167	0,1217	0,1118	11,2985	11,5226	0,4827
450	90	1,5000	0,1170	0,1071	10,8272	11,0629	0,5076
475	95	1,5833	0,1123	0,1024	10,3508	10,5890	0,5132
500	100	1,6667	0,1070	0,0971	9,8090	10,0799	0,5835
525	105	1,7500	0,1028	0,0929	9,3937	9,6014	0,4473
550	110	1,8333	0,0989	0,0890	8,9927	9,1932	0,4319
575	115	1,9167	0,0941	0,0842	8,5123	8,7525	0,5174
600	120	2,0000	0,0896	0,0797	8,0548	8,2836	0,4928
625	125	2,0833	0,0854	0,0755	7,6318	7,8433	0,4556
650	130	2,1667	0,0811	0,0712	7,1924	7,4121	0,4733
675	135	2,2500	0,0771	0,0672	6,7910	6,9917	0,4323
700	140	2,3333	0,0735	0,0636	6,4300	6,6105	0,3888
725	145	2,4167	0,0698	0,0599	6,0500	6,2400	0,4093
750	150	2,5000	0,0664	0,0566	5,7155	5,8828	0,3603
775	155	2,5833	0,0627	0,0528	5,3320	5,5238	0,4130
800	160	2,6667	0,0599	0,0500	5,0547	5,1934	0,2987
825	165	2,7500	0,0569	0,0470	4,7482	4,9014	0,3302
850	170	2,8333	0,0538	0,0439	4,4380	4,5931	0,3340
875	175	2,9167	0,0499	0,0400	4,0383	4,2382	0,4306
900	180	3,0000	0,0474	0,0375	3,7908	3,9145	0,2666
925	185	3,0833	0,0459	0,0360	3,6378	3,7143	0,1648
950	190	3,1667	0,0440	0,0341	3,4448	3,5413	0,2079
975	195	3,2500	0,0400	0,0301	3,0406	3,2427	0,4353
1000	200	3,3333	0,0370	0,0271	2,7418	2,8912	0,3219
1025	205	3,4167	0,0358	0,0259	2,6216	2,6817	0,1294
1050	210	3,5000	0,0341	0,0242	2,4457	2,5337	0,1894
1075	215	3,5833	0,0318	0,0219	2,2119	2,3288	0,2519
1100	220	3,6667	0,0293	0,0194	1,9591	2,0855	0,2723
1125	225	3,7500	0,0276	0,0177	1,7914	1,8752	0,1806
1150	230	3,8333	0,0253	0,0154	1,5529	1,6721	0,2569
1175	235	3,9167	0,0232	0,0133	1,3487	1,4508	0,2199
1200	240	4,0000	0,0219	0,0120	1,2098	1,2792	0,1496



Cuadro N° 4. Datos registrados a: $V_2 = 1.5$ m/seg. y $T_2 = 50^\circ\text{C}$

Área bandeja = 0,11024		Peso S.S. = 0,0098947					
N° Datos	Tiempo (min)	Tiempo (h)	peso en Kg	Humedad total en Kg	X	Valor Promedio	W
					kg agua/kg s.s.		Kg agua/h.m ²
0	0	0,0000	0,2001	0,1902	19,2256		
25	5	0,0833	0,1966	0,1867	18,8665	19,0460	0,3868
50	10	0,1667	0,1916	0,1817	18,3665	18,6165	0,5385
75	15	0,2500	0,1846	0,1747	17,6563	18,0114	0,7649
100	20	0,3333	0,1805	0,1706	17,2422	17,4493	0,4460
125	25	0,4167	0,1762	0,1663	16,8069	17,0245	0,4689
150	30	0,5000	0,1707	0,1608	16,2507	16,5288	0,5991
175	35	0,5833	0,1645	0,1546	15,6248	15,9377	0,6741
200	40	0,6667	0,1591	0,1492	15,0794	15,3521	0,5874
225	45	0,7500	0,1543	0,1444	14,5928	14,8361	0,5241
250	50	0,8333	0,1493	0,1394	14,0842	14,3385	0,5478
275	55	0,9167	0,1441	0,1342	13,5614	13,8228	0,5631
300	60	1,0000	0,1379	0,1280	12,9321	13,2467	0,6778
325	65	1,0833	0,1326	0,1227	12,3978	12,6650	0,5755
350	70	1,1667	0,1268	0,1170	11,8199	12,1089	0,6224
375	75	1,2500	0,1218	0,1119	11,3081	11,5640	0,5513
400	80	1,3333	0,1165	0,1066	10,7769	11,0425	0,5721
425	85	1,4167	0,1113	0,1014	10,2524	10,5147	0,5649
450	90	1,5000	0,1058	0,0959	9,6925	9,9725	0,6031
475	95	1,5833	0,1002	0,0903	9,1311	9,4118	0,6046
500	100	1,6667	0,0943	0,0844	8,5337	8,8324	0,6435
525	105	1,7500	0,0882	0,0783	7,9137	8,2237	0,6678
550	110	1,8333	0,0831	0,0732	7,3980	7,6558	0,5554
575	115	1,9167	0,0784	0,0685	6,9279	7,1629	0,5064
600	120	2,0000	0,0734	0,0635	6,4140	6,6709	0,5535
625	125	2,0833	0,0693	0,0594	6,0047	6,2094	0,4408
650	130	2,1667	0,0657	0,0558	5,6416	5,8232	0,3912
675	135	2,2500	0,0614	0,0515	5,2022	5,4219	0,4732
700	140	2,3333	0,0581	0,0482	4,8708	5,0365	0,3569
725	145	2,4167	0,0557	0,0458	4,6273	4,7491	0,2622
750	150	2,5000	0,0541	0,0442	4,4641	4,5457	0,1758
775	155	2,5833	0,0533	0,0434	4,3881	4,4261	0,0818
800	160	2,6667	0,0503	0,0404	4,0824	4,2353	0,3293
825	165	2,7500	0,0463	0,0364	3,6774	3,8799	0,4363
850	170	2,8333	0,0423	0,0324	3,2767	3,4770	0,4315
875	175	2,9167	0,0385	0,0286	2,8921	3,0844	0,4142
900	180	3,0000	0,0354	0,0255	2,5745	2,7333	0,3421
925	185	3,0833	0,0342	0,0243	2,4534	2,5139	0,1305
950	190	3,1667	0,0341	0,0242	2,4472	2,4503	0,0066
975	195	3,2500	0,0340	0,0242	2,4412	2,4442	0,0065
1000	200	3,3333	0,0319	0,0220	2,2260	2,3336	0,2318
1025	205	3,4167	0,0302	0,0203	2,0518	2,1389	0,1876
1050	210	3,5000	0,0299	0,0200	2,0185	2,0352	0,0358
1075	215	3,5833	0,0298	0,0199	2,0095	2,0140	0,0097
1100	220	3,6667	0,0249	0,0150	1,5152	1,7623	0,5325
1125	225	3,7500	0,0228	0,0129	1,3039	1,4095	0,2275
1150	230	3,8333	0,0221	0,0122	1,2302	1,2670	0,0794
1175	235	3,9167	0,0217	0,0118	1,1905	1,2103	0,0428
1200	240	4,0000	0,0214	0,0115	1,1627	1,1766	0,0300

Cuadro N° 5. Datos registrados a: $V_1 = 1 \text{ m/seg.}$ y $T_3 = 60^\circ\text{C}$

Área bandeja = 0,11024 Peso S.S. = 0,0098947

N° Datos	Tiempo (min)	Tiempo (h)	peso (Kg)	Humedad total (Kg)	X kg agua/kg s.s.	Valor Promedio	W Kg agua/h.m ²
0	0	0,167	0,200	0,190	19,206		
25	5	0,250	0,196	0,186	18,824	19,015	0,412
50	10	0,333	0,192	0,182	18,363	18,593	0,496
75	15	0,417	0,188	0,178	17,996	18,179	0,395
100	20	0,500	0,185	0,175	17,724	17,860	0,293
125	25	0,583	0,175	0,165	16,683	17,204	1,122
150	30	0,667	0,167	0,157	15,910	16,297	0,832
175	35	0,750	0,159	0,149	15,039	15,475	0,939
200	40	0,833	0,154	0,144	14,538	14,788	0,539
225	45	0,917	0,148	0,138	13,968	14,253	0,614
250	50	1,000	0,141	0,131	13,246	13,607	0,778
275	55	1,083	0,134	0,124	12,540	12,893	0,760
300	60	1,167	0,128	0,118	11,898	12,219	0,692
325	65	1,250	0,123	0,113	11,448	11,673	0,485
350	70	1,333	0,119	0,110	11,076	11,262	0,401
375	75	1,417	0,115	0,105	10,581	10,828	0,534
400	80	1,500	0,109	0,099	10,031	10,306	0,592
425	85	1,583	0,103	0,093	9,436	9,734	0,640
450	90	1,667	0,098	0,088	8,892	9,164	0,586
475	95	1,750	0,093	0,083	8,437	8,665	0,490
500	100	1,833	0,089	0,079	7,999	8,218	0,472
525	105	1,917	0,084	0,074	7,498	7,748	0,540
550	110	2,000	0,079	0,069	6,981	7,239	0,557
575	115	2,083	0,074	0,064	6,501	6,741	0,517
600	120	2,167	0,069	0,060	6,014	6,258	0,525
625	125	2,250	0,065	0,055	5,606	5,810	0,440
650	130	2,333	0,062	0,052	5,226	5,416	0,409
675	135	2,417	0,058	0,048	4,823	5,024	0,434
700	140	2,500	0,054	0,044	4,476	4,649	0,374
725	145	2,583	0,051	0,041	4,161	4,318	0,339
750	150	2,667	0,048	0,038	3,833	3,997	0,353
775	155	2,750	0,045	0,035	3,547	3,690	0,308
800	160	2,833	0,042	0,032	3,283	3,415	0,285
825	165	2,917	0,040	0,030	3,019	3,151	0,284
850	170	3,000	0,037	0,027	2,777	2,898	0,260
875	175	3,083	0,035	0,025	2,561	2,669	0,233
900	180	3,167	0,033	0,023	2,317	2,439	0,263
925	185	3,250	0,031	0,021	2,091	2,204	0,244
950	190	3,333	0,029	0,019	1,904	1,997	0,202
975	195	3,417	0,028	0,018	1,838	1,871	0,071
1000	200	3,500	0,026	0,017	1,677	1,757	0,173
1025	205	3,583	0,025	0,015	1,494	1,586	0,197
1050	210	3,667	0,022	0,012	1,217	1,355	0,298
1075	215	3,750	0,020	0,010	1,021	1,119	0,211
1100	220	3,833	0,019	0,009	0,874	0,947	0,158
1125	225	3,917	0,017	0,007	0,733	0,804	0,152
1150	230	4,000	0,016	0,006	0,579	0,656	0,167
1175	235	4,083	0,015	0,005	0,471	0,525	0,116
1200	240	4,167	0,013	0,004	0,361	0,416	0,118



Cuadro N° 6. Datos registrados a: $V_2 = 1.5 \text{ m/seg.}$ y $T_3=60^\circ\text{C}$

Área bandeja = 0,11024		Peso S.S. = 0,0098947					
N° Datos	Tiempo (min)	Tiempo (h)	peso (Kg)	Humedad total (Kg)	X	Valor Promedio	W Kg agua/h.m ²
					kg agua/kg S.S.		
0	0	0,0000	0,1999	0,1900	19,2047		
25	5	0,0833	0,1943	0,1844	18,6367	18,9207	0,6118
50	10	0,1667	0,1890	0,1791	18,1013	18,3690	0,5766
75	15	0,2500	0,1801	0,1702	17,2010	17,6511	0,9697
100	20	0,3333	0,1740	0,1641	16,5857	16,8933	0,6627
125	25	0,4167	0,1685	0,1586	16,0291	16,3074	0,5995
150	30	0,5000	0,1634	0,1535	15,5149	15,7720	0,5538
175	35	0,5833	0,1583	0,1484	14,9970	15,2560	0,5578
200	40	0,6667	0,1527	0,1428	14,4278	14,7124	0,6131
225	45	0,7500	0,1468	0,1369	13,8343	14,1310	0,6393
250	50	0,8333	0,1409	0,1310	13,2353	13,5348	0,6451
275	55	0,9167	0,1346	0,1247	12,5999	12,9176	0,6843
300	60	1,0000	0,1298	0,1200	12,1231	12,3615	0,5136
325	65	1,0833	0,1248	0,1149	11,6113	11,8672	0,5513
350	70	1,1667	0,1185	0,1086	10,9791	11,2952	0,6809
375	75	1,2500	0,1132	0,1033	10,4445	10,7118	0,5758
400	80	1,3333	0,1075	0,0976	9,8643	10,1544	0,6248
425	85	1,4167	0,1006	0,0907	9,1665	9,5154	0,7516
450	90	1,5000	0,0943	0,0844	8,5337	8,8501	0,6816
475	95	1,5833	0,0882	0,0783	7,9137	8,2237	0,6678
500	100	1,6667	0,0831	0,0732	7,3980	7,6558	0,5554
525	105	1,7500	0,0784	0,0685	6,9279	7,1629	0,5064
550	110	1,8333	0,0734	0,0635	6,4140	6,6709	0,5535
575	115	1,9167	0,0693	0,0594	6,0047	6,2094	0,4408
600	120	2,0000	0,0657	0,0558	5,6416	5,8232	0,3912
625	125	2,0833	0,0614	0,0515	5,2022	5,4219	0,4732
650	130	2,1667	0,0581	0,0482	4,8708	5,0365	0,3569
675	135	2,2500	0,0557	0,0458	4,6273	4,7491	0,2622
700	140	2,3333	0,0541	0,0442	4,4641	4,5457	0,1758
725	145	2,4167	0,0533	0,0434	4,3881	4,4261	0,0818
750	150	2,5000	0,0493	0,0394	3,9814	4,1847	0,4381
775	155	2,5833	0,0463	0,0364	3,6774	3,8294	0,3274
800	160	2,6667	0,0423	0,0324	3,2767	3,4770	0,4315
825	165	2,7500	0,0375	0,0276	2,7911	3,0339	0,5231
850	170	2,8333	0,0344	0,0245	2,4810	2,6360	0,3339
875	175	2,9167	0,0311	0,0212	2,1404	2,3107	0,3669
900	180	3,0000	0,0288	0,0189	1,9084	2,0244	0,2498
925	185	3,0833	0,0249	0,0150	1,5152	1,7118	0,4236
950	190	3,1667	0,0218	0,0119	1,2028	1,3590	0,3364
975	195	3,2500	0,0201	0,0102	1,0280	1,1154	0,1883
1000	200	3,3333	0,0187	0,0088	0,8941	0,9611	0,1443
1025	205	3,4167	0,0166	0,0067	0,6769	0,7855	0,2339
1050	210	3,5000	0,0148	0,0049	0,4915	0,5842	0,1996
1075	215	3,5833	0,0137	0,0038	0,3818	0,4367	0,1181
1100	220	3,6667	0,0120	0,0021	0,2169	0,2994	0,1777
1125	225	3,7500	0,0110	0,0011	0,1145	0,1657	0,1103
1150	230	3,8333	0,0109	0,0010	0,1044	0,1094	0,0109
1175	235	3,9167	0,0105	0,0007	0,0660	0,0852	0,0414
1200	240	4,0000	0,0103	0,0004	0,0441	0,0551	0,0235

ANEXO 2. CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.

Figura N° 1. Curva de velocidad de secado sin ajustar para: $V_1 = 1 \text{ m/seg.}$ y $T_1 = 40 \text{ °C}$

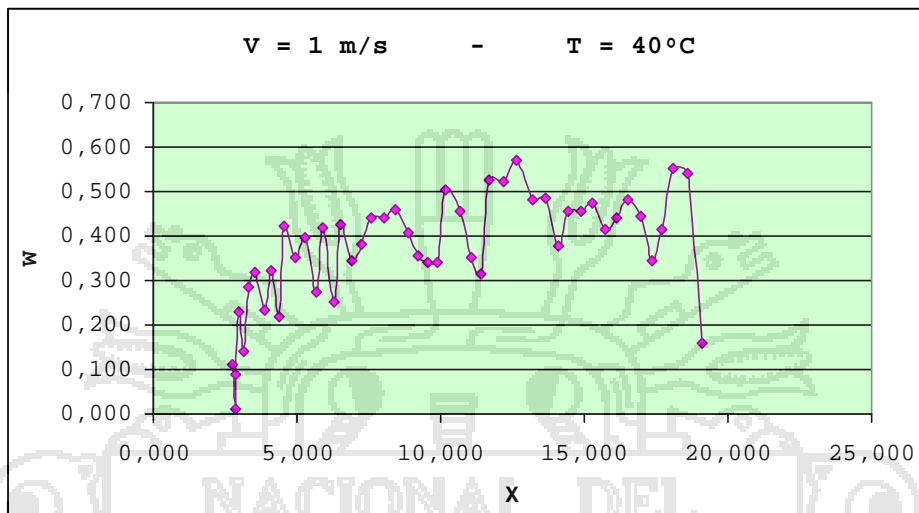


Figura N° 2. Curva de velocidad de secado ajustada por periodos para: $V_1 = 1 \text{ m/seg.}$ y $T_1 = 40 \text{ °C}$

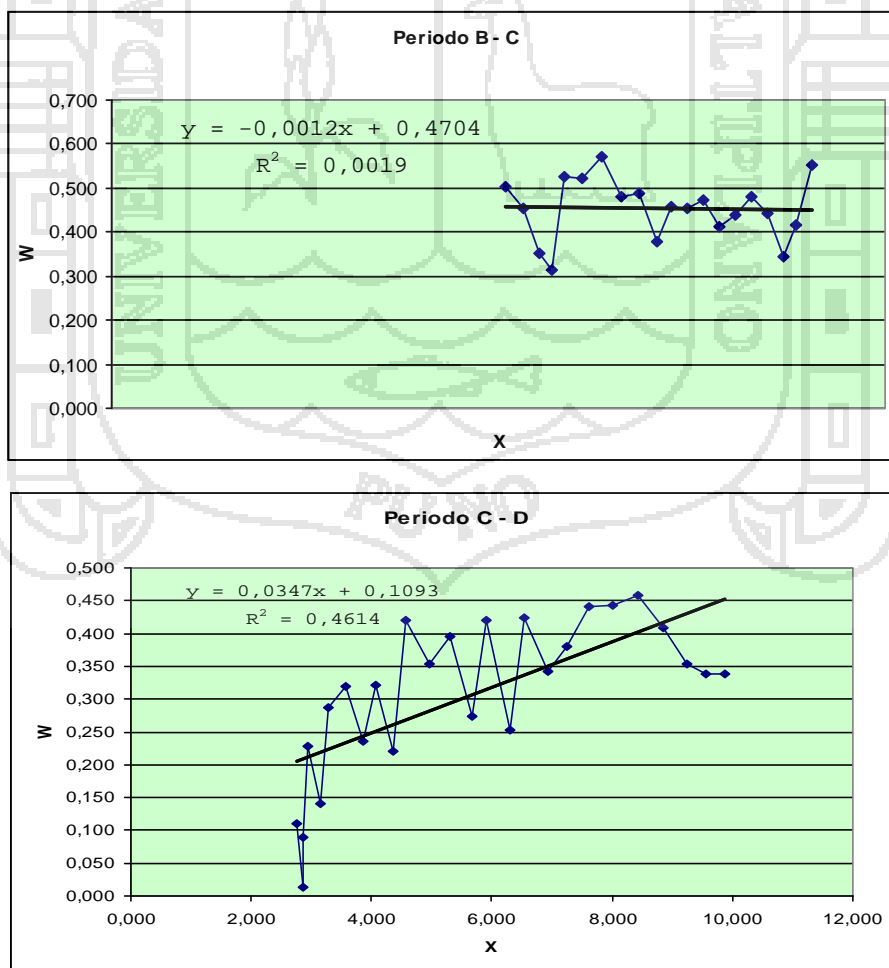


Figura N° 3. Curva de velocidad de secado sin ajustar para: $V_2 = 1,5 \text{ m/seg.}$ y $T_1=40^\circ\text{C}$

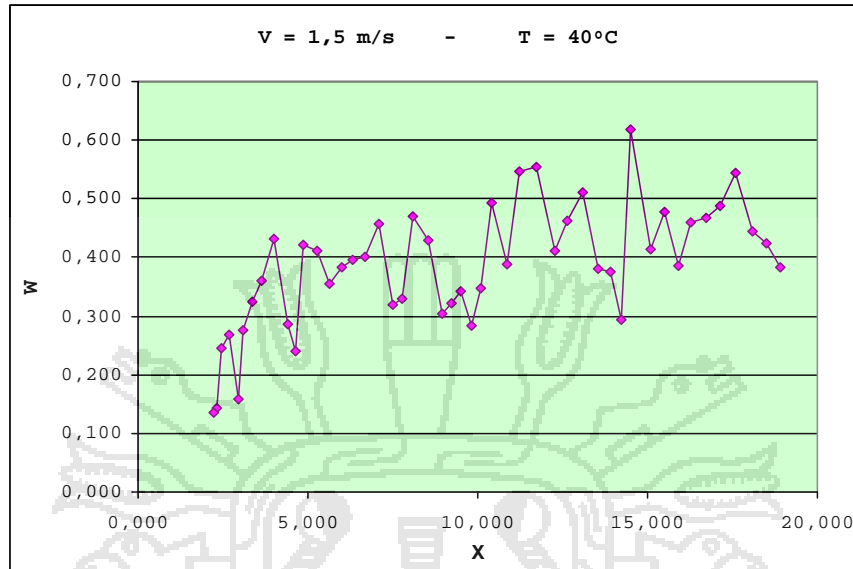


Figura N° 4. Curva de velocidad de secado ajustada por periodos para: $V_1= 1.5 \text{ m/seg.}$ y $T_1= 40^\circ\text{C}$

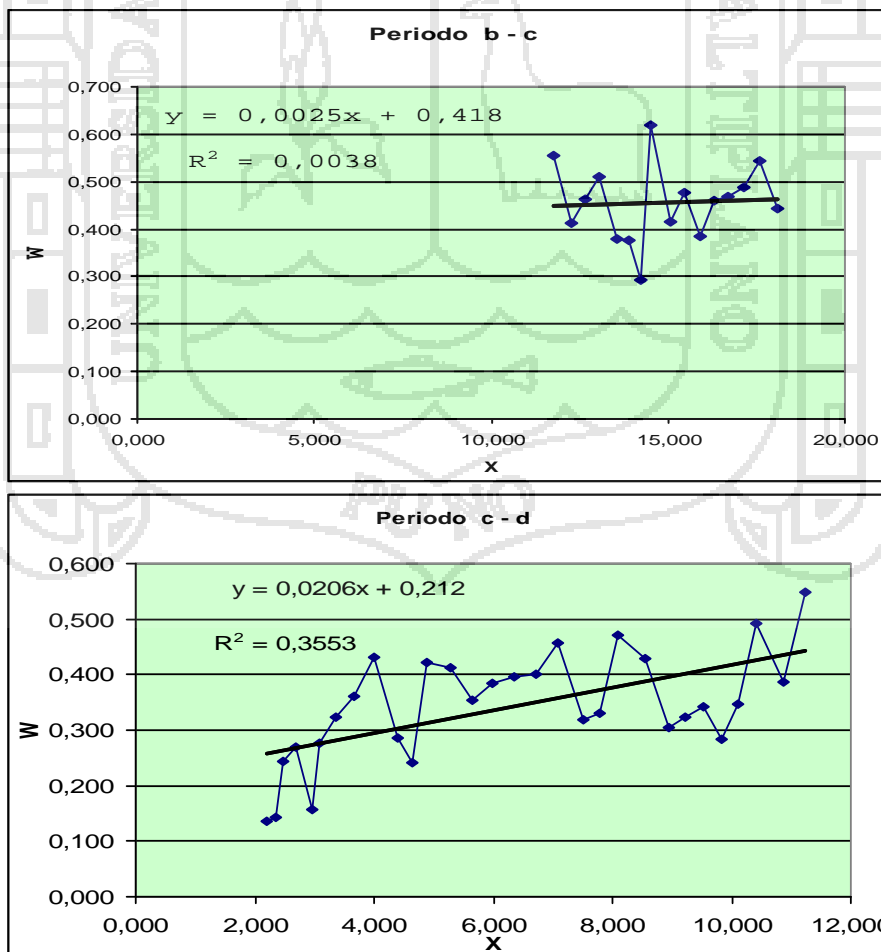


Figura N° 5. Curva de velocidad de secado sin ajustar para: $V_1 = 1 \text{ m/seg.}$ y $T_2 = 50^\circ\text{C}$

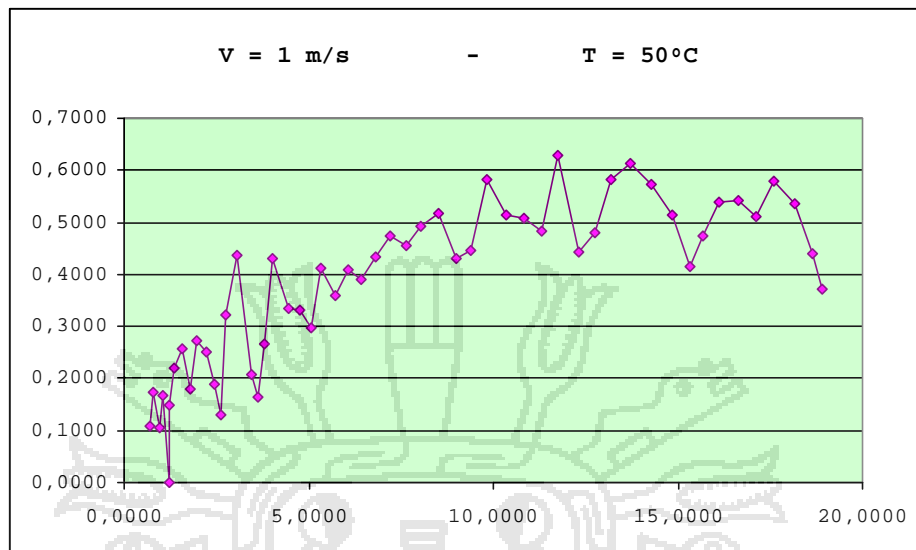


Figura N° 6. Curva de velocidad de secado ajustada por periodos para: $V_1 = 1 \text{ m/seg.}$ y $T_1 = 50^\circ\text{C}$

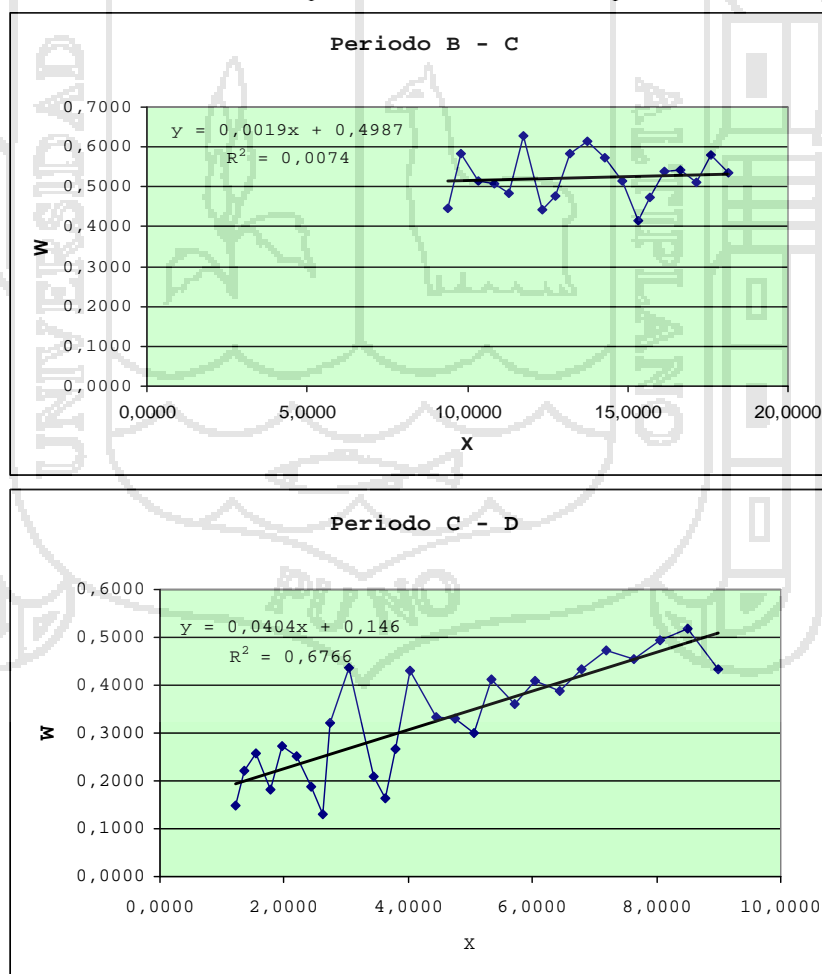


Figura N° 7. Curva de velocidad de secado sin ajustar para: $V_2 = 1.5 \text{ m/seg}$ y $T_2 = 50^\circ\text{C}$

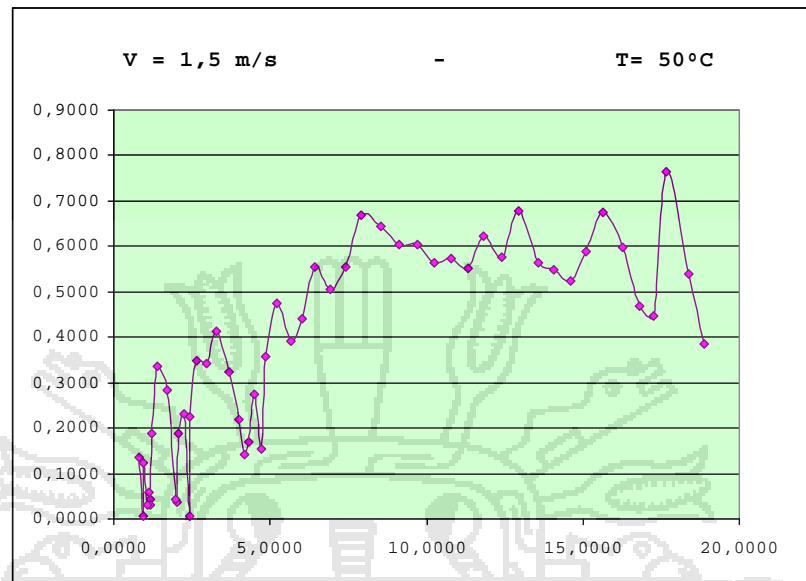


Figura N° 8. Curva de velocidad de secado ajustada por periodos para: $V_1 = 1.5 \text{ m/seg}$ y $T_1 = 50^\circ\text{C}$

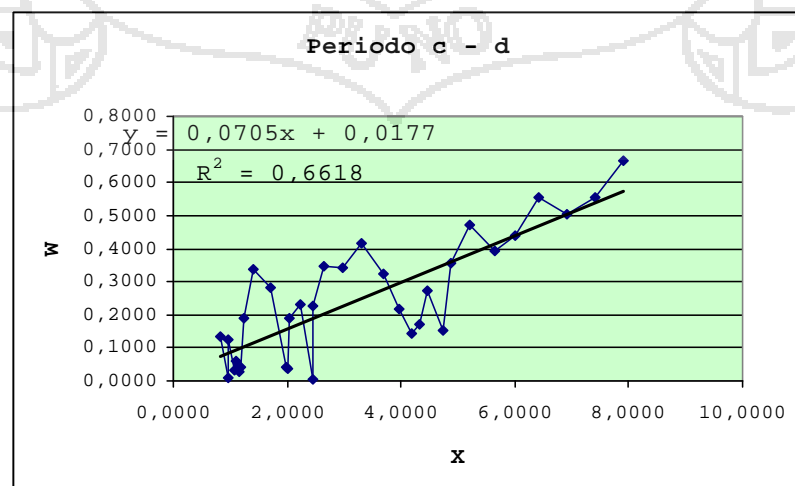
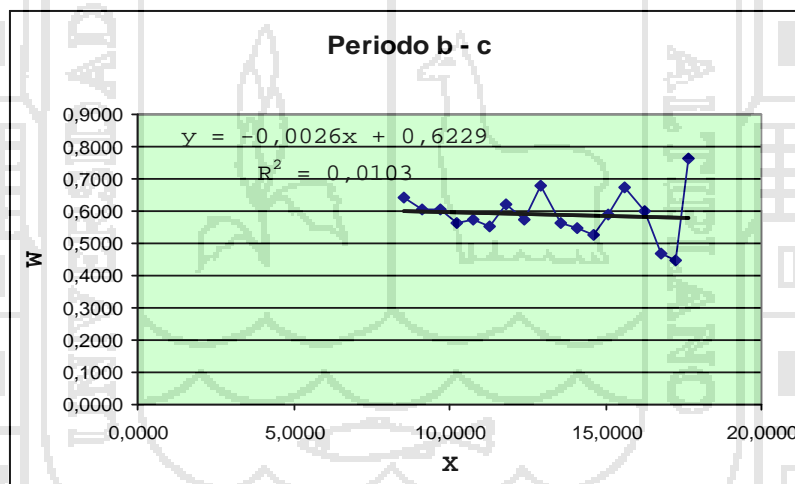


Figura N° 9. Curva de velocidad de secado sin ajustar para:

$$V_1 = 1 \text{ m/seg. } \text{ y } T_3 = 60^\circ\text{C}$$

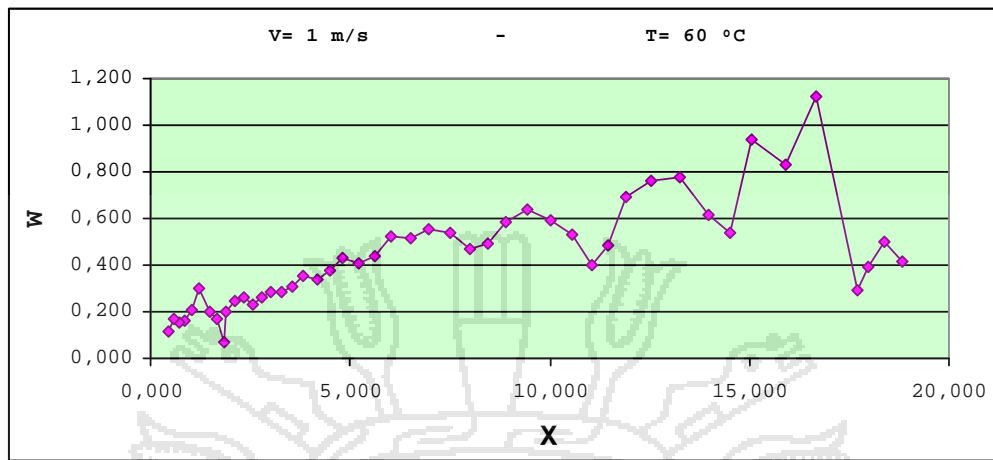


Figura N° 10. Curva de velocidad de secado ajustada por periodos para: $V_1 = 1 \text{ m/seg. } \text{ y } T_1 = 60^\circ\text{C}$

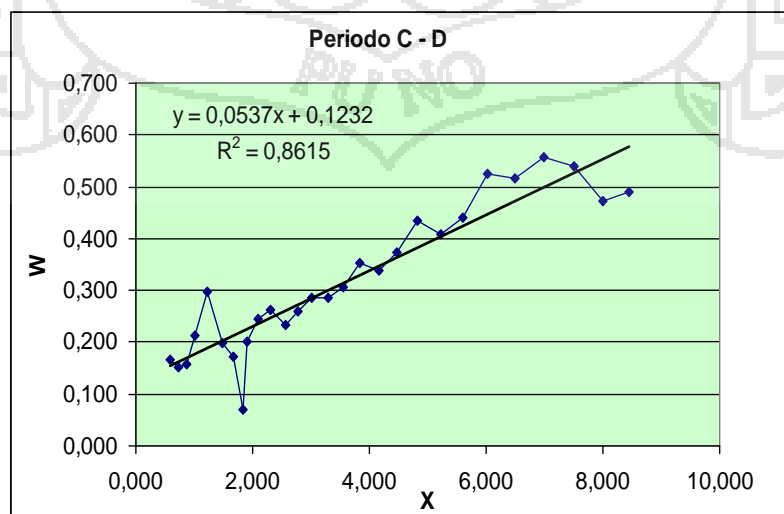
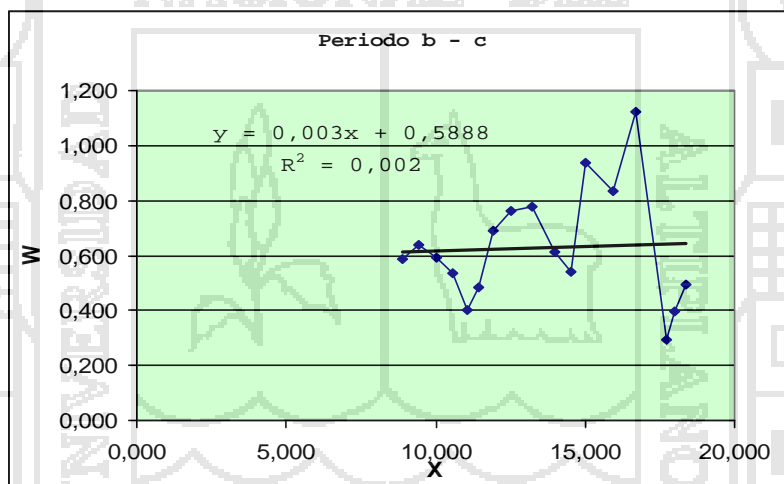


Figura N° 11. Curva de velocidad de secado sin ajustar para:
 $V_2 = 1.5 \text{ m/seg.}$ y $T_3 = 60^\circ\text{C}$

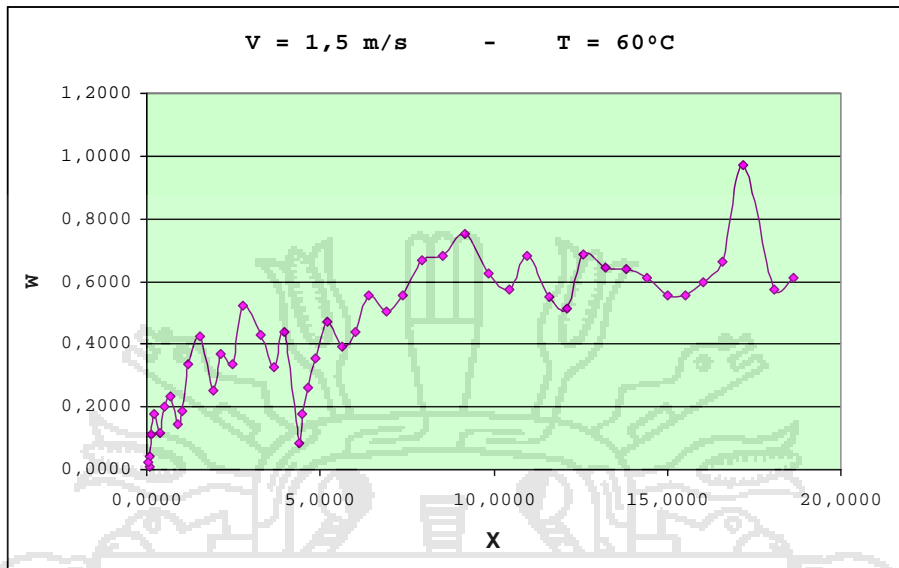
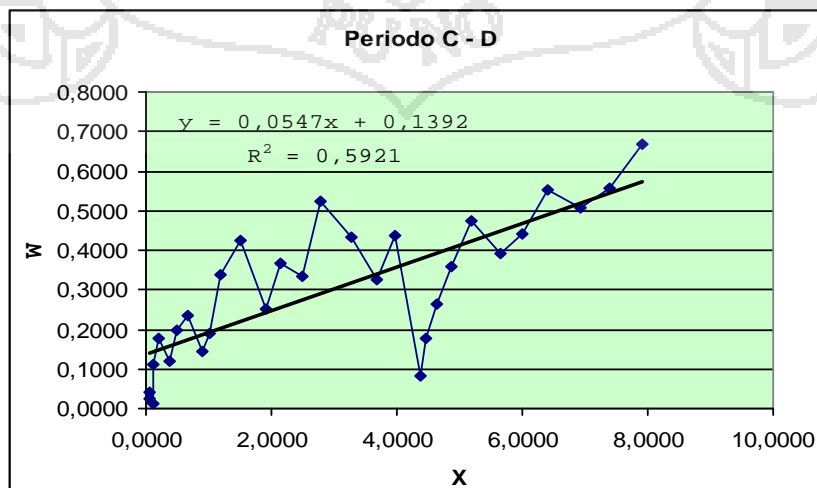
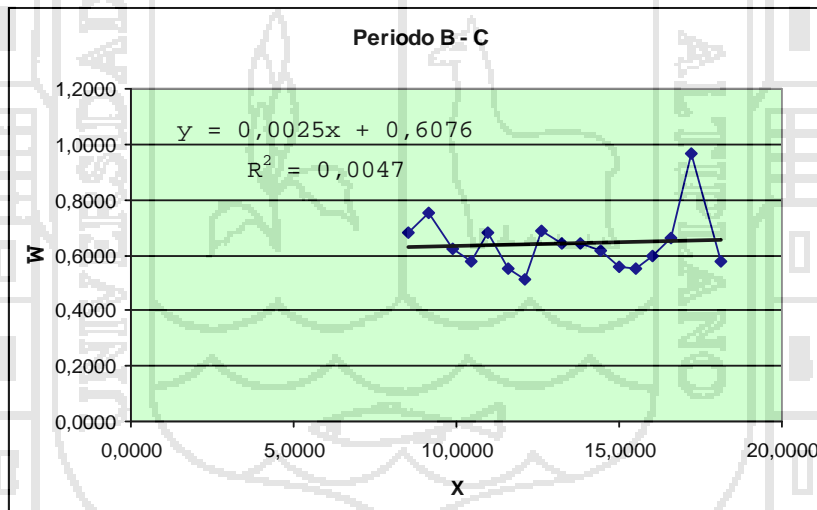


Figura N° 10. Curva de velocidad de secado ajustada por periodos para: $V_1 = 1.5 \text{ m/seg.}$ $T_1 = 60^\circ\text{C}$



ANEXO 3. RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVA DEL AGUA.

Los cálculos se realizaron según la ecuación de la ley de Fick modificada para lámina:

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{f^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_n^2} e^{\left(\frac{-h_n^2 f^2 D_{ef} t}{4L^2}\right)}$$

Dónde:

L: es el espesor de la lámina.

X: contenido de humedad al tiempo t

X₀: contenido de humedad inicial

X_s: contenido de humedad en la superficie

$$\Gamma = \frac{X}{X_0} = \frac{8}{f^2} e^{\left(\frac{-h_n^2 f^2 D_{ef} t}{4L^2}\right)}$$

$$\ln \frac{X}{X_0} = \ln \frac{8}{f^2} + \ln e^{\left(\frac{-h_n^2 f^2 D_{ef} t}{4L^2}\right)}$$

$$\ln \frac{X}{X_0} = \ln \frac{8}{f^2} - \frac{h_n^2 f^2 D_{ef} t}{4L^2}$$

$$b = \frac{h_n^2 f^2 D_{ef} t}{4L^2}$$

$$D_{ef} = \frac{4bL^2}{h_n^2 f^2}$$

Datos

n = 1

L = 0.003

f = 3.1416

b = m = -0.0012

$$D_{ef} = \frac{4 * -0.0012 * 0.003^2}{3.1416^2}$$

$$D_{ef} = -4.37705466 * 10^{-9}$$



Tabla N° 7. Difusividad efectiva del agua para cada temperatura y velocidad de aire.

	T (°C)	Vel. de Aire(m/s)	R	pendiente (m)	L	PI	N	D	D total
tramo 1	40	1	0,0019	-0,0012	0,003	3,1416	1	-4,37705*10 ⁻⁹	1,2219*10 ⁻⁷
tramo2	40	1	0,4614	0,0347	0,003	3,1416	1	1,2657*10 ⁻⁷	
tramo1	40	1,5	0,0038	0,0025	0,003	3,1416	1	9,11886*10 ⁻⁹	8,4258*10 ⁻⁸
tramo 2	40	1,5	0,3553	0,0206	0,003	3,1416	1	7,51394*10 ⁻⁸	
tramo 1	50	1	0,0074	0,0019	0,003	3,1416	1	-3,65*10 ⁻⁹	2,601*10 ⁻⁷
tramo 2	50	1	0,6766	0,0404	0,003	3,1416	1	2,637*10 ⁻⁷	
tramo 1	50	1,5	0,0103	-0,0026	0,003	3,1416	1	-3,65*10 ⁻⁹	2,612*10 ⁻⁷
tramo 2	50	1,5	0,6618	0,0705	0,003	3,1416	1	2,648*10 ⁻⁷	
tramo 1	60	1	0,002	0,003	0,003	3,1416	1	1,09426*10 ⁻⁸	2,0682*10 ⁻⁷
tramo 2	60	1	0,8615	0,0537	0,003	3,1416	1	1,95873*10 ⁻⁷	
tramo 1	60	1,5	0,0047	0,0025	0,003	3,1416	1	9,11886*10 ⁻⁹	2,0864*10 ⁻⁷
tramo 2	60	1,5	0,0025	0,0547	0,003	3,1416	1	1,99521*10 ⁻⁷	

Para optimizar la difusividad se utilizó el siguiente modelo:

- Parámetros estimados para la difusividad:

F. de V.	GL.	S.C.	C.M.	Fc	Pr > F	Sig.
Intercept	1	-0.00001000	0.00000480	-2.08	0.0549	2.7643E-12
TEMPE	1	4.237564E-7	1.962841E-7	2.16	0.0475	1.18667E-14
TEMPE2	1	-4.20612E-9	1.959577E-9	-2.15	0.0486	7.07657E-13

- Optimización de la difusividad

Utilizando como modelo para la optimización: $Y = -0.000010 + 4.237564E-7T - 4.20612E-9T^2$



ANEXO 4. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE PAGE Y NEWTON PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.

Los cálculos se realizaron según el modelo de Page y Newton, modelos difusionales de tipo exponencial con dos parámetros K y n para todos los casos como se muestra:

Modelo de Page:

$$\frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} = [(\exp(-K^2 t))^n]$$

$$\ln \frac{X_{wt}}{X_{w0}} = \ln e^{(-kt^n)}$$

$$\ln \frac{X_{wt}}{X_{w0}} = (-kt^n)$$

$$\ln \left(\ln \left(\frac{X_{wt}}{X_{w0}} \right) \right) = -\ln k + n \ln t$$

b = n

Dónde:

Xwt: Humedad al tiempo t (Kg agua / Kg m.s.)

Xwo: Humedad inicial (Kg agua / Kg m.s.)

X we: Humedad en equilibrio (Kg agua / Kg m.s.)

K: Parámetro del modelo.

n :Parámetro del modelo de Page.

t : Tiempo

Modelo exponencial o modelo de Newton:

$$\frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{w0} - X_{we}} = \exp(-K^1 t)$$

$$\ln \frac{X_{wt}}{X_{w0}} = \ln e^{(-kt)}$$

$$\ln \left(\ln \left(\frac{X_{wt}}{X_{w0}} \right) \right) = -\ln k + \ln t$$

b = 1

ANEXO 5. CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DISEÑO DEL SECADOR SOLAR INDIRECTO.

1. DIMENSIONAMIENTO DEL COLECTOR

A) CÁLCULO DE NUMERO DE REYNOLDS

$$Re = \frac{Le * v}{u}$$

$$Le = Dh = \frac{2(c * b)}{(c + b)}$$

Donde:

c = Distancia entre centros.

b = Alto del colector

$$Dh = \frac{2(0.5 * 0.05)}{(0.5 + 0.05)} = 0.0901$$

$$Re = \frac{0.0901 * 3}{15.65 * 10^{-6}} = 17271.61 \quad \text{-----> Flujo turbulento}$$

B) DETERMINACION DE NUSSET

$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3}$$

$$Nu = 78.789$$

C) Determinación del coeficiente convectivo entre la placa absorbente de radiación solar y el aire circundante dentro del ducto.

$$h_2 = h_3 = \frac{Nu * K}{Dh}$$

$$h_2 = \frac{78.789 * 0.0262}{0.0901} = 22.9108$$

D) Determinación del factor de emisividad global(E)

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_r} - 1}$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{0.95} + \frac{1}{0.25} - 1} = 0.246 \cong 0.25$$

E) Determinación del coeficiente radiativo equivalente

$$hr_{2-3} = \dagger (T_p + T_r) * (T_p^2 + T_r^2) * \frac{L}{C} * E$$

$$hr_{2-3} = \dagger \frac{(T_p^4 - T_r^4)}{(T_p - T_r)}$$

$$hr_{2-3} = 5.669 * 10^{-8} \frac{(353.15^4 - 291.15^4)}{(353.15 - 291.15)} = 7.651 w/m^2 \circ K$$

F) Cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de calor entre la placa absorbente y el flujo de aire.

$$h = \frac{h_2}{\text{sen} \frac{r}{2}} + \frac{1}{\frac{h_3}{\text{sen} \frac{r}{2}} + \frac{1}{E \cdot hr_{2-3}}}$$

$$h = \frac{22.908}{\text{sen} \frac{90}{2}} + \frac{1}{\frac{22.9108}{\text{sen} \frac{90}{2}} + \frac{1}{0.25 * 7.651}}$$

$$h = 34.11 w/m^2 \circ K$$

G) Cálculo de coeficiente de pérdida de calor desde la placa absorbente hacia el ambiente por encima de la cubierta transparente

$$U_t = \left[\frac{N}{\left(\frac{344}{T_p} \right) \left(\frac{T_p - T_a}{N + F} \right)^{0.31}} + \frac{1}{hw} \right]^{-1} + \frac{\dagger (T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.0425(1 - \epsilon_p)N)^{-1} + \frac{(2N + Fc - 1)}{\epsilon_c} - N}$$

Donde:

$$hw = 5.7 + 3.8 * v = 17.1 w / m^2 \circ K$$

$$F = (1.0 - 0.04hw + 5.0 * 10^{-4} * hw^2)(1 + 0.058N) = 0.489$$

$$F_c = 0.83 * 0.86 = 0.7138$$

$$\epsilon_c = 0.85$$

$$T_a = 15$$

$$T_p = 80$$

$$U_t = 3.61 w / m^2 \circ K$$

H) Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por conducción del aislamiento de la placa de fondo

$$U_b = \frac{Ka}{e}$$

$$Ka = 0.0433$$

$$e = 0.02$$

$$U_b = \frac{0.0433}{0.02} = 2.165 w / m^2 \circ K$$

I) Cálculo del coeficiente de pérdida de calor del colector

$$UI = U_t + U_b$$

$$UI = 6.31 + 2.165 = 8.475 w / m^2 \circ K$$

J) Cálculo del factor de eficiencia de la placa

$$Fp = \frac{1}{1 + \frac{UI}{h}}$$

$$Fp = \frac{1}{1 + \frac{8.475}{34.11}} = 0.801 \cong 80\%$$

K) Calculo del flujo másico del aire por unidad de área del colector

$$G = \frac{-Fp * UI}{Cp * Ln \left[1 - \left(\frac{Tf - Te}{\frac{R * F}{UI} - (Te - Ta)} \right) \right]} = \frac{\overset{o}{m}}{A_c}$$

$$G = 49.185322 \text{ Kg} / \text{m}^2 \text{ hr}$$

L) Determinación del espacio de estanco de aire (x)

Espinoza (1981), recomienda emplear la relacion:

* Ancho del colector/espacio de estanco del aire (x) de:

$$\frac{C}{x} = \frac{20}{1}$$

$$\frac{0.5}{x} = \frac{20}{1}$$

$$x = \frac{0.5}{20} = 0.025 \text{ m}$$

M) Calor generado por el colector (Q_c)

* Para el cálculo de Q_c , se emplea la ecuación:

$$(Q_c = G.Cp.\Delta T)$$

La $Q_c = 26.5^\circ\text{C}$ del aire es $0.237735\text{Kcal/Kg}^\circ\text{C}$, ($0.273299794\text{w-h/Kg}^\circ\text{C}$)

$$Q_c = 49.18532 * 0.276299794 * 17$$

$$Q_c = 231.028194 \text{ w/m}^2$$

2. DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE SECADO

A) Calculo de cantidad de producto fresco factible a deshidratar

$$C = Vt * \dots_s$$

$$Vt = L * a * n_b * n_c * e_s$$

$$Vt = 0.6 * 0.4 * 5 * 1 * 0.00375$$

$$Vt = 0.0045 \text{ m}^3$$

Reemplazando:

$$C = 0.0045 * 1.10 * 10^{-3} = 4.95 \text{ Kg}$$

B) Calculo de la cantidad de agua a eliminar.

$$H_0 = (0.9 - 0.12) * 4.95 \text{ Kg}$$

$$H_0 = 3.861 \text{ Kg}$$

C) Calculo del calor necesario para evaporar el agua.

$$Q_c = 539 * H_0 * y$$

$$Q_c = 539 * 3.861 * 0.6$$

$$Q_c = 1248.81 \text{ Kcal}$$

D) Determinación del calor necesario para calentar el aire

Primeramente determinamos el calor necesario para calentar 1Kg de aire desde 15°C hasta 60°C que es la temperatura considerada como la máxima de secado.

$$Q_n = n * C_p * (T_{OP} - T_a)$$

$$Q_n = 1 * 0.2399 * (60 - 15)$$

$$Q_n = 16.796 \text{ Kcal}$$

E) Determinación del aire necesario para evaporar el agua.

$$Q_a = \frac{Q_c}{Q_n}$$

$$Q_a = \frac{1248.64}{10.796}$$

$$Q_a = 115.65 \text{ Kg}$$

F) Determinación del volumen que ocupara el aire.

$$V = \frac{Q_a}{\rho_a}$$

$$V = \frac{115.65}{1.10}$$

$$V = 105.143 \text{ m}^3$$

G) Determinación del flujo Másico de aire que debe fluir para eliminar el agua d e al seta.

$$\dot{m} = \rho_a * \overline{AV}$$

El caudal del aire necesario para el secado resulta de dividir el volumen que ocupa el aire entre el tiempo que se considera durara el secado.

Por lo que:

$$\overline{AV} = \frac{105.43}{3} = 35.047 \text{ m}^3 / \text{hr}$$

Reemplazando:

$$\dot{m} = 1.10 * 35.047$$

$$\dot{m} = 38.552 \text{ Kg / hr}$$

$$G = \frac{\dot{m}}{A_c}$$

$$A_c = 0.783 \text{ m}^2 \longrightarrow 1.4 * 0.58 \text{ m}^2$$

⊗ Las dimensiones del colector resultan ser L=1.4m; C=0.58

H) Determinación del flujo de calor necesario para eliminar el agua

$$Q = m * C_p * (T_1 - T_2)$$

$$m = \dots * V = 1.10 * 0.0045$$

$$Q = 0.00495 * 0.2399 * 45$$

$$Q = 192.24 \text{ Kcal / hr}$$

I) Calor generado por la cámara de secado (Q_{CS})

Metallana, (1995) menciona que el cálculo para obtener el calor captado y/o energía útil captado por la cámara de secado.

$$G_{abc} = \check{S} * R$$

Como la cubierta es de madera el valor de S es 0 esto según las valores presentadas por Geankoplis (1998).

⊗ $G_{abc} = 0$, puesto que la madera no genera calor solo la mantiene.

$$S_c = n * L * L$$

$$S_c = 1 * 0.6 \text{ m} * 0.6 \text{ m}$$

$$S_c = 0.36 \text{ m}^2$$

$$Q_{CS} = 0 * 0.36$$

$$Q_{CS} = 0$$

⊗ La cámara no genera calor

ANEXO 6. PANEL FOTOGRÁFICO

Figura N° 8. Reconocimiento de la seta .



Figura N° 9. Observación del diámetro de sombrero del *Boletus edulis*



Figura N° 10 Recolección de la seta.



Figura N° 11. Velo del *Boletus edulis*



Figura N° 12. *Boletus edulis* en canastas.



Figura N° 13. Desinfección del laboratorio.



Figura N° 14. *Boletus edulis*



Figura N° 15. Selección de la seta por diámetro.



Figura N° 16. Selección de las setas por himenio y altura del pie.



Figura N° 17.
Acondicionamiento de las
setas.



Figura N° 18.
Acondicionamiento de las
setas.



Figura N° 19. Operación de
pelado.



Figura N° 20. Separación
del pie.



Figura N° 21. Corte en función al grosor (3mm.).

Figura N° 22. Corte en función al grosor (3mm.).



Figura N° 23. Corte en función al largo (1 cm.).

Figura N° 24. Corte en función al ancho (1 cm.).

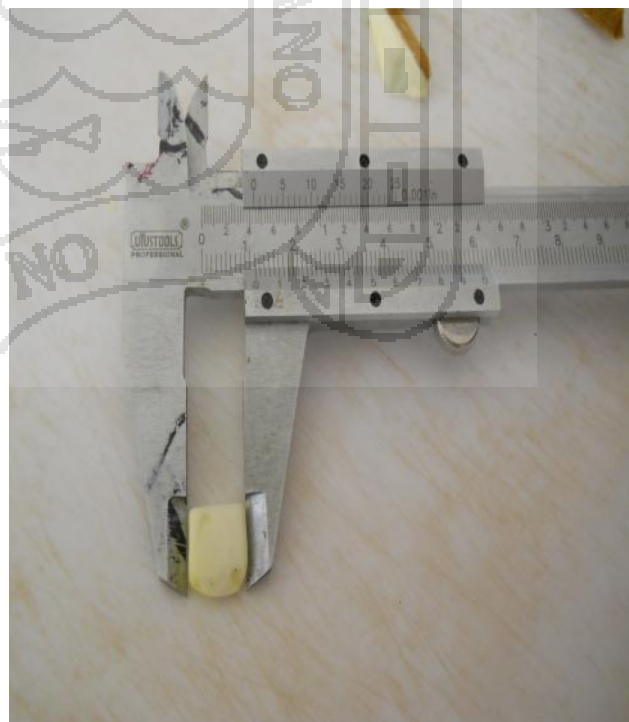


Figura N° 25. Corte en función al largo (1 cm.).



Figura N° 26. Operación de pesado.

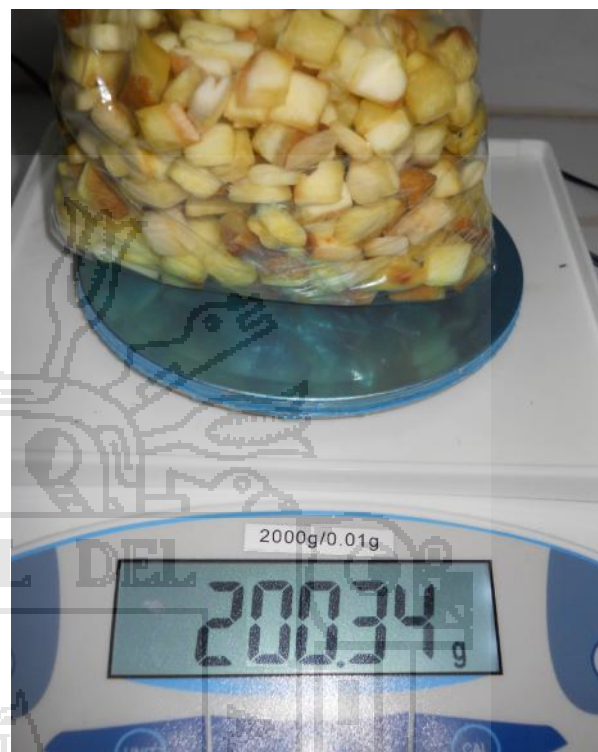


Figura N° 27. Cargado al equipo secador de lecho fijo.



Figura N° 28. Calibración del equipo secador de lecho fijo (Temperatura y Velocidad).



Figura N° 29. Proceso de secado terminado.



Figura N° 30. Setas deshidratadas.

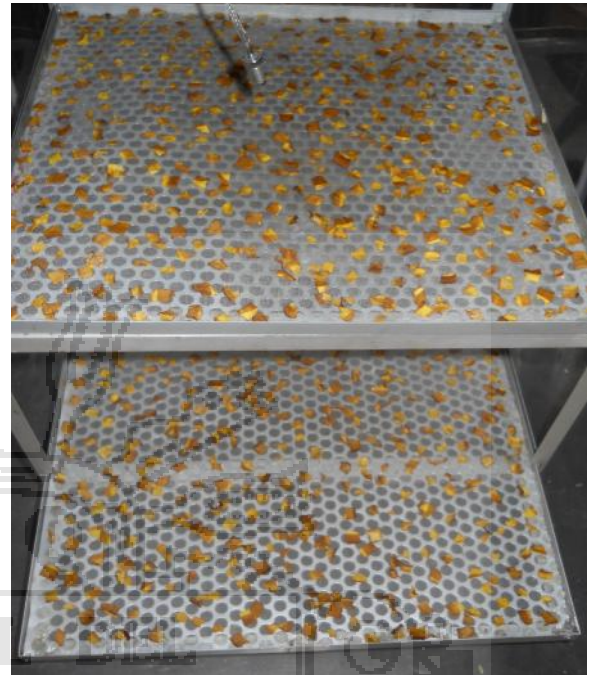


Figura N° 31. Secador solar indirecto con aire forzado.

Figura N° 32. Bandejas con setas en el secador solar indirecto.





APÉNDICE

- a: Alto del ducto del aire(m).
- Ac: Área del colector solar (m^2).
- As: Área de superficie de secado(m^2).
- b: Alto del colector solar.
- C: Producto factible a deshidratar (Kg).
- c: Distancia entre centros(m).
- Cp: Calor específico (Kcal/Kg °C).
- Dh: Diámetro hidráulico.
- e: Espesor del material aislante(m).
- Ec: Emisividad de la cubierta transparente.
- Ep: Emisividad de la placa interior.
- Fp: Factor de eficiencia de la placa.
- G: Flujo másico del aire ($Kg/m^2 \cdot h$).
- h: Coeficiente efectivo de transferencia de calor entre la placa adsorbente y el flujo de aire ($w/m^2 \cdot ^\circ C$).
- K: Conductividad térmica del aire ($w/m^2 \cdot ^\circ C$).
- Ka: Conductividad térmica del material aislante ($w/m^2 \cdot ^\circ C$).

- L: Longitud del colector.
N: Numero de cubiertas.
Nu: Numero de nusselt.
Qc: Calor necesario para evaporar el agua (Kcal).
Ql: Calor latente (Kcal).
Qs: Calor sensible (Kcal).
R: Radiación solar (w/m^2).
Re: Número de Reynolds.
S: Peso del sólido seco (Kg).
t: Tiempo de secado(horas).
Ut: Coeficiente de perdida de calor.
Ub: Coeficiente de transferencia de calor por conducción del
aislamiento de la placa de absorbente ($w/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).
Ul: Coeficiente de perdida de calor ($w/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).
v: Velocidad de flujo de aire (m/s).
V: Volumen de cámara de secado(m^3).

