

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL PROCESO DE
SECADO EN UN PROTOTIPO DE SECADOR SOLAR PARA 18 KG DE
CAPSICUM BACCATUM (AJÍ AMARILLO) EN EL DISTRITO DE SAN
MIGUEL EN LA PROVINCIA DE LIMA**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

PIERRE ANTOINE LÓPEZ ROMERO

Asesor:

Ing. Sandra Graciela Vergara Dávila

Lima, 2021

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se realiza la evaluación energética del proceso de secado, de forma experimental y teórica, en un prototipo de secador solar para el ají amarillo en el distrito de San Miguel, en la provincia de Lima, Perú.

El secador solar basa su construcción en una estructura de domo geodésico de bajo costo, de fácil construcción y portátil, con una cubierta con determinadas características para los fines de secado. El secador solo requiere de energías renovables para su funcionamiento.

Para la evaluación del secador en el secado del ají amarillo se midió el tiempo de secado, la humedad final del producto y la temperatura al interior del domo. Adicionalmente, para un mayor conocimiento del comportamiento del ají en el domo se realizaron comparaciones del secado de ají con diferentes tipos de corte y con sombra.

Además, se desarrolló un modelo para determinar teóricamente el tiempo de secado y la humedad del producto. Para el cálculo teórico se hizo un análisis energético del ají en base a datos experimentales obtenidos y los resultados se validaron con las dos pruebas de secado experimentales realizadas.

Se obtuvieron los siguientes resultados: Se halló una diferencia promedio de 20 °C entre las 10 am y 3 pm, entre la temperatura ambiental y la temperatura interior al domo, con una temperatura promedio de 50 °C adecuada para el secado. Se evaluó la distribución de temperaturas en el interior del domo a diferentes alturas y se obtuvo una diferencia de 5 °C entre el punto más alto y más bajo medido en el domo.

Se registraron las curvas de secado para una carga de 18 kg y se obtuvo que entre el día 4 y 5 se obtiene una humedad de conservación en el rango de 12 – 20 %. Además, La curva teórica se valida adecuadamente con los resultados experimentales.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	2
ÍNDICE DE ANEXOS	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	16
1.1. El Capsicum.....	16
1.1.1. Características del cultivo	17
1.1.2. Secado tradicional del ají amarillo	18
1.2. Base Teórica del proceso de secado	19
1.2.1. Mecanismo de secado.....	20
1.2.2. Curva de secado.....	21
1.2.3. Flujo de secado	22
1.2.4. Condiciones externas que influyen en el secado.....	23
1.2.5. Propiedades del producto que influyen en el secado	26
1.2.6. Tipos de secado	30
1.3. Estado del arte.....	31
1.3.1. Clasificación de secadores.....	32
1.3.2. Clasificación de secadores solares.....	33
1.3.3. Tipos comunes de secadores solares	36
1.4. Descripción del diseño del secador utilizado.....	40
1.4.1. Características de la cubierta	41
1.4.2. Características del piso en la base	42
1.4.3. Características del extractor eólico	42
1.4.4. Características de la estantería	44

1.4.5.	Características de operación del secador	46
1.5.	Metodología general del trabajo	46
1.5.1.	Procedimiento.....	47
CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL		48
2.1.	Pruebas realizadas.....	48
2.2.	Instrumentación.....	49
2.3.	Prueba: Medición de humedad inicial del ají.....	49
2.3.1.	Descripción de la prueba.....	50
2.3.2.	Resultados.....	51
2.4.	Prueba: Medición de las temperaturas en el domo	52
2.4.1.	Descripción de la prueba.....	52
2.4.2.	Adquisición de datos	53
2.4.3.	Resultados.....	53
2.5.	Medición del efecto de los diferentes tipos de corte de ají	58
2.5.1.	Descripción de la prueba.....	58
2.5.2.	Resultados.....	59
2.6.	Medición del efecto de la sombra	59
2.7.	Pruebas de secado.....	61
2.7.1.	Resultados.....	62
CAPÍTULO 3: DISEÑO ENERGÉTICO DEL SISTEMA		67
3.1.	Curva de secado para la primera etapa	69
3.1.1.	Modelo de comportamiento térmico	70
3.1.2.	Consideraciones.....	70
3.1.3.	Valores de entrada.....	71
3.1.4.	Planteamiento del cálculo del calor total hacia la superficie	72
3.1.5.	Cálculo del calor por convección ají - aire	73
3.1.6.	Cálculo del calor por radiación solar - ají.....	80

3.1.7. Calor total hacia la superficie	82
3.1.8. Determinación de la velocidad de secado.....	83
3.1.9. Valor de la humedad durante la primera etapa	86
3.2. Tiempo de secado para la segunda etapa	86
3.3. Curva de secado teórica.....	88
3.4. Validación del modelo con los resultados experimentales	90
CONCLUSIONES.....	93
BIBLIOGRAFÍA.....	94



ÍNDICE DE ANEXOS

1. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SECADO POR BANDEJA
2. ESQUEMA DEL ESTANTE Y BANDEJA
3. TEMPERATURAS MEDIDAS EN EL DOMO SIN PRODUCTO
4. COSTOS DEL PROTOTIPO
5. RADIACIÓN SOLAR
6. TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA AL INTERIOR DEL DOMO
7. RESULTADOS TEÓRICOS



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas del secado al aire libre, con combustibles y solar.	32
Tabla 2. Características de la cubierta seleccionada.....	41
Tabla 3. Características del extractor eólico.....	42
Tabla 4. Pruebas experimentales.....	48
Tabla 5. Instrumentación para las pruebas realizadas.....	49
Tabla 6. Resultados de las humedades registradas de las muestras de ají.	51
Tabla 7. Temperaturas promedio a diferentes alturas en el domo.....	57
Tabla 8. Descripción de las pruebas de secado.....	61
Tabla 9. Datos diarios para la carga total en el domo durante la prueba 1.	64
Tabla 10. Datos diarios para la carga total en el domo durante la prueba 2.	65
Tabla 11. Variación de agua por día para la prueba 1, 2.....	65
Tabla 12. Descripción de los tiempos de secado.....	68
Tabla 13. Día representativo.....	71
Tabla 14. Coeficientes convectivos.....	78
Tabla 15. Calor por convección ají -aire.....	79
Tabla 16. Calor por radiación solar.....	82
Tabla 17. Calor total.....	83
Tabla 18. Velocidad de secado del ají.....	85
Tabla 19. Humedad del producto en la primera etapa.....	86
Tabla 20. Humedad del ají teórico, y en la prueba 1 y 2.....	90
Tabla 21. Masa del ají teórica, y en la prueba 1 y 2.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

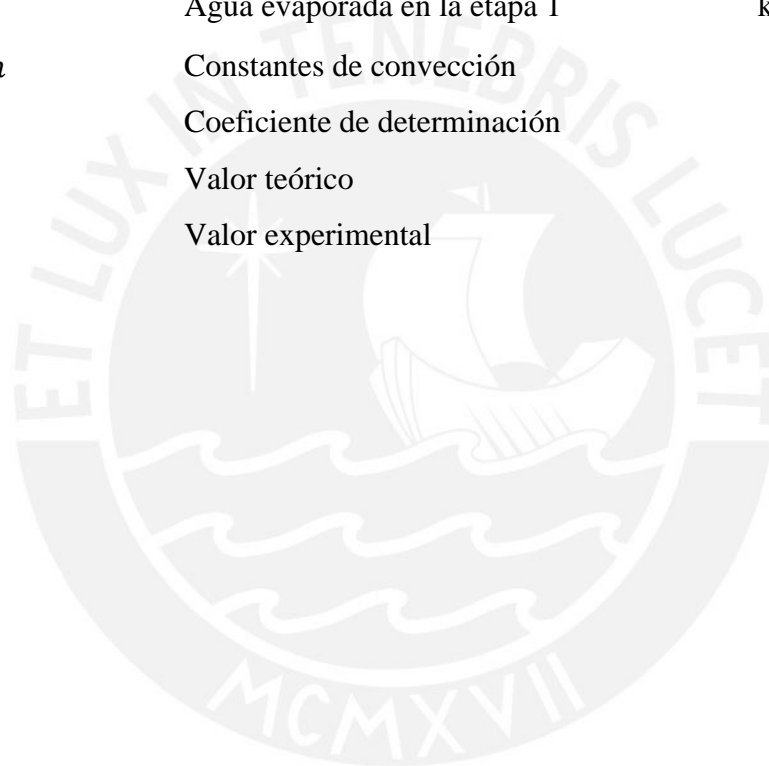
Figura 1. Importaciones mundiales de capsicum.....	12
Figura 2. Principales países exportadores de capsicum.....	13
Figura 3. Plato Nazca con representación de ajíes.....	16
Figura 4. Ajíes nativos cultivados en el país.....	17
Figura 5. Secado solar Tradicional del ají	18
Figura 6. Características del ají amarillo	19
Figura 7. Transferencia de energía y de masa, al interior y exterior del producto.	20
Figura 8. Etapas en la curva de secado.	21
Figura 9. Curva típica de Flujo de secado vs. Tiempo.....	22
Figura 10. Efecto de la temperatura en el tiempo de secado.	23
Figura 11. Efecto de la temperatura en el color del ají.	24
Figura 12. Efecto de la velocidad del aire en el tiempo de secado.	25
Figura 13. Efecto de la humedad relativa en el tiempo de secado.	26
Figura 14. Humedad en base húmeda vs. Humedad en base seca.	27
Figura 15. Valor inicial de humedad para diferentes productos.	28
Figura 16. Efecto del corte del producto en el tiempo de secado en ají.	29
Figura 17. Ejemplo de secado en cama profunda.	30
Figura 18. Secado de uvas en capa delgada.	31
Figura 19. Secador solar de convección natural.	34
Figura 20. Secador solar de convección forzada tipo túnel	34
Figura 21. Ilustración del funcionamiento del secador: Directo, indirecto y mixto.	36
Figura 22. Secador solar de gabinete	37
Figura 23. Secador solar tipo carpa.....	37
Figura 24. Secador solar de cabina.	38
Figura 25. Secador solar tipo túnel.	39
Figura 26. Secador solar de efecto invernadero.....	39
Figura 27. Domo secador ubicado en el campus de la PUCP.....	40
Figura 28. Domo con cubierta opaca	40
Figura 29. Esquema del domo secador.	41
Figura 30. Piso utilizado para el domo	42
Figura 31. Extractor eólico utilizado.	43

Figura 32. Curvas de rendimientos de extractores eólicos.	43
Figura 33. Esquema de la ubicación de las bandejas en vista de planta.	45
Figura 34. Esquema de ubicación de las bandejas en vista de perfil	45
Figura 35. Estantes en el interior del domo.	46
Figura 36. Muestra inicial del ají.	50
Figura 37. Muestra del ají picada.....	50
Figura 38. Muestra final pesada.....	51
Figura 39. Ubicación sensores: vista de planta y ubicación de los sensores en vista perfil.	52
Figura 40. Día 1: Temperatura interior y ambiental (°C) vs. Tiempo (Hora).....	54
Figura 41. Día 2: Temperatura interior y ambiental (°C) vs. Tiempo (Hora).....	54
Figura 42. Día 3: Temperatura interior y ambiental (°C) vs. Tiempo (Hora).....	55
Figura 43. Día 1: Temperaturas interiores del domo (°C) vs. Tiempo (Hora)	56
Figura 44. Día 2: Temperaturas interiores del domo (°C) vs. Tiempo (Hora)	56
Figura 45. Día 3: Temperaturas interiores del domo (°C) vs. Tiempo (Hora)	57
Figura 46. Pruebas para ají con diferentes cortes	58
Figura 47. Efecto del corte del ají en el tiempo de secado	59
Figura 48. Efecto de la exposición al sol para ajíes secados dentro del domo.	60
Figura 49. Comparación entre ají expuesto al sol (izquierda) y ají en la sombra (derecha)....	60
Figura 50. Preparación del ají.	61
Figura 51. Bandeja al interior del domo (izquierda) y bandeja al ambiente(derecha).....	62
Figura 52. Disposición de los estantes en las pruebas de secado.....	62
Figura 53. Contenido de humedad (base seca) vs. Tiempo (días).	63
Figura 54. Contenido de humedad (base seca) vs. Tiempo (días).	63
Figura 55. Producto final obtenido.	66
Figura 56. Secado al interior del domo (izquierda), secado al ambiente (derecha).....	66
Figura 57. Etapas en la curva de secado	67
Figura 58. Ají cortado (izquierda) y superficie del ají expuesto en bandeja (derecha).	69
Figura 59. Esquema de los procesos de transferencia de calor y masa en el ají cortado.	69
Figura 60. Transferencia de calor en el ají.....	70
Figura 61. Recomendaciones empíricas para la convección natural sobre superficies.	76
Figura 62. Radiación solar absorbida por superficies	81
Figura 63. Humedad en base seca vs. Tiempo.....	89
Figura 64. Comparación curvas de secado	91

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definición	Unidades
M	Humedad en base húmeda	%
X	Humedad en base seca	kg/kg
X_0	Humedad inicial	kg/kg
X_c	Humedad crítica	kg/kg
X_e	Humedad en el equilibrio	kg/kg
t_c	Tiempo de secado	s
t_1	Tiempo de secado primera etapa	s
t_2	Tiempo de secado segunda etapa	s
T_a	Temperatura del aire	°C
\dot{Q}_s	Transferencia de calor	W
\dot{Q}_r	Transferencia de calor radiación	W
\dot{Q}_c	Transferencia calor convección	W
h_L	Entalpía específica vaporización	kJ / kg
Nu	Número de Nusselt	-
h	Coefficiente convectivo	W / K m ²
L_c	Longitud característica	m
k	Conductividad térmica del fluido	W / m * K
Gr	Número de Grashof	-
Pr	Número de Prandt	-
Ra	Número de Rayleigh	-
g	Aceleración de la gravedad	m / s ²
μ	Viscosidad cinemática del fluido	m ² / s
T_s	Temperatura de la superficie	K
β	Coefficiente expansión vol.	1/K
A_s	Superficie de la bandeja	m ²
\emptyset	Humedad relativa	%
$Patm$	Presión atmosférica	bar
K	Caudal	m ³ / s
\dot{m}_c	Flujo de agua evaporada del ají	kg / s

D	Difusividad de masa	m^2 / s
dc	Dimensión característica	m
I_t	Irradiación solar	W/ m^2
α_p	Coefficiente de absorptividad	-
τ_c	Transmisibilidad de la cubierta	-
F	Factor por media sombra	-
m_{total}	Masa total inicial de ají	kg
$m_{0agua-i}$	Masa de agua inicial	kg
m_{seco}	Masa seca de ají	kg
m_p	Agua evaporada en la etapa 1	kg
C, n	Constantes de convección	-
R^2	Coefficiente de determinación	-
v_e	Valor teórico	-
v_t	Valor experimental	-



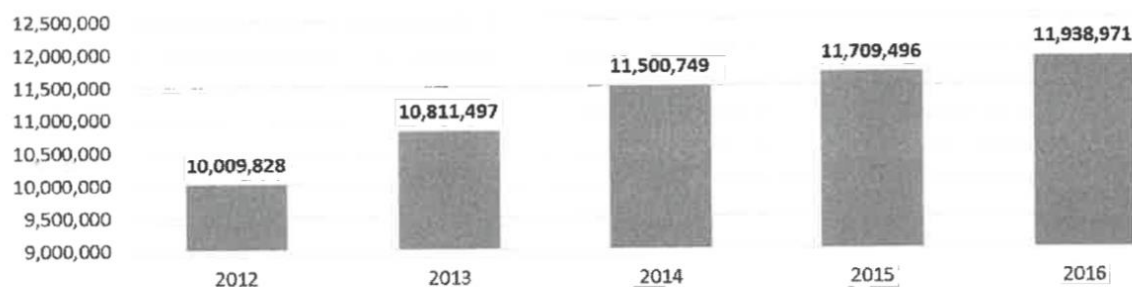
INTRODUCCIÓN

El secado es uno de los métodos más utilizados para la conservación de los productos alimenticios a lo largo de la historia, además es preferido frente a otros métodos de conservación por razones económicas. Tradicionalmente el secado solar consiste en colocar el producto en el suelo expuesto a las condiciones ambientales, lo cual lleva a pérdidas de la producción, deterioro de la calidad del producto, tiempos de secado prolongados, humedades del producto final insuficientes y no homogéneas, entre otros (Kumar 2017: 40).

En nuestro país, el secado de ají se sigue realizando de forma tradicional y las pérdidas de ají se estiman en 20 – 25 % del total de producto procesado (CONCYTEC, 1986), adicionalmente a esa situación mediante el proceso de secado actual se produce un deterioro en la calidad del producto, lo cual además limita su potencial de exportación. (MINAGRI 2018: 42).

Por otro lado, el capsicum se ha vuelto un producto con creciente demanda a nivel internacional que registra un crecimiento promedio de 5 % de sus exportaciones durante los últimos 5 años y el Perú se encuentra entre los principales exportadores (MINAGRI 2018: 21).

**Gráfico9: Importaciones Mundiales de Capsicum
(Miles de Dólares)**



Fuente: Trademap
Elaborado: ADEX

Figura 1. Importaciones mundiales de capsicum.

Fuente: MINAGRI 2018: 12

En cuanto a la producción según el MINAGRI a nivel mundial el Perú se encuentra en el puesto 27 en el ranking mundial de producción de capsicum con el 0.5 % de participación y un decrecimiento anual de 1%, problema que afecta al pequeño agricultor que opta por trabajar otros productos (2018:5).

**Gráfico 1: Principales Productores de Capsicum a nivel internacional
(Miles de toneladas)**

Ranking 1-10	País	2012	2013	2014	2015*	2016*	Crecimiento Promedio Anual 2012-2016	Participación % 2016
1	China	15,913	16,127	16,454	16,945	17,450	1%	45.2%
2	México	2,440	2,354	2,793	2,975	3,168	3%	8.2%
3	Turquía	2,059	2,176	2,144	2,191	2,239	1%	5.8%
4	Indonesia	1,656	1,726	1,875	1,978	2,086	2%	5.4%
5	India	1,372	1,560	1,561	1,597	1,635	2%	4.2%
6	España	976	1,021	1,133	1,138	1,143	2%	3.0%
7	EE.UU	907	846	914	908	902	0%	2.3%
8	Nigeria	797	797	799	802	805	0%	2.1%
9	Egipto	715	623	655	671	688	0%	1.8%
10	Argelia	441	497	548	587	630	4%	1.6%
27	Perú	183	162	162	140	164	-1%	0.5%

Figura 2. Principales países exportadores de capsicum.

Fuente: MINAGRI 2018: 5

La demanda internacional ofrece un potencial para la oferta de ajíes peruanos, incluyendo los ajíes secos (MINAGRI 2018: 14). Esta problemática y oportunidad han sido identificados en *Plan de Desarrollo Sostenible de las Especies del Género Capsicum 2018 – 2028* que tiene como objetivo principal incrementar la producción sostenible de capsicum, a través de la mejora de sus niveles de competitividad y productividad. La mejora del proceso de secado forma parte de la propuesta solución.

Es requerido, entonces, un ají seco de calidad que se dificulta con un proceso de secado tradicional. Es posible realizar el proceso de secado utilizando energías convencionales. Sin

embargo, estas fuentes de energía no están económicamente al alcance de todos, requieren un alto consumo de combustible y son contaminantes. Adicionalmente, nuestro país posee un potencial energético en cuanto a radiación solar, además de condiciones óptimas para el secado.

En este trabajo de tesis, en función a la problemática planteada, se propone y evalúa un secador solar de efecto invernadero como alternativa para mejorar el procesamiento del secado del ají amarillo, y que se mantenga en el lineamiento de las energías renovables. Las evaluaciones se llevarán a cabo en el campus de la PUCP específicamente en las coordenadas 12°04'23.4"S 77°04'51.4"O.

Para la evaluación del secado propuesto se medirán: el tiempo de secado, la humedad final del producto y la temperatura al interior del domo. Estas mediciones son para una carga de ají de 18 kg, durante los meses correspondientes a la cosecha del ají y para las condiciones climáticas del distrito de San Miguel en la provincia de Lima. Se realizará una comparación de los resultados obtenidos del producto secado en el domo con los resultados del producto secado al ambiente mediante una prueba simultánea de ajíes secados al exterior. Además, se realizará una estimación teórica del tiempo de secado.

En el aspecto constructivo este secador toma el diseño por elaborado por Serrano que detalla la construcción de una estructura de plástico, liviana, de fácil construcción y montaje, cuyo objetivo original es de servir de refugio transitorio para personas y enseres, en caso de emergencia. La estructura cubre una superficie útil de 20 m² y una altura de 2.7 metros aproximadamente y se trata de un domo geodésico (Serrano 2010). A este diseño se le adapta una cubierta, un piso, y un extractor eólico adecuado para su funcionamiento como secador solar de efecto invernadero.

En cuanto al proceso de secado, ha tomado como base recomendaciones generales de los parámetros óptimos de secado utilizados para diferentes tipos de ajíes. Entre las

recomendaciones se determina para un ají rojo un deterioro del color del producto a una temperatura de 65 °C (Hossain, M. et al. 2007). Donald G. Mercer recomienda no superar los 55 °C para frutos en general y cortar el ají para mejorar el tiempo de secado (2014: 7). En cuanto al tipo de secador Anil Kumar menciona una temperatura aproximada de 20 °C superior a la temperatura de ambiente en secadores de efecto invernadero como el nuestro (2017: 177).



CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

El secado es un proceso de conservación que consiste en la extracción de humedad de un producto hasta un nivel que permita la conservación del mismo. En el presente capítulo se describe el marco teórico sobre el cual se basa el desarrollo del trabajo, este incluye una descripción general del capsicum: sus características, su producción y la forma tradicional de secado; del proceso de secado: el mecanismo de secado, los componentes de una curva de secado y el comportamiento del producto; las tecnologías de secado solar, y las características del secador solar tipo domo que es el utilizado para este trabajo.

1.1.El Capsicum

El Capsicum es un género de plantas, que agrupa a los ajíes, pimientos y rocotos, y comprende alrededor de 38 especies en base a sus características morfológicas (Rojas 2016: 10). Según la Sociedad Peruana de Gastronomía et al. “los estudios determinan que es originario del Alto Perú, zonas que incluyen el lago Titicaca y Bolivia, y a partir de este punto, se esparció a través del continente americano” (2009: 15)

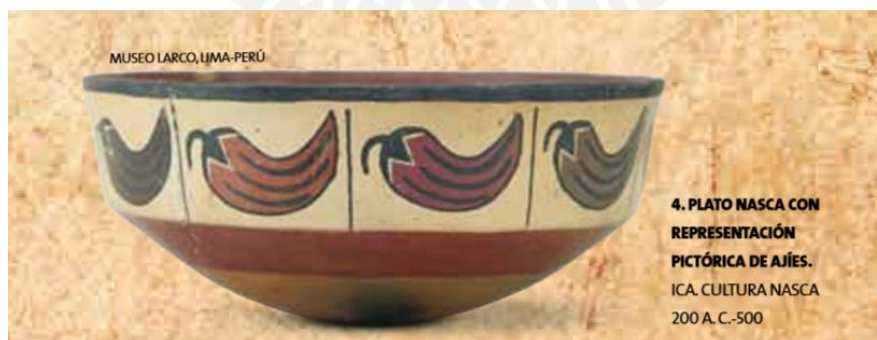


Figura 3. Plato Nazca con representación de ajíes

Fuente: Sociedad Peruana de Gastronomía 2009: 17

Solo cinco de ellas han sido domesticadas por el hombre (*Capsicum annum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens*), las cuales están disponibles comercialmente en el Perú (Rojas 2016: 5). El ají amarillo, una variedad del *Capsicum baccatum*, es la utilizada para el desarrollo del trabajo. El ají amarillo es de gran importancia, pues es el más usado en el país, el de mayor extensión sembrada y el de mayor conexión con la agroindustria (UNALM 2012: 12).

1.1.1. Características del cultivo

La producción de amarillo se da en la costa peruana de desde Lambayeque a Tacna. La región de Lima tiene niveles altos de producción de ají amarillo o escabeche y dentro de esta región, los distritos de Huaral y Chancay son los productores principales (Jager 2011: 50).

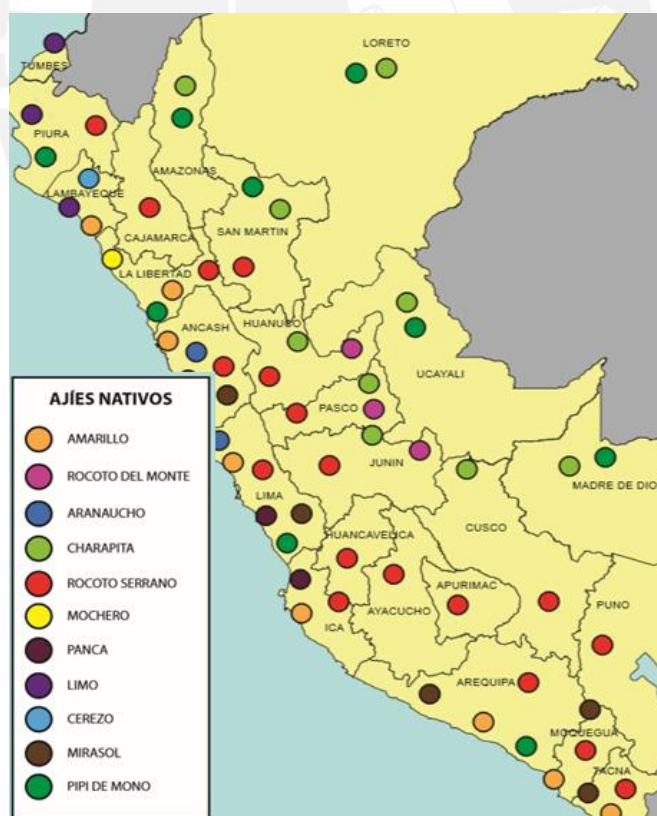


Figura 4. Ajíes nativos cultivados en el país

Fuente: Jager 2011: 26

Se trata de un cultivo que necesita de sol para su desarrollo, por lo cual la época de siembra en la costa central del Perú se realiza en los meses de septiembre a diciembre y su cosecha se realiza en los meses de enero a mayo, estas fechas pueden variar en regiones más cálidas (UNALM 2012: 25). El periodo en el que se realiza el secado coincide con las fechas de cosecha del producto, por lo tanto las pruebas experimentales para este trabajo fueron realizadas durante los meses de enero, febrero y marzo del año 2019 y 2020.

1.1.2. Secado tradicional del ají amarillo

El secado tradicional del ají amarillo se realiza exponiéndolos directamente a la radiación solar, extendiéndolo sobre el suelo, muchas veces en arena o en las laderas de los cerros (UNI 1986: 79).

El proceso de secado se prolonga por 15 días en los meses de enero y marzo y por 25 días en los meses de abril a junio (UNI 1986: 79), lo cual favorece la proliferación de hongos, así como la acción de roedores y aves, además de lluvias esporádicas, especialmente en junio (Alvistur 1975: 29).



Figura 5. Secado solar Tradicional del ají

Fuente: Jager 2011: 6

1.1.3. Características del fruto

En la figura 6 se muestran las características generales del fruto fresco del ají amarillo. El interior del ají presente una cavidad entre la pared del fruto y la placenta que contiene a las semillas. La capsaicina es el componente responsable del picor y se encuentra presente principalmente en la placenta (Sociedad Peruana de Gastronomía 2009: 42).



Figura 6. Características del ají amarillo

Fuente: Rojas 2016: 94

1.2. Base Teórica del proceso de secado

La conservación indica el proceso de extender el tiempo de almacenamiento para un determinado producto con una deseada calidad. El secado es un proceso de conservación que consiste en la extracción de humedad de un producto hasta un nivel que permita la conservación del mismo. Este proceso es común para alimentos: frutas, vegetales, entre otros (Kumar 2017: 3).

Los productos se secan debido a la vaporización del agua que estos poseen. El producto contiene agua de forma superficial e interna. A medida que el agua se evapora de la superficie del producto, el agua al interior del producto va hacia la superficie y así continúa el proceso hasta que el producto llega una cantidad de humedad requerida (Mercer 2014: 4).

1.2.1. Mecanismo de secado

Durante el secado ocurre una transferencia de energía hacia el interior del producto para la evaporación del agua y además un transporte de masa del agua de la superficie del producto hacia el aire. Ambos procesos de manera simultánea. (Kumar, 2017: 22)

- Una transferencia de energía del ambiente hacia el producto
- Un transporte de masa desde el producto hacia el ambiente

Entonces, tenemos mecanismos externos e internos al producto y de transferencia de masa y de energía. Durante las diferentes etapas en el secado existen mecanismos que predominan frente a otros y rigen la velocidad de secado como se muestra en la figura 7.

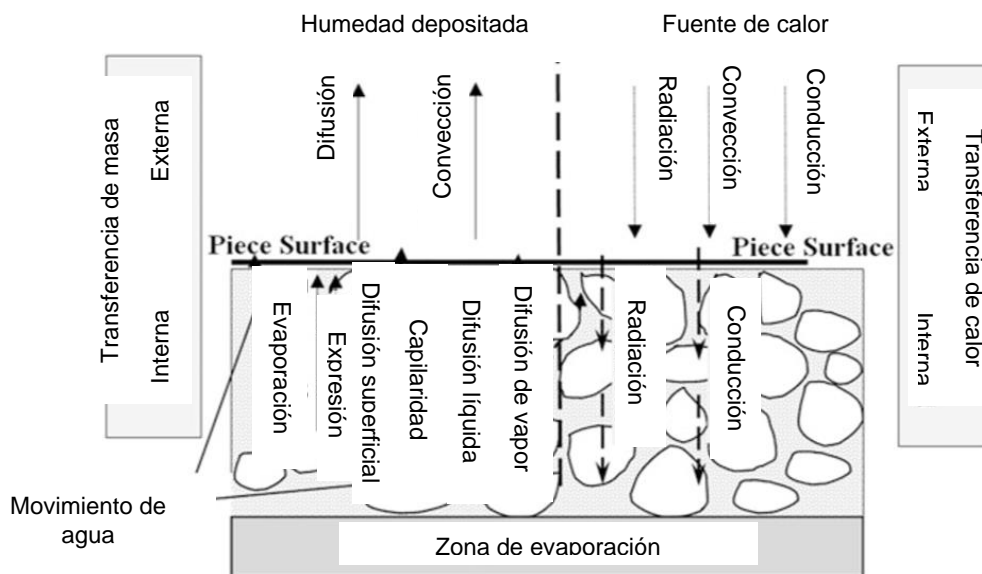


Figura 7. Transferencia de energía y de masa, al interior y exterior del producto.

Fuente: Kumar 2017:23

1.2.2. Curva de secado

El proceso de secado en el tiempo posee determinadas características generales observables en las curvas de secado. Las curvas de secado nos muestran la variación del contenido de agua en el producto, en base seca, con respecto al tiempo (Mercer 2014: 12). De forma general se observan 3 etapas cada una con sus características propias. La figura 8 muestra una curva de secado y sus respectivas etapas.

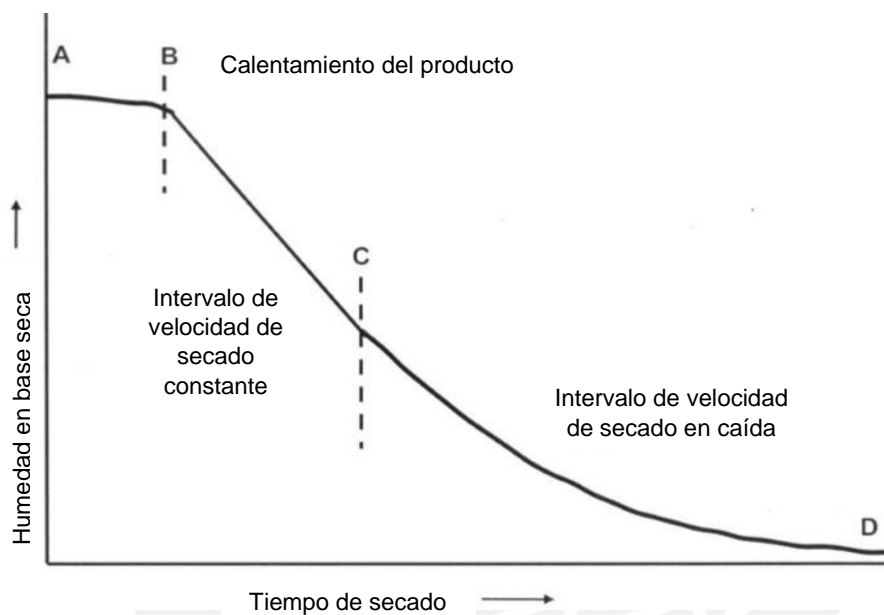


Figura 8. Etapas en la curva de secado.

Fuente: Mercer 2014: 12

La etapa A - B marca un corto período en el que el agua del producto se calienta antes de empezar a evaporarse. Según G. Mercer el tiempo que toma la etapa A-B no es observable en productos que se encuentran a temperaturas de ambiente (2014).

En la etapa B – C el agua se encuentra dispuesta en la superficie del producto por lo cual es removida y reemplazada por otra a un ritmo constante. Esta etapa posee la mayor velocidad de secado (Mercer 2014: 5).

En la etapa C-D ya no hay suficiente agua que logre llegar a la superficie a un ritmo constante. Entonces, el agua se desplaza hacia la superficie del producto desde su interior. La velocidad de secado es variable en el tiempo y se reduce hasta una humedad de equilibrio (Mercer 2014: 5).

Generalmente durante la etapa B –C predominará los mecanismos de secado externos al producto al encontrarse el agua en la superficie, por lo tanto, tiene más importancia las propiedades del aire utilizado. Mientras que en la etapa C – D predominarán los mecanismos internos, la pérdida de agua depende de la velocidad de transporte a través del producto (Mercer 2014: 5).

1.2.3. Flujo de secado

Durante la primera etapa el flujo de secado se mantiene constante y es su máximo valor y en la segunda etapa va disminuyendo hasta volverse cero (Kumar 2017: 24). Se muestra una curva de flujo de secado en la figura 9.

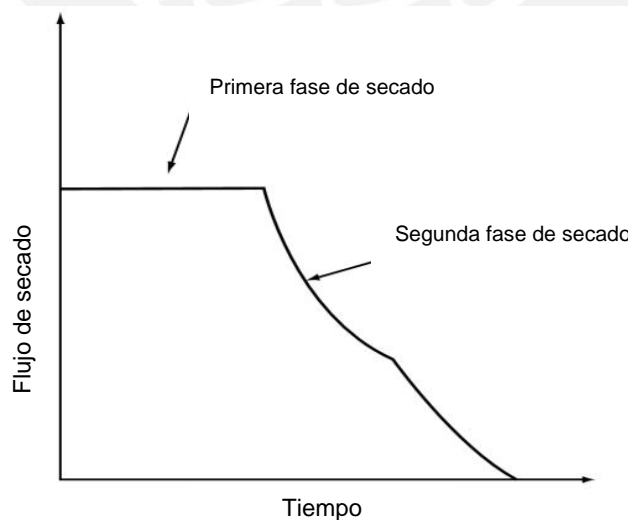


Figura 9. Curva típica de Flujo de secado vs. Tiempo

Fuente: Kumar 2017 : 24

1.2.4. Condiciones externas que influyen en el secado

Se explicó que existen factores externos e internos que influyen a la velocidad del secado. A continuación se muestran los factores externos y su influencia en el tiempo de secado: la temperatura del aire de secado, la humedad relativa y la velocidad del aire.

Temperatura

La temperatura usada en el aire de secado es uno de los factores que mayor influencia tiene en la rapidez del secado (Hossain 2007: 1370), de manera ilustrativa se muestra las curvas de secado para un ají similar a diferentes temperaturas. En la figura 10 se observa el gran efecto que tiene la temperatura en el tiempo de secado.

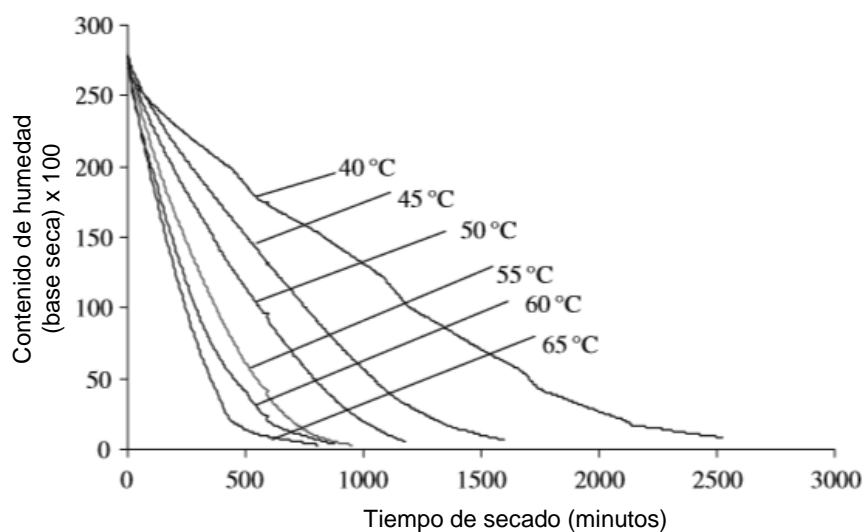


Figura 10. Efecto de la temperatura en el tiempo de secado.

Fuente: Hossain 2007: 1370

Sin embargo, temperaturas excesivas provocan un cambio en el color del producto y por lo tanto en su contenido nutricional del producto (Hossain 2007: 1370), como se muestra en la figura 11.

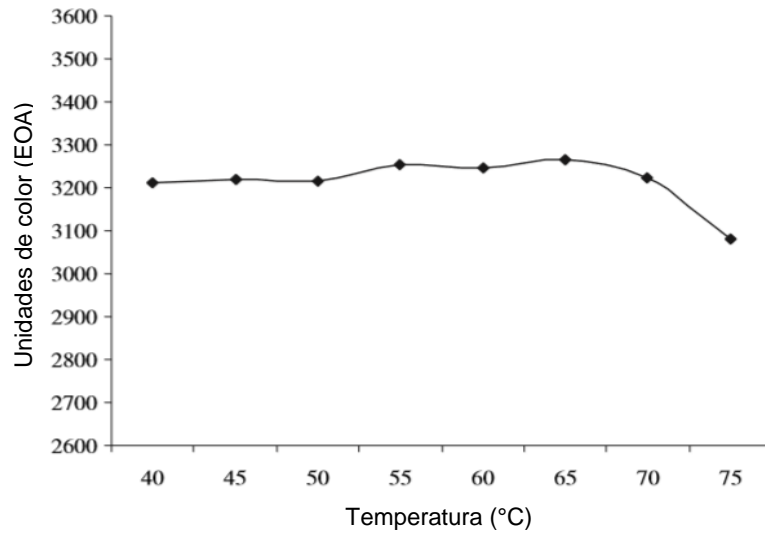


Figura 11. Efecto de la temperatura en el color del ají.

Fuente: Hossain 2007: 1370

G. Mercer (2014) recomienda una temperatura de 55 °C para el secado de frutos, que incluye al ají.

Velocidad del aire

La velocidad del aire en contacto con el producto también tiene un efecto en el tiempo de secado, a mayor velocidad del aire sobre el producto tendremos un menor tiempo de secado como se muestra en la figura 12 (Hossain 2007: 1371). Sin embargo, G. Mercer (2014) recomienda no superar valores de velocidad mayores a 0.5 m/s, pues el cambio en el tiempo de secado es insignificante.

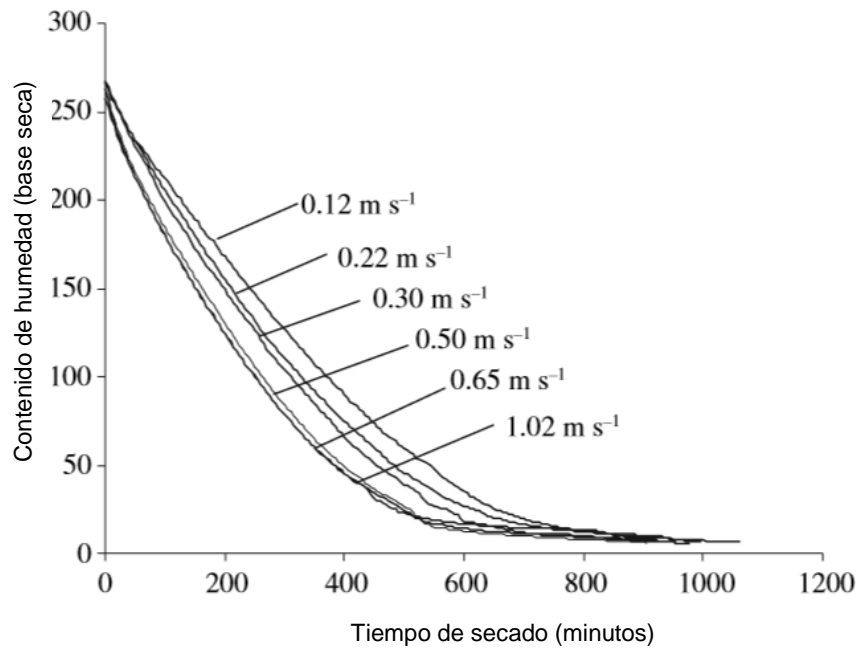


Figura 12. Efecto de la velocidad del aire en el tiempo de secado.

Fuente: Hossain 2007: 1371

Humedad relativa

La humedad relativa del aire en contacto con el producto también tiene un efecto en el proceso de secado, a menor humedad relativa del aire de secado, entonces menor tiempo de secado, como se puede apreciar en la figura 13 (Hossain 2007: 1371). El valor de la humedad depende de la temperatura del aire, a mayor temperatura tendremos menor humedad relativa.

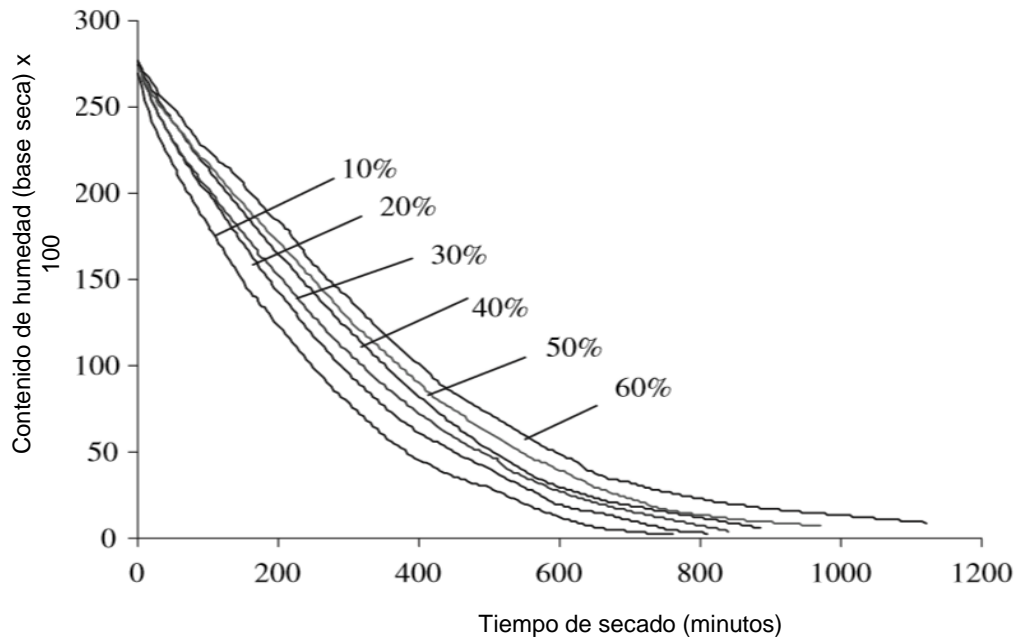


Figura 13. Efecto de la humedad relativa en el tiempo de secado.

Fuente: Hossain 2007: 1371

1.2.5. Propiedades del producto que influyen en el secado

Una de las características importantes del producto que influyen en el proceso de secado es la humedad, que puede ser expresada en base húmeda o base seca, el espesor del corte del producto, las características propias del producto (configuración física), entre otras.

1.2.5.1. Contenido de agua en base húmeda

Una forma de expresar el contenido de humedad de un producto es dividiendo la cantidad de agua presente en la muestra sobre el peso total de la muestra y convertirlo a porcentaje, de esta manera se obtiene la humedad en base húmeda, y se expresa de la siguiente manera:

$$M = \frac{\text{masa de agua (kg)}}{\text{masa total del producto (kg)}} * 100 \quad (1)$$

M: Humedad en base húmeda (%)

Resulta fácil expresar la humedad inicial en base húmeda para su mejor comprensión, sin embargo para graficar las curvas de secado la humedad en base seca resulta más adecuado.

1.2.5.2. Contenido de humedad en base seca

Otra forma útil de expresar el contenido de humedad en el producto es dividiendo el contenido de humedad en el producto sobre la masa seca del producto. La humedad en base seca no se expresa en porcentaje a diferencia de la humedad en base húmeda.

$$X = \frac{\text{masa de agua (kg)}}{\text{masa seca (kg)}} \quad (2)$$

X: Humedad en base seca ($\frac{\text{kilogramos de agua}}{\text{kilogramos de sólidos}}$)

Esta es la forma que se utilizará para expresar la humedad en las curvas de secado a desarrollar.

La conversión entre una y otra forma de estas expresiones se da mediante la siguiente forma:

$$X = \frac{M}{1 - M} \quad (3)$$

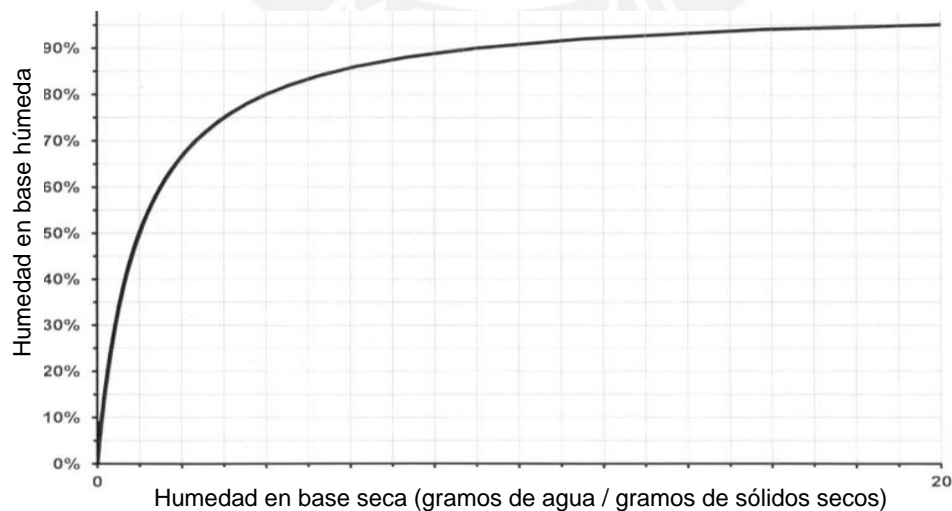


Figura 14. Humedad en base húmeda vs. Humedad en base seca.

Fuente: Mercer 2014: 7

1.2.5.3. Valor de humedad de los productos

Diferentes productos presentan un diferente contenido de humedad inicial. En la figura 15 se muestran el contenido inicial de humedad para diferentes productos incluido el ají, sin embargo, este valor varía de acuerdo al tipo de ají utilizado, la región, entre otros factores.

Producto	Contenido de humedad inicial (%)
Manzana	80
Damasco	85
Plátano	80
Col	80
Zanahoria	70
Yuca	62
Coliflor	80
Chiles	80
Granos de cacao	50
Café	50
Granos de café	55
Pulpa de coco	30

Figura 15. Valor inicial de humedad para diferentes productos.

Fuente: Kumar 2013: 17

Además de conocer la humedad inicial con la que el producto inicia el proceso de secado es importante conocer también la humedad final del producto luego del proceso de secado. Esta humedad es la humedad que debemos obtener para considerar que nuestro producto ha terminado su proceso. Para el ají amarillo se toman las recomendaciones de Rivasplata que establecen una humedad final recomendada en un rango entre 12 – 20 % en base húmeda o de 0.136 – 0.25 en base seca para el ají amarillo (2010).

1.2.5.4. Influencia de las características físicas del producto

Las características físicas del producto tienen una influencia en la velocidad de secado, por lo que cada producto tendrá una velocidad diferente de secado, así mismo, es posible acelerar esa velocidad de secado para un producto modificando su forma, haciendo que haya más superficie del producto expuesta o haciendo que el producto tenga menor espesor (Mercer 2014: 6).

Por lo tanto a menor espesor del producto tendremos mayor velocidad del secado. Sin embargo, esto no es posible de aplicar por la naturaleza del ají. El ají posee una capa superficial que protege al contenido interior del producto manteniendo su humedad (Mercer 2014: 6).

Por este motivo el ají abierto, con el interior expuesto presenta un tiempo de secado mucho menor a un ají entero tal y como se muestra en la figura 16.

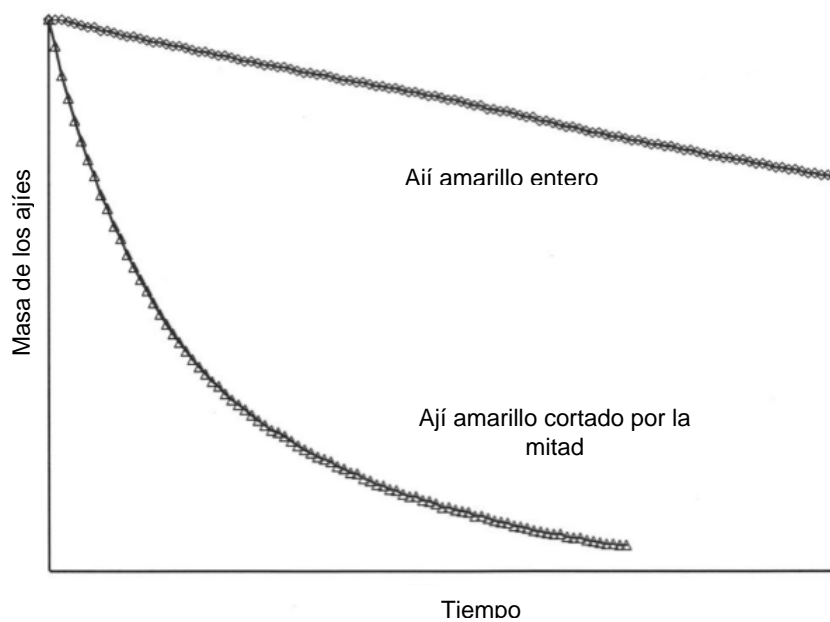


Figura 16. Efecto del corte del producto en el tiempo de secado en ají.

Fuente: Mercer 2014: 7

1.2.6. Tipos de secado

Es importante considerar que según el arreglo del producto al interior del secador y según las características físicas del producto, habrá una variación en las propiedades del aire sobre el producto. A continuación se detallan los tipos de secado.

1.2.6.1. Secado en cama profunda

En este secado los productos agrícolas son depositados uno sobre otro en una capa con determinada profundidad, el aire circula a través de la capa desde la parte inferior hasta la parte superior retirando la humedad del producto.

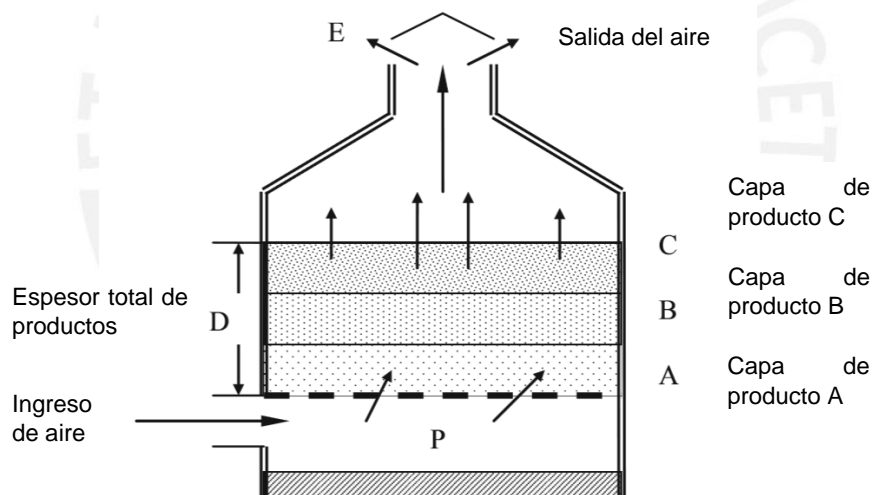


Figura 17. Ejemplo de secado en cama profunda.

Fuente: Ekechukwu 1999

En este proceso capas del producto no está sometido a las condiciones de un mismo aire. (Ekechukwu citado en Kumar 2017: 278). Un ejemplo de este secado es el secado de granos. Por ejemplo en la figura 17, se aprecia que la capa de producto C estará sometido a un aire más húmedo y de menor temperatura que la capa de producto A.

1.2.6.2. Secado en capa delgada

Se establece según Menzies et al. (1971) que se trata de un secado de capa delgada cuando el cambio de propiedades del aire de secado no tiene un efecto o se ignora su efecto sobre la transferencia de masa y energía. Si la capa del producto es de hasta 200mm se considera de capa delgada. Se muestra un ejemplo de este tipo de secado en la figura 18.

En el secado de ají se considerará el secado de capa delgada, pues el espesor del producto no supera los 200 mm. Considerando que un aire con propiedades similares afecta a todo el producto.



Figura 18. Secado de uvas en capa delgada.

Fuente: Belessiotis 2011

1.3. Estado del arte

El proceso de secado se puede llevar a cabo como tradicionalmente se realiza, al aire libre, usando combustibles fósiles o mediante secadores solares. A continuación, se describe las desventajas y ventajas cada uno.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del secado al aire libre, con combustibles y solar.

	Ventajas	Desventajas
Secado al aire	Proceso simple. Sin costo de inversión.	Ausencia de control del proceso. Clima puede afectar la producción. Deterioro por la radiación directa. Falta de uniformidad en el proceso.
Secado con combustibles	Proceso rápido Proceso controlado Proceso uniforme	Gran costo de inversión Necesidad de combustibles fósiles disponibles Costo energético Impacto ambiental Personal calificado
Secado solar	Mejor tiempo de secado en comparación con el secado al aire libre Ambiente más controlado. Reducción de impacto ambiental. Independencia de combustibles fósiles	Es posible no obtener la calidad deseada de los productos. Se requiere una inversión inicial. Depende del clima.

Fuente: Blanco 2016: 23

1.3.1. Clasificación de secadores

A continuación se detalla una clasificación general de secadores según su modo de operación y de aportar calor. Según su modo de operación se pueden clasificar en secadores: continuos o secador por lote (Kumar 2017: 5). Según su modo de aportar calor al producto se puede clasificar en secadores por convección, radiación o conducción, sin embargo puede existir una combinación de los mecanismos de transferencia de calor (Kumar 2017: 6).

1.3.1.1.Secadores por lote

Su operación es para pequeñas escalas, y su operación se detiene cada vez que se retira el producto seco y se intercambia por producto húmedo. Son simples en diseño y construcción, sin embargo, su eficiencia es menor a las de los secadores continuos (Kumar 2017: 5).

1.3.1.2.Secado por convección

El modo de aporte de calor es por convección, se puede tratar de aire, algún gas inerte o vapor sobrecalentado. El medio convectivo tiene dos funciones: la primera es la transferencia de calor para la evaporación del agua y la segunda es el transporte del agua evaporada. Tiene la ventaja de poseer un alto ratio de remoción de humedad (Kumar 2017: 5).

1.3.2. Clasificación de secadores solares

Según Banout los secadores solares se clasifican según las características constructivas que controlan la forma del flujo de aire y del aporte del calor al producto (2011). Según el tipo de flujo de aire puede ser por convección natural o forzada. Según la ubicación del colector de energía solar y la cámara de secado tipo directo, indirecto y combinado (Kumar 2017: 40).

1.3.2.1.Secador solar de Convección natural

Se caracterizan porque el movimiento del aire se da de forma natural por la diferencia de temperaturas o por la presión del viento. Son económicos y no necesitan dependencia de la red eléctrica (Kumar 2017: 43).

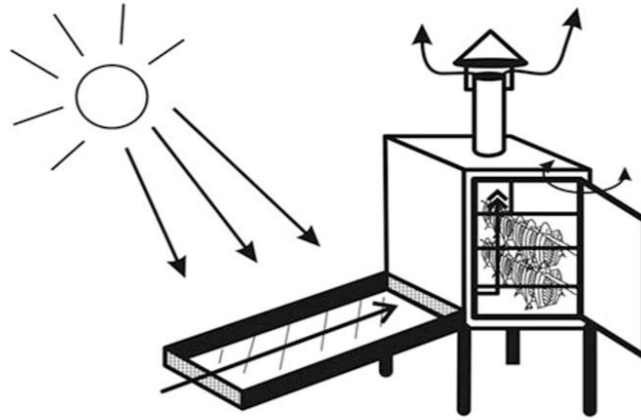


Figura 19. Secador solar de convección natural.

Fuente: Kumar 2017: 43

1.3.2.2. Secador solar de Convección forzada

Este tipo de secadores utilizan ventiladores para poder forzar una circulación del aire en la cámara de secado. Se puede obtener mucho mejores velocidades de secado en comparación con el secado con convección natural, sin embargo, en la mayoría de casos se requiere dependencia de la red o de alguna fuente de energía eléctrica (Kumar 2017: 43).

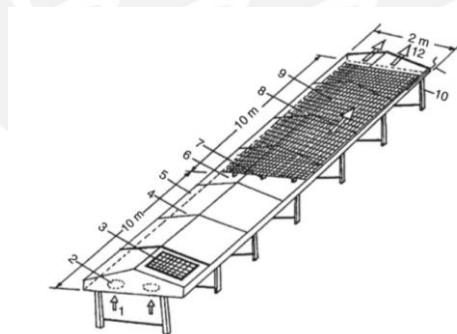


Figura 20. Secador solar de convección forzada tipo túnel

Fuente: Bala 2003

1.3.2.3.Secador solar del tipo íntegro o directo

Según Kumar la cámara de secado cumple la función adicional de ser colector solar y, por lo tanto, está expuesta a la radiación (2017: 47). Los productos pueden recibir radiación solar lo cual puede mejorar la velocidad del secado, sin embargo también puede deteriorar las propiedades de determinados productos (Kumar 2017: 47).

1.3.2.4.Secador solar del tipo distribuido o indirecto

Según Kumar en un secador indirecto la cámara de secado se encuentra protegida de la radiación solar directa. Por lo tanto, existe un colector solar que precalienta el aire antes de que entre a la cámara. El producto recibe el aire que ya ha sido calentado mediante un colector u otro medio. Se trata de un secado con control, sin embargo, es posible que existan mayores pérdidas de energía en el desplazamiento del aire hacia la cámara de secado, con lo cual el aire puede perder sus propiedades útiles para el secado (2017:47).

1.3.2.5.Secador solar del tipo combinado

Hace uso de las características de los secados directos e indirectos, por lo tanto, poseen un colector solar que permite absorber energía antes de entrar a la cámara de secado y además la cámara de secado es translúcida y está expuesta a la radiación solar (Kumar 2017: 47). En la figura 21 se puede apreciar la clasificación en su respectivo orden.

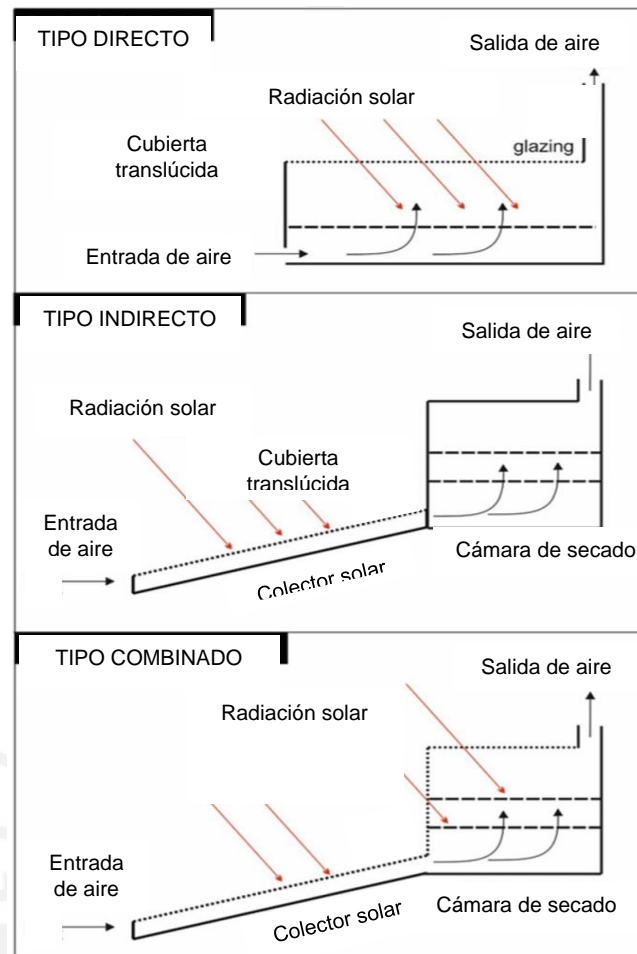


Figura 21. Ilustración del funcionamiento del secador: Directo, indirecto y mixto.

Fuente: Kumar 2017: 48

1.3.3. Tipos comunes de secadores solares

Existen diferentes tipos de secadores solares utilizados. Los más comunes son: el secador de gabinete, de cabina, el tipo invernadero, el tipo carpa, el tipo túnel y el secador de interior (Kumar 2017: 55). A continuación, se detallan sus características.

1.3.3.1. Secador de Gabinete

Este secador es uno pequeño que está diseñado para un uso familiar o de pequeña escala. El producto reciba la radiación solar directa y la convección es natural. Tienen capacidades entre 10-20 kg. Fudjoli reporta temperaturas de 20 - 30 °C superiores a la temperatura de ambiente (2010).

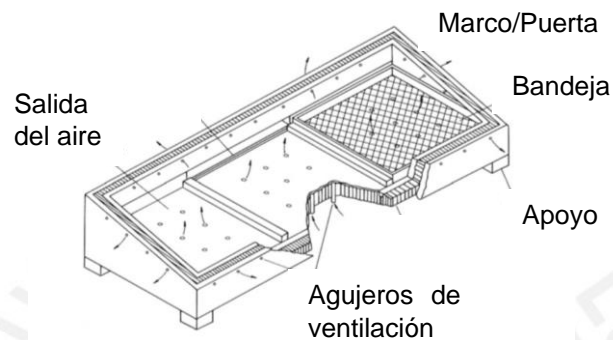


Figura 22. Secador solar de gabinete

Fuente: Ekechukwu y Norton 1999

1.3.3.2. Secador tipo carpa

Según Banout Se trata del secador solar más rudimentario y de fácil construcción, su eficiencia es baja en comparación con otros tipos de secadores solares y son secadores directos (2011).

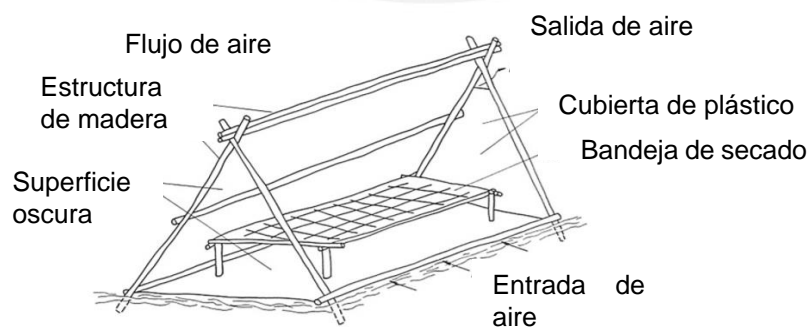


Figura 23. Secador solar tipo carpa.

Fuente: Ekechukwu 1999

1.3.3.3.Secador de cabina

Se trata del conjunto de secadores que poseen el colector solar separado de la cámara de secado, por lo que se consideran secadores de tipo indirecto o combinado (Banout 2011).

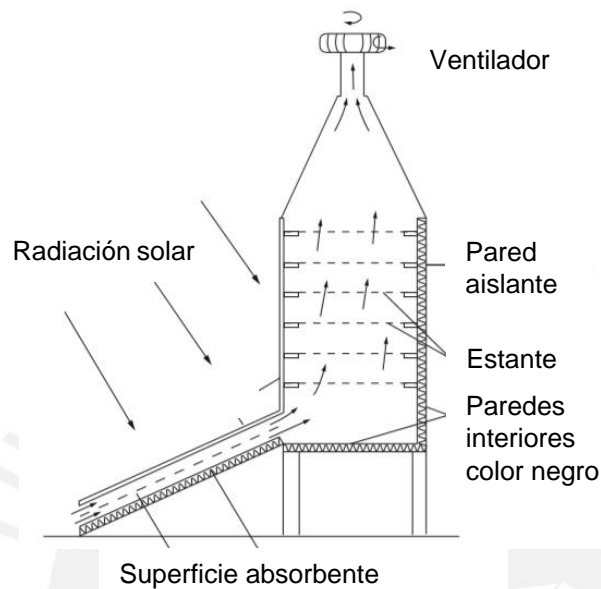


Figura 24. Secador solar de cabina.

Fuente: Ekechukwu 1999

1.3.3.4.Secador tipo túnel

Se trata de un secador con un colector solar y cámara de secado con forma de túnel, requiere el uso de ventiladores para la circulación del aire por lo que es por convección forzada. Todo el secador se acomoda de forma horizontal. Separa la cámara de secado del colector (Kumar 2017: 57). Se muestra un ejemplo de este tipo de secador en la figura 25.

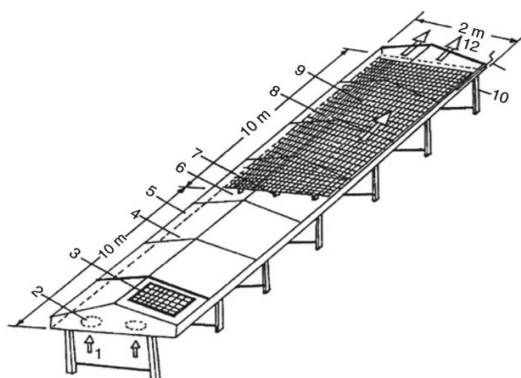


Figura 25. Secador solar tipo túnel.

Fuente: Bala 2003

1.3.3.5. Secador tipo invernadero

Según Kumar se clasifican como secadores de tipo directo, en donde el colector solar se ubica en el mismo espacio que la cámara de secado, son versátiles y de bajo costo, presentan en promedio unos 20 °C de temperatura superior a la temperatura de ambiente (2017: 55). Se muestra un ejemplo en la figura 26.

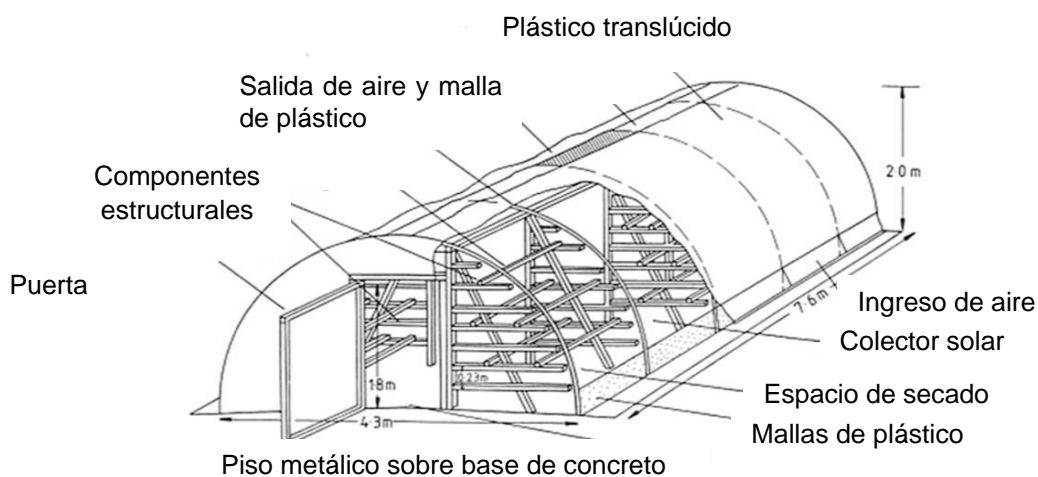


Figura 26. Secador solar de efecto invernadero.

Fuente: Kumar 2017: 54

1.4.Descripción del diseño del secador utilizado

A continuación se describe el diseño de secador utilizado y evaluado para el presente trabajo.

El secador se instaló en el campus de la PUCP, en el distrito de San Miguel en departamento de Lima. El secador se puede apreciar en la figura 27.



Figura 27. Domo secador ubicado en el campus de la PUCP.

Fuente: propia

El secador basa su estructura en un diseño existente, para otro fin, detallado en instructivos por Serrano (2010) que consiste en una estructura de plástico, liviana, de fácil construcción, montaje y costo, cuyo objetivo es de servir de refugio transitorio para personas y enseres, en caso de emergencia.



Figura 28. Domo con cubierta opaca

Fuentes: Serrano 2010

A dicho diseño se le implementan modificaciones adecuadas para su aplicación como secador como se muestra en la figura 27. Para lo cual, cuenta con un ingreso y salida de aire tal como lo muestra el esquema de la figura 29, 4 estantes para el producto, 16 bandejas, un extractor eólico y un piso de plástico. Consta de una estructura de 5 metros de diámetro y cubre una superficie útil de 20 m² y una altura de 2.7 metros aproximadamente.

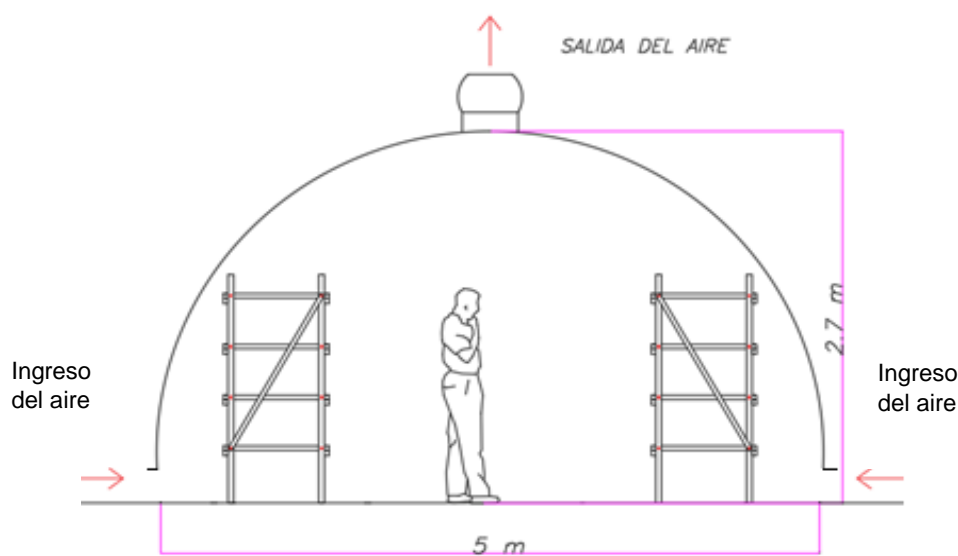


Figura 29. Esquema del domo secador.

Fuente: Propia

1.4.1. Características de la cubierta

La cubierta adaptada para su funcionamiento como secador es una cubierta para invernaderos que posee las siguientes características, que permite que se genere un efecto invernadero al interior del domo.

Tabla 2. Características de la cubierta seleccionada

Marca	AGROFILM C8 (ORBES AGRÍCOLA)
Espesor	0.205 milímetros
Transmisibilidad	81 %
Difusión de luz	67%

1.4.2. Características del piso en la base

En el suelo se coloca un plástico color azul oscuro que cubre en su totalidad el área en el que está ubicado la estructura del domo.



Figura 30. Piso utilizado para el domo

Fuente: Propia

El piso cumple la función de servir como superficie colectora de radiación solar, además de hermetizar la cámara de secado para evitar que la humedad del suelo ingrese al interior, protegiendo al producto de polvo, insectos y otros factores externos.

1.4.3. Características del extractor eólico

El diseño de secador cuenta con un extractor eólico ubicado en la parte superior del domo que se puede observar en la figura 31 y cuyas características están detalladas en la tabla 3.

Tabla 3. Características del extractor eólico

Marca	UEZU (modelo VE -12)
Diámetro de ducto	12"



Figura 31. Extractor eólico utilizado.

Fuente: Propia

El modelo del extractor utilizado nos brinda una capacidad de extracción promedio según la velocidad del viento y esto se detalla en la curva del extractor que brinda el fabricante. La marca del extractor es UEZU y el modelo corresponde a la curva de color rojo, modelo VE – 12, en la figura 32.

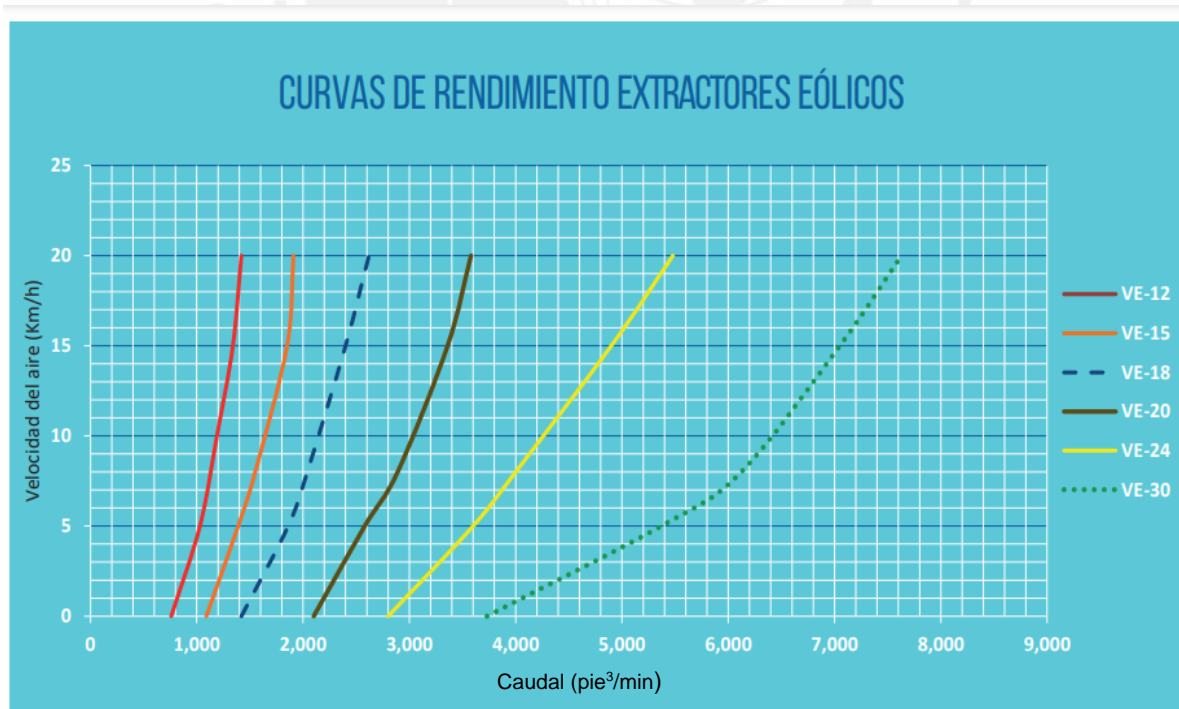


Figura 32. Curvas de rendimientos de extractores eólicos.

Fuente: UEZU 2019

1.4.3.1. Velocidad de extracción

Como se mencionó el extractor eólico posee una velocidad de extracción promedio que depende de la velocidad del viento. Para la operación del extractor eólico utilizado se ha considerado los datos de la velocidad del viento obtenido de SENAHMI correspondientes a una estación meteorológica ubicada en el distrito de Jesús María. Los datos se obtuvieron para las fechas correspondientes a las pruebas de secado y a las horas operativas del secador. Los datos completos están adjuntos en el Anexo 6. En base a la velocidad promedio, de la curva del fabricante se obtiene el caudal de extracción:

$$K = 0.52 \text{ m}^3/\text{s}$$

K : Caudal ($\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$)

1.4.4. Características de la estantería

Para ubicar al producto en el interior del domo se utilizó 4 estantes de madera de 4 niveles cada uno. Para cada nivel se utiliza una bandeja independiente, sumando en total 16 bandejas. Se especifica su ubicación en la figura 33 y 34, y se detallan un esquema en el anexo 1.

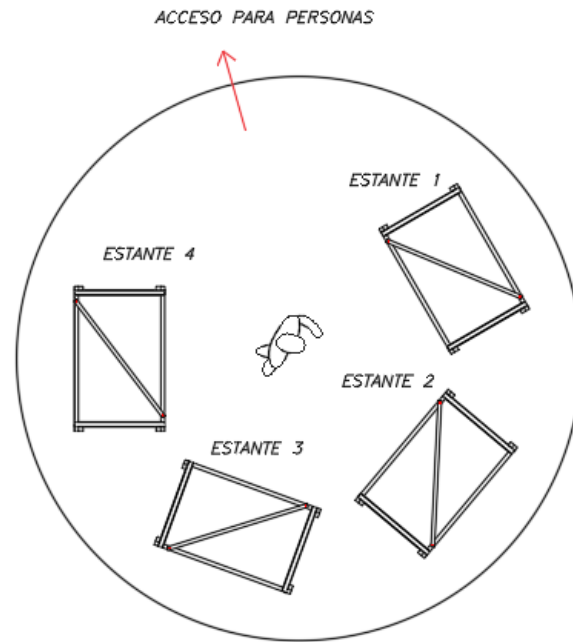


Figura 33. Esquema de la ubicación de las bandejas en vista de planta.

Fuente: Propia

Se le asigna un número a cada estante iniciando con el estante que se encuentra a la izquierda de la entrada con el número 1 y así hasta en 4. Además cada nivel de cada estante se le asigna una letra iniciando el nivel superior con la letra A y terminando el inferior con el nivel D.

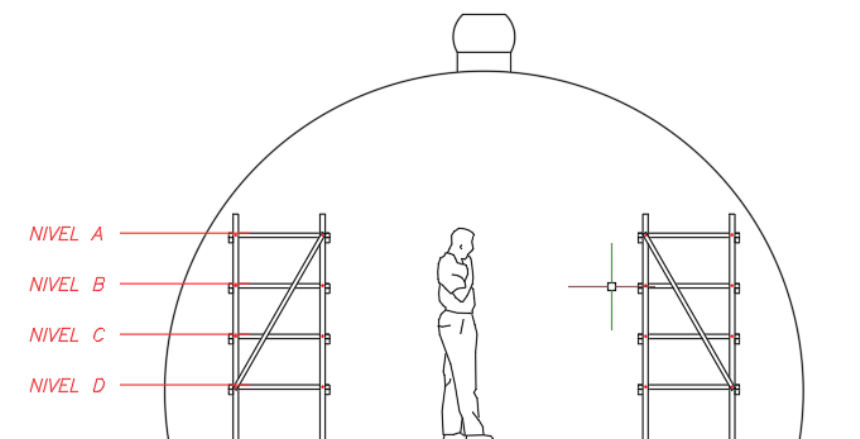


Figura 34. Esquema de ubicación de las bandejas en vista de perfil

Fuente: Propia



Figura 35. Estantes en el interior del domo.

Fuente: Propia

1.4.5. Características de operación del secador

A partir de las características descritas del proceso de secado y de los secadores se establece el modo de operación en nuestro secador tipo domo para mejorar el proceso.

- Debido a las características físicas del ají, este reduce su tiempo de secado al ser cortado (Mercer 2014: 6), por lo cual será cortado por la mitad para reducir el tiempo de secado.
- Al acumular varias capas de producto el secado podría no ser uniforme, por lo cual en las bandejas será colocado solo una capa de producto que ocupe toda el área.
- El ají amarillo debe secarse bajo sombra para mantener sus propiedades por lo cual las bandejas a utilizar son: 1B, 2B, 3B, 4B, 1C y 3C. Éstas se encuentran bajo una semisombra provocada por las bandejas superiores.

1.5. Metodología general del trabajo

A continuación se describe de forma general el orden del desarrollo del trabajo. Como se detalló existen diferentes factores que afectan al proceso de secado, estos son principalmente: la temperatura a la cual se seca el producto, el tiempo que toma el secado, la humedad del

producto obtenida del proceso de secado. Por este motivo para el secador tipo domo geodésico se obtendrán estos valores.

1.5.1. Procedimiento

En primer lugar se realizan las pruebas experimentales que nos permitirán conocer el comportamiento del secador. En este sentido se realizan las siguientes pruebas:

- Medición de la humedad inicial del producto.
- Mediciones de temperatura al interior del domo.
- Medición del tiempo de secado en diferentes cortes de ají
- Medición del tiempo de secado con ají expuesto a la sombra o a radiación solar (ambos al interior del domo)

Con los resultados de estas primeras pruebas se procede a realizar las pruebas de secado. Se realizarán dos pruebas de secado. De las pruebas de secado se obtendrá:

- El contenido de agua (humedad) del producto durante los días de secado, este valor es representado por la curva de secado.

Los resultados y el procedimiento de todas las pruebas experimentales se encuentran en el capítulo 2. Adicionalmente a las pruebas de secado realizadas se hallará mediante un modelo la curva de secado teórica del ají al interior del domo. El resultado de la curva de secado teórico se validará con el resultado obtenido de las dos pruebas experimentales de secado. El procedimiento y los resultados teóricos se muestran en el capítulo 3.

CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen las diferentes pruebas experimentales realizadas, su secuencia, los equipos utilizados y los resultados obtenidos a partir de dichas pruebas.

2.1. Pruebas realizadas

A continuación en la tabla 4 se muestran las pruebas experimentales realizadas, los resultados obtenidos de las pruebas y las unidades de dichos resultados.

Tabla 4. Pruebas experimentales

Pruebas realizadas	Resultados	Unidades
1. Pruebas de secado	Tiempo de secado	Días
	Humedad final del producto	Humedad en Base húmeda (%) y base seca
2. Mediciones de temperatura	Temperatura promedio al interior del domo	°C
	Temperatura al interior del domo a diferentes alturas	°C
3. Medición de la humedad inicial del producto	Humedad inicial del producto	Humedad en Base húmeda (%) y base seca
4. Medición del tiempo de secado en diferentes cortes de ají	Tiempo de secado	Días
5. Medición del tiempo de secado con ají expuesto a la sombra o a radiación solar (ambos al interior del domo)	Tiempos de secado	Días

Para conocer el comportamiento del secador propuesto se realizará como pruebas principales las pruebas de secado y las mediciones de temperatura al interior del domo. Adicionalmente a esas pruebas, con el fin de tener una mejor comprensión del proceso de secado del ají en el domo se realizan las pruebas enumeradas en la tabla como pruebas 4 y 5: la medición del tiempo de secado en diferentes cortes de ají, y la medición del tiempo de secado con y sin sombra ambos al interior del domo.

2.2. Instrumentación

A continuación, en la tabla 5 se describe la instrumentación utilizada y la precisión de cada instrumento.

Tabla 5. Instrumentación para las pruebas realizadas

Instrumentación	Precisión
Balanza DIGI, DS-700	+/- 5 g
Balanza analítica "SWISS MADE 321"	0.1 mg
Estufa universal "Mettler UN 30"	-
Sensor DHT21	+/- 0.5 °C

2.3. Prueba: Medición de humedad inicial del ají

El valor de humedad inicial del producto es importante, pues nos dice la cantidad de agua que debemos retirar y nos permite estimar la humedad durante los días de secado. De la misma forma, el valor de humedad final del producto determina si hemos alcanzado una humedad de conservación recomendada para el producto y además si el secado es uniforme.

2.3.1. Descripción de la prueba

La prueba se realizó en el laboratorio de Procesos Industriales de la PUCP. Se tomaron 2 muestras de ají amarillo, pertenecientes al grupo de ajés adquiridos para la prueba de secado, y se cortaron en trozos pequeños. Luego se colocó la muestra en 3 placas Petri y se pesaron cada una.



Figura 36. Muestra inicial del ají.

Fuente: propia



Figura 37. Muestra del ají picada.

Fuente: propia

Después de pesarse se colocaron en la estufa a 135 °C por 2 horas para retirar toda la humedad. Luego de las 2 horas se retiraron y se volvieron a pesar para obtener la cantidad de agua perdida. Este procedimiento para obtener la humedad de un producto corresponde al establecido en el método A.O.A.C.2000. 394.06.



Figura 38. Muestra final pesada

Fuente: Propia

2.3.2. Resultados

Se muestran los resultados de las humedades tomadas de las muestras de ají.

Tabla 6. Resultados de las humedades registradas de las muestras de ají.

Placa	Masa Placa (g)	Masa inicial muestra (g)	Masa final muestra (g)	Masa de agua (g)	Humedad (%)
A	44.2364	10.3958	1.1997	9.1961	88.4598
B	44.7965	10.1142	1.2963	8.8179	87.1834
C	45.2772	10.2643	1.3027	8.9616	87.3084

Las humedades encontradas no corresponden a las humedades sugeridas en la bibliografía para el ají, es posible que se deba al tipo de ají utilizado para las pruebas. Para nuestro caso se utilizará el promedio de los 3 porcentajes obtenidos. Entonces obtenemos:

$$M_o = 87.6505 \%$$

M_o : Humedad inicial del ají en base húmeda

2.4.Prueba: Medición de las temperaturas en el domo

Se midieron de forma simultánea la temperatura al interior del domo y la temperatura ambiental. El fin de esta medición es conocer la diferencia promedio de temperaturas durante el día que el domo permite obtener. Así mismo, se midió la temperatura a diferentes alturas en el interior del domo para poder determinar la existencia de alguna diferencia de temperaturas que podría modificar la uniformidad del secado.

2.4.1. Descripción de la prueba

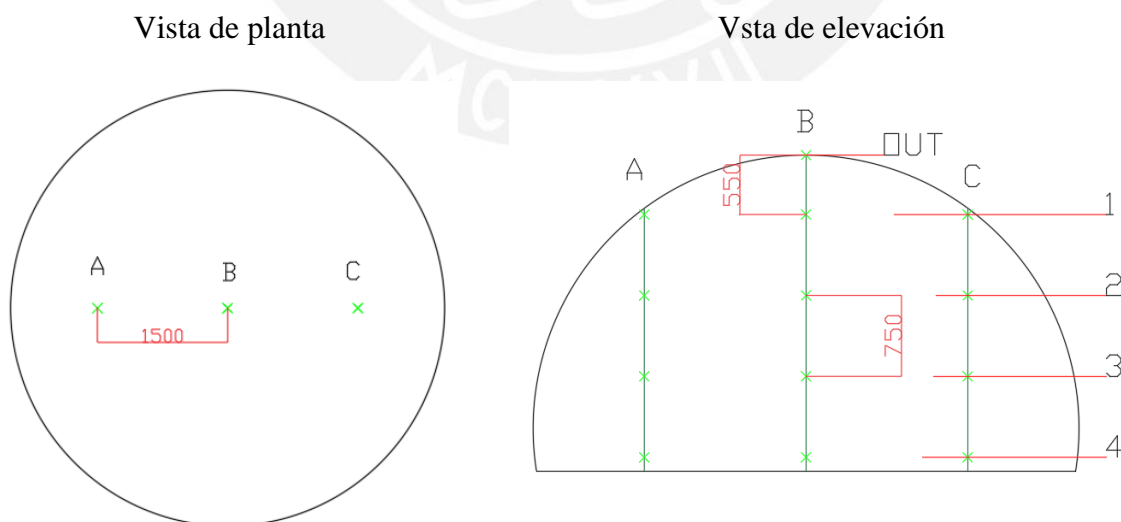


Figura 39. Ubicación sensores: vista de planta y ubicación de los sensores en vista perfil.

Fuente: Propia

Se utilizaron 12 sensores al interior del domo y 2 sensores al exterior. La ubicación de los sensores de temperatura se muestra en la figura 44. Las mediciones se realizaron durante los meses correspondientes a la temporada de secado del ají, los días y las mediciones están registrados en el anexo 3. Fueron tomadas con intervalos de 1 minuto y durante todo el día.

2.4.2. Adquisición de datos

Para la adquisición de dato se utilizó un Arduino MEGA con programación desarrollada para recibir y almacenar la información proveniente de los sensores de temperatura.

2.4.3. Resultados

A continuación se muestran las curvas de temperatura: temperatura promedio en el interior y temperatura a diferentes alturas para los días evaluados. Los resultados se muestran desde las 5 am hasta las 7 pm. El rango de operación del secador se considera desde las 10:00 am hasta las 15:00 pm.

Temperatura al interior del domo

Se presenta a continuación las gráficas para 3 días referenciales de los días evaluados en el secado: La curva de temperatura interior corresponde al valor de temperatura promedio de los sensores al interior del domo.

Día 1: 09/02/2020

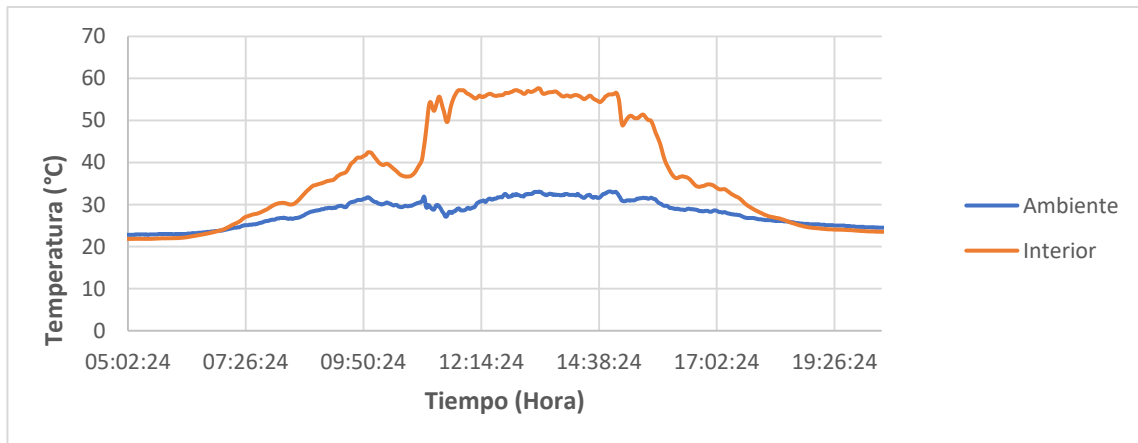


Figura 40. Día 1: Temperatura interior y ambiental (°C) vs. Tiempo (Hora)

Día 2: 10/02/2020

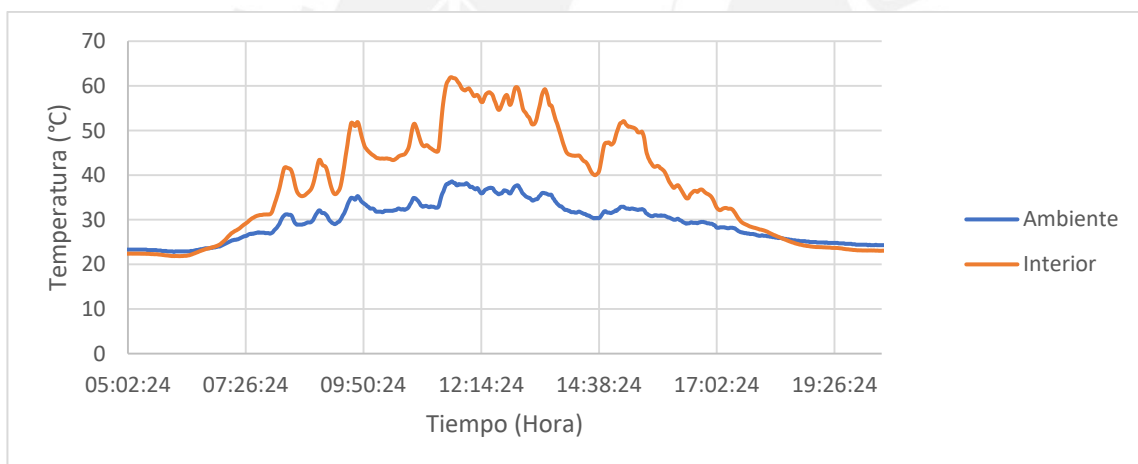


Figura 41. Día 2: Temperatura interior y ambiental (°C) vs. Tiempo (Hora)

Aproximadamente, para los días evaluados se encuentra entre las 10:00 y las 15:00 una diferencia de 17 °C entre la temperatura de ambiente y la temperatura interior del domo. Esta diferencia se encuentra dentro del rango de funcionamiento para los secadores de efecto invernadero establecidos (Anil Kumar, 2017).

Día 3: 11/02/2020

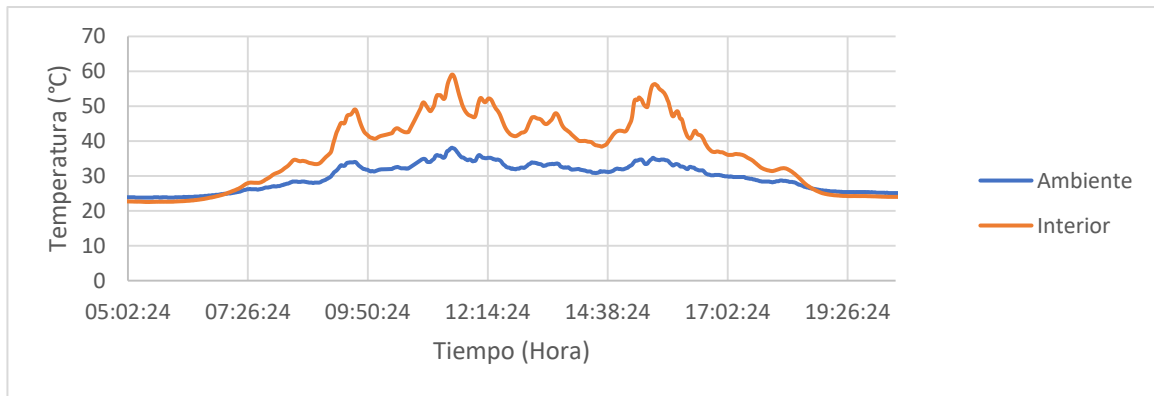


Figura 42. Día 3: Temperatura interior y ambiental (°C) vs. Tiempo (Hora)

La temperatura promedio a las mismas horas para el interior del domo es de 50 °C y del ambiente es de 32 °C. Si consideramos la temperatura promedio en el interior del domo esta se encuentra por debajo del valor máximo recomendado por Donald G. Mercer (2014) para el secado de frutos. Sin embargo, encontramos picos que sí superan dicha temperatura, por ejemplo, se registra una temperatura máxima de 62 °C en el interior del domo, temperatura podría dañar al producto.

Curva de temperatura interior a diferentes alturas

A continuación, se han generado las gráficas que constatan la diferencia de temperatura entre los distintos niveles dentro del domo. Para lo cual se presenta dicha evaluación en los días 9, 10 y 11 de Febrero.

Día 1: 09/02/2020

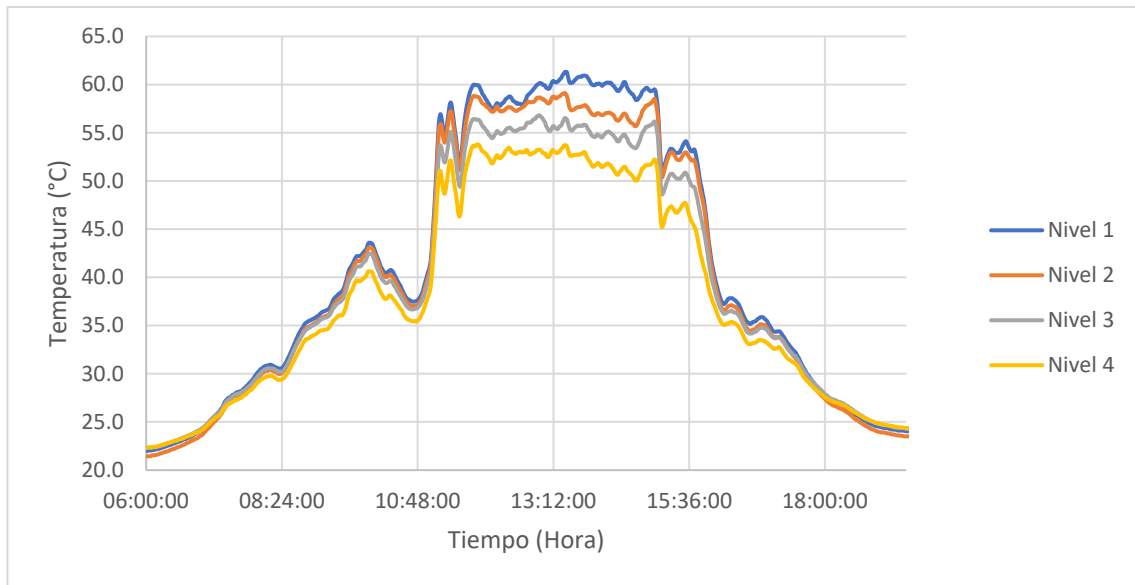


Figura 43. Día 1: Temperaturas interiores del domo (°C) vs. Tiempo (Hora)

Día 2: 10/02/2020

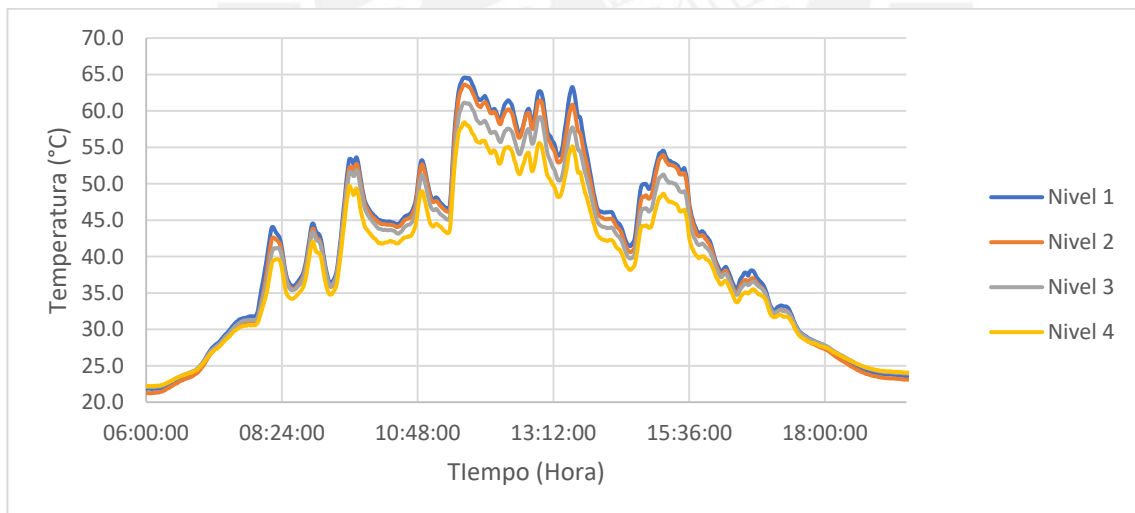


Figura 44. Día 2: Temperaturas interiores del domo (°C) vs. Tiempo (Hora)

Día 3: 11/02/2020

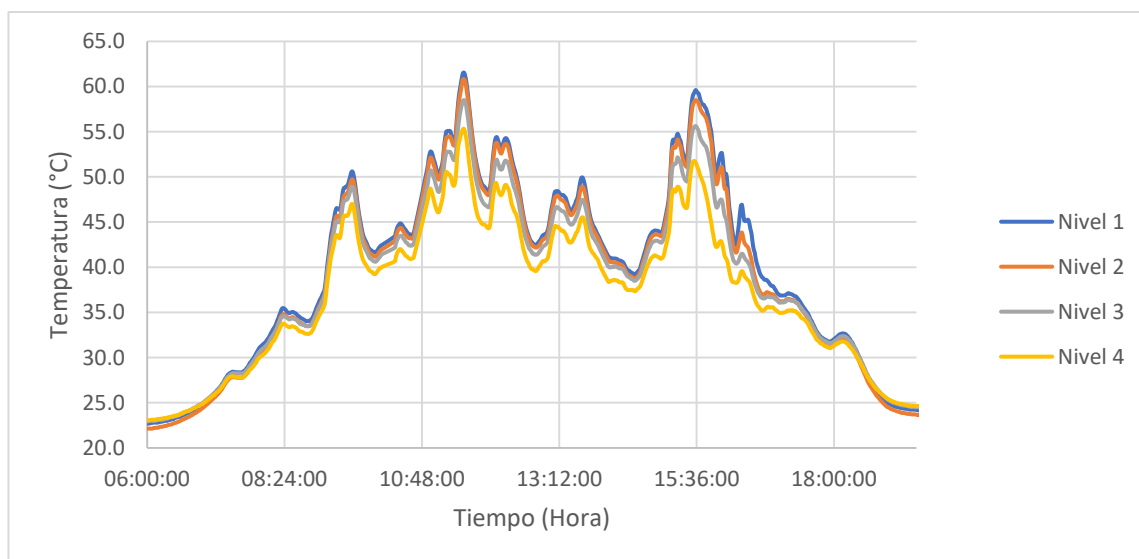


Figura 45. Día 3: Temperaturas interiores del domo (°C) vs. Tiempo (Hora)

Las curvas muestran que para los días evaluados existe una diferencia de temperaturas en las diferentes alturas del domo. Las temperaturas más altas a lo largo de las horas del día mostrado para las 3 gráficas corresponden a la curva de nivel 1 que corresponde a la mayor altura, mientras que las más bajas corresponden al nivel 4 que es el nivel más bajo. En general se observa que a mayor altura tendremos mayores temperaturas y a menor altura tendremos menores temperaturas. Esta diferencia se puede apreciar con mayor claridad en la primera gráfica. Y aproximadamente entre las 10:00 y las 15:00 obtenemos los siguientes promedios:

Tabla 7. Temperaturas promedio a diferentes alturas en el domo

Nivel	1	2	3	4
Temperatura promedio (°C)	51.7	50.7	49.1	46.8

En promedio, la diferencia entre el nivel 1 y el nivel 4 es de 5 °C. Es un valor considerable considerando que la temperatura es el parámetro de mayor influencia en el tiempo de secado

(Donald G. Mercer, 2014). En promedio la mayor diferencia de temperatura entre los niveles corresponde al nivel 3 y 4 con un valor de 2.3 °C, es posible que se deba al ingreso corrientes de aire por la sección inferior del domo.

2.5. Medición del efecto de los diferentes tipos de corte de ají

Con el propósito de conocer el efecto del corte en el ají en el tiempo de secado se realizará la prueba de secado para el ají con diferentes cortes. Se varía en cada prueba la superficie de ají expuesta.

2.5.1. Descripción de la prueba

Para variar la superficie de ají expuesta se compara 4 disposiciones diferentes del ají: el ají entero, el ají con agujeros, el ají cortado por la mitad, el ají en tiras.



Figura 46. Pruebas para ají con diferentes cortes

Fuente: Propia

2.5.2. Resultados

De la figura 47, se observa que la disposición del ají que seca primero es el ají cortado en tiras con 5 días seguido por el ají con agujeros y por la mitad con 6 días, y por último el ají entero con 10 días. El corte de cualquier forma contribuye a una clara disminución del tiempo de secado comparado con el ají entero

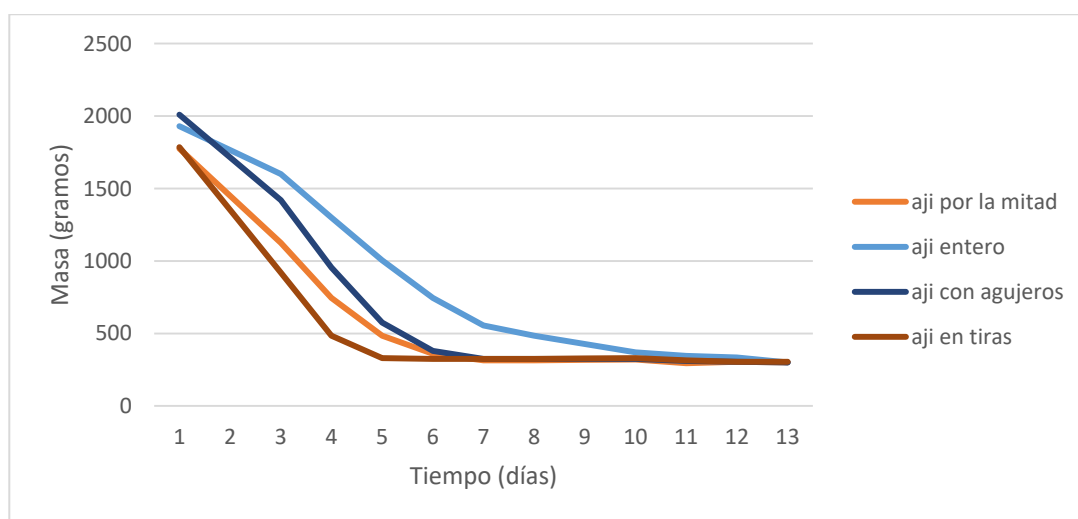


Figura 47. Efecto del corte del ají en el tiempo de secado

Esto corresponde a lo mencionado (Donald G. Mercer, 2014) sobre las características propias de la superficie del producto, que en el caso del ají protegen al fruto de no perder su humedad. Es así que el corte del ají permite reducir el tiempo de secado necesario hasta en un 50%.

2.6. Medición del efecto de la sombra

Para comprender mejor el secado del ají al interior del domo se realiza una comparación en el tiempo de secado el efecto de exponer al ají a la sombra o al sol directo, ambos casos al interior del domo.

Se colocaron 2kg de ají en cada bandeja y se realizaron las pruebas en simultáneo. Se pesaron las bandejas cada día en la noche.

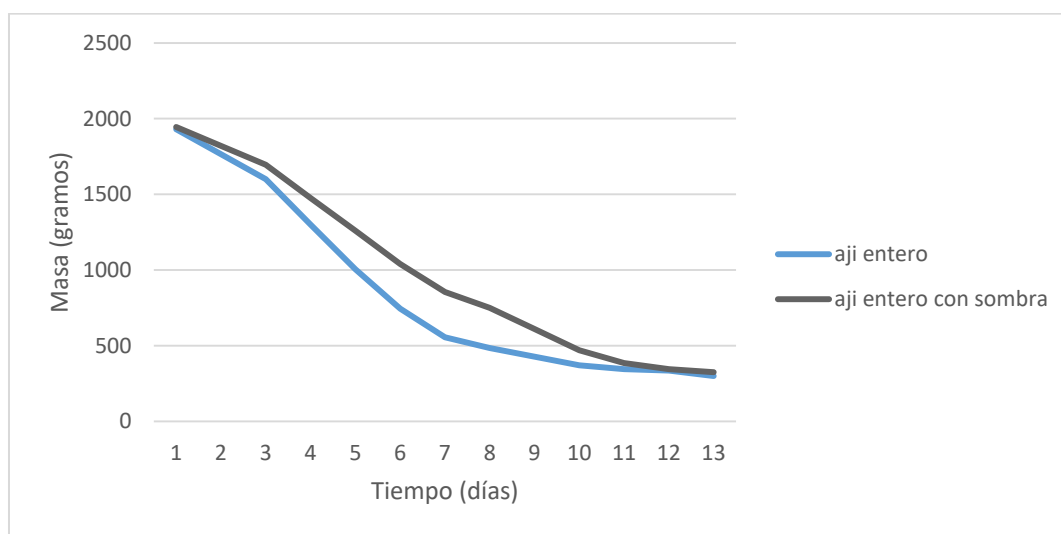


Figura 48. Efecto de la exposición al sol para ajíes secados dentro del domo.

Para ambos ajíes secados en el interior del domo, para el ají con exposición directa a la radiación se tendrá un tiempo menor de secado con 10 días, mientras uno en la sombra tendrá mayor tiempo de secado con 12 días. Sin embargo, la exposición directa al sol tiene un efecto negativo sobre el color del producto y este deterioro de color se relaciona también con un deterioro en los valores nutricionales del producto (Donald G. Mercer, 2014).



Figura 49. Comparación entre ají expuesto al sol (izquierda) y ají en la sombra (derecha). Fuente: Propia

2.7. Pruebas de secado

Finalmente se realizaron las pruebas de secado para poder obtener la curva de secado, el tiempo de secado y la humedad final del producto.

Tabla 8. Descripción de las pruebas de secado.

Ítem		Cantidad de pruebas	Carga	Fecha
1	Pruebas de secado	2	18 kg	Prueba 1: 25 Febrero – 2 de Marzo del 2020 Prueba 2: 9 Marzo – 16 Marzo del 2020

Primero se compró una cantidad aproximada de 25 kg de ají entero y se realizó el corte por la mitad, retirando el pedúnculo, el tejido placentario interior y las semillas.



Figura 50. Preparación del ají.

Fuente: Propia

Luego se colocó el ají extendido en las bandejas, aproximadamente con 3 kg de ají por bandeja y además se colocó una bandeja al exterior para tener un punto de comparación. Las bandejas utilizadas en el interior fueron las: 1B, 2B, 3B, 4B, 1C y 3C.



Figura 51. Bandeja al interior del domo (izquierda) y bandeja al ambiente(derecha)

Fuente: Propia

Se colocaron sensores al nivel de las bandejas, al exterior y a la salida del domo para medir la humedad relativa y la temperatura. Se pesó diariamente las bandejas en la noche durante 8 días.



Figura 52. Disposición de los estantes en las pruebas de secado

Fuente: Propia

2.7.1. Resultados

De las pruebas de secado se obtienen los siguientes resultados: curva de secado 1 y 2. Las curvas se presentan en base seca, pero la discusión se realiza en base húmeda. Las conversiones entre ambas se encuentran en la tabla 9 y 10.

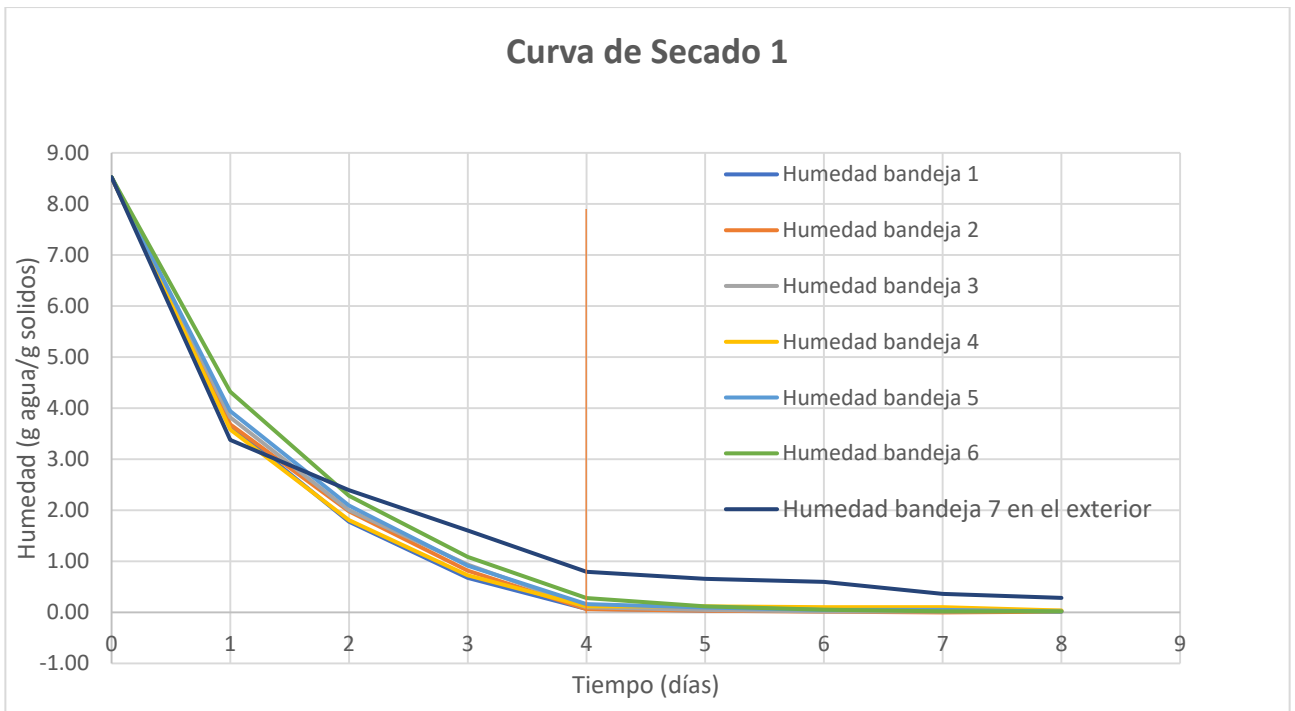


Figura 53. Contenido de humedad (base seca) vs. Tiempo (días).

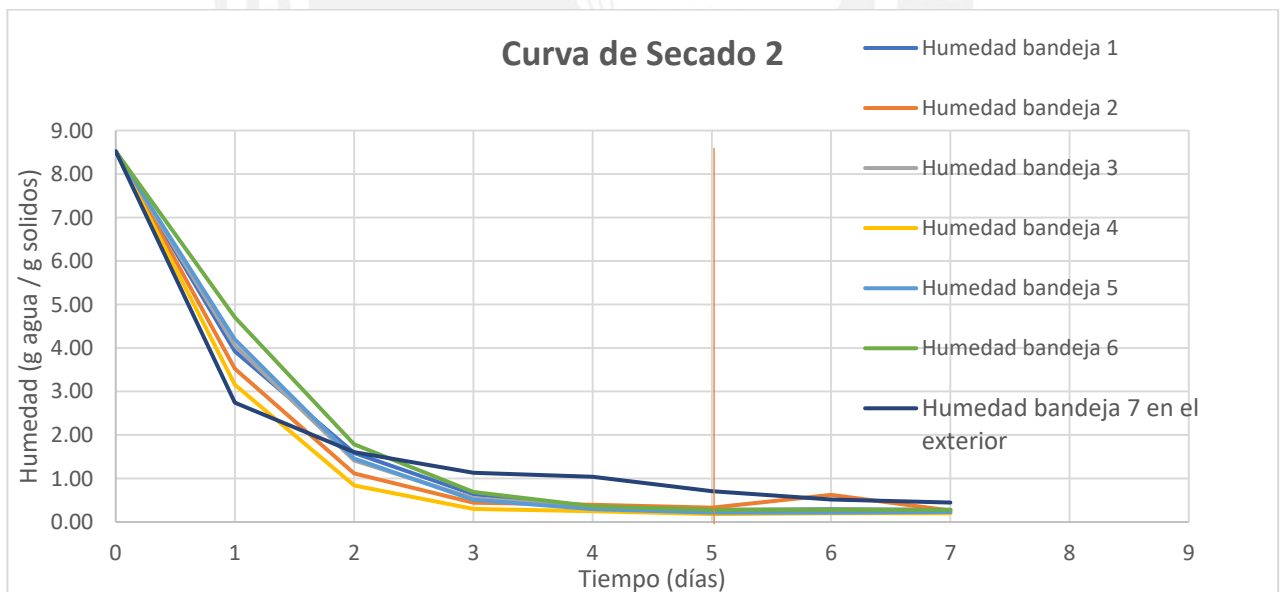


Figura 54. Contenido de humedad (base seca) vs. Tiempo (días).

Las curvas de secado obtenidas siguen la tendencia esperada. Presenta las mayores variaciones de humedad al inicio del secado y luego alcanza una humedad de equilibrio constante.

Para ambas curvas de secado la humedad de equilibrio se alcanza al día 4 y a partir de ese día se presentan variaciones despreciables. Las humedades alcanzadas en el equilibrio corresponden a aproximadamente 2 % para la curva de secado 1 y de 16 % para la curva de secado 2. La diferencia entre los valores de humedad alcanzados en las diferentes pruebas corresponde a que las condiciones climáticas fueron diferente para cada prueba. Se presentaron mejores condiciones para la primera prueba que para la segunda.

El valor de la humedad recomendado está entre 12 – 20 % y ambos valores se encuentran dentro del rango y por lo tanto son productos aptos para la conservación (Rivasplata 2009). Para la primera prueba se alcanza este valor en el día 4 y para la segunda prueba en el día 5.

Todas las bandejas presentan para el mismo día un valor final de humedad de equilibrio, por lo tanto, para las posiciones de bandejas utilizadas se presenta un secado uniforme y no se requiere rotación de bandejas. En las tablas a continuación, se mostrará la variación de la masa de agua y la masa total, así como las humedades en base seca y húmeda para las pruebas 1 y 2 considerando la carga completa, las tablas para cada bandeja por separado se adjuntarán en los anexos.

Tabla 9. Datos diarios para la carga total en el domo durante la prueba 1.

Día	Masa total (g)	Masa de agua (g)	Masa de sólidos (g)	Humedad base húmeda (%)	Humedad base seca
0	17425	15508.25	1916.8	89.0%	8.09
1	8845	6928.3	1916.8	78.3%	3.61
2	5470	3553.3	1916.8	65.0%	1.85
3	3400	1483.3	1916.8	43.6%	0.77
4	2070	153.3	1916.8	7.4%	0.08
5	1965	48.3	1916.8	2.5%	0.03

Tabla 10. Datos diarios para la carga total en el domo durante la prueba 2.

Día	Masa total (g)	Masa de agua (g)	Masa de sólidos (g)	Humedad base húmeda (%)	Humedad base seca
0	17425	15508	1917	89%	8.09
1	9015	7098	1917	79%	3.70
2	4330	2413	1917	56%	1.26
3	2780	863	1917	31%	0.45
4	2440	523	1917	21%	0.27
5	2285	368	1917	16%	0.19
6	2270	353	1917	16%	0.18
7	2275	358	1917	16%	0.19

En la tabla 11, se muestra una comparación de la cantidad de agua evaporada del producto por día durante las pruebas 1 y 2. Se puede apreciar que la máxima cantidad de agua evaporada se da en el primer día, correspondiente a 8.6 kg para la prueba 1 y de 8.4 kg para la prueba 2.

Tabla 11. Variación de agua por día para la prueba 1, 2

	PRUEBA 1	PRUEBA 2
Día	Agua que pierde el ají (g)	Agua que pierde el ají (g)
0	-	-
1	8580	8410
2	3375	4685
3	2070	1550
4	1330	340
5	105	155
6	50	15
7	15	-5
8	30	-

De los 18 kg de producto inicial se obtiene al final aproximadamente 2 kg de ají en ambas pruebas de secado 1 y 2. El ají luego del proceso se muestra a continuación en la figura 55.



Figura 55. Producto final obtenido.

Fuente: Propia

En la figura 56 se puede apreciar una comparación del producto final obtenido con el secado al interior del domo y con la bandeja de ají secada al ambiente.



Figura 56. Secado al interior del domo (izquierda), secado al ambiente (derecha). Fuente: Propia.

CAPÍTULO 3: DISEÑO ENERGÉTICO DEL SISTEMA

En el presente capítulo se describe el procedimiento de cálculo para poder hallar la curva de secado total de forma teórica. Para obtener la curva de secado total se divide la curva de secado y se obtienen por separado en dos etapas a velocidad constante (etapa 1) y el tiempo de secado con velocidad en caída (etapa 2), como se muestra en la figura 57.

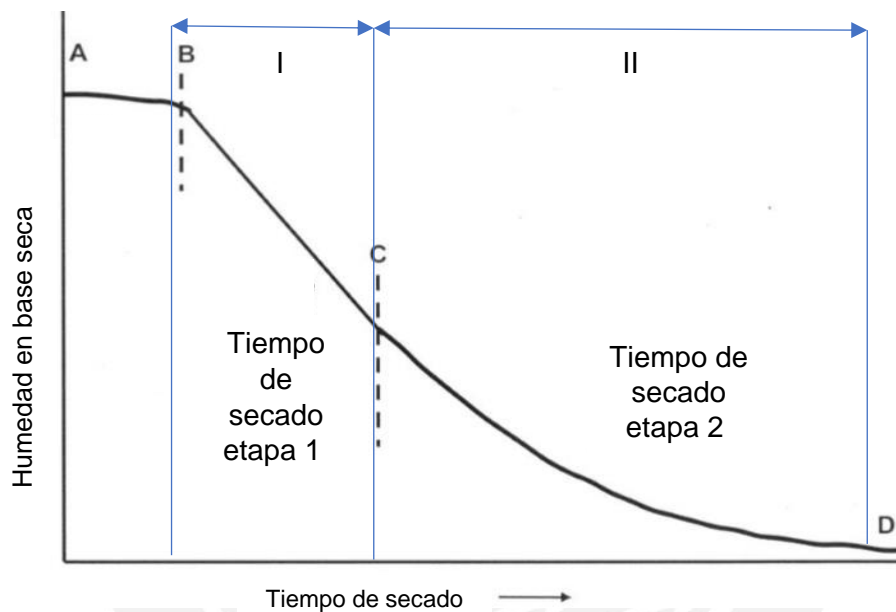


Figura 57. Etapas en la curva de secado

Fuente: Mercer 2014: 12

En la curva de secado existen tres valores importantes: la humedad inicial del producto, la humedad crítica del producto y la humedad final o en equilibrio del producto. La primera etapa del secado ocurre entre la humedad inicial y la humedad crítica, y la segunda etapa del secado ocurre entre la humedad crítica y la humedad en el equilibrio. En nuestro caso, el contenido de la humedad inicial es el obtenido a partir de las pruebas experimentales. Para la humedad crítica y la humedad en el equilibrio se usarán los valores reportados por Angeles (2011).

Se presentan a continuación:

$$X_o = 8.52$$

$$X_c = 5.4$$

$$X_e = 0.057$$

$$X_o: \text{Contenido de humedad inicial } \left(\frac{\text{kg agua}}{\text{kg masa seca}} \right)$$

$$X_c: \text{Contenido de humedad crítica } \left(\frac{\text{kg agua}}{\text{kg masa seca}} \right)$$

$$X_e: \text{Contenido de humedad en el equilibrio } \left(\frac{\text{kg agua}}{\text{kg masa seca}} \right)$$

Para la determinación de los valores de la curva de humedad se va a proceder mediante una aproximación diferente según las características de cada etapa siguiendo las recomendaciones brindadas por Singh (2009) y que se muestran en la tabla 12. Adicionalmente a las consideraciones específicas para cada etapa, para ambas etapas de secado se considera que el secado tiene una duración de 6 horas por día, desde las 9:30 am hasta las 3:30 pm y fuera de este lapso no existe pérdida de humedad del producto.

Tabla 12. Descripción de los tiempos de secado

	Etapa de secado 1	Etapa de secado 2
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Depende de la energía absorbida por la superficie del ají 	<ul style="list-style-type: none"> - Depende del transporte del agua desde el interior del ají hacia su superficie.
Método de cálculo utilizado	<ul style="list-style-type: none"> - Transferencia de calor - Modelo de comportamiento térmico 	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo por difusividad de la humedad interna del producto

3.1. Curva de secado para la primera etapa

Como se mencionó en el capítulo 2.7. el ají posee una capa exterior impermeable que lo protege, la superficie que pierde el agua es la superficie interior del ají, por lo tanto el ají estará cortado, abierto por la mitad y expuesto, esta misma disposición del ají será evaluada en el cálculo.



Figura 58. Ají cortado (izquierda) y superficie del ají expuesto en bandeja (derecha).
Fuente: Propia

En primera etapa de secado el aporte de energía hacia la superficie va a determinar la velocidad de secado y por lo tanto el tiempo de secado. La capa superficial interior del ají se encuentra húmeda y al mismo tiempo absorbe calor, hay una transferencia de calor del aire hacia la superficie y una transferencia de masa de la superficie hacia el aire.

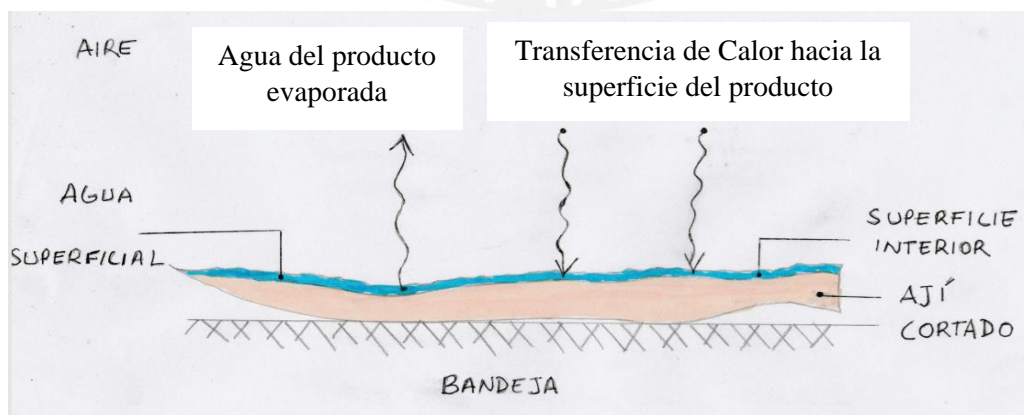


Figura 59. Esquema de los procesos de transferencia de calor y masa en el ají cortado.
Fuente: Propia

3.1.1. Modelo de comportamiento térmico

A partir de la descripción realizada, se establece un volumen de control para el ají. De esta forma se puede analizar las interacciones del ají con sus alrededores. En la figura 60 se puede apreciar el volumen de control establecido y sus interacciones con el entorno.

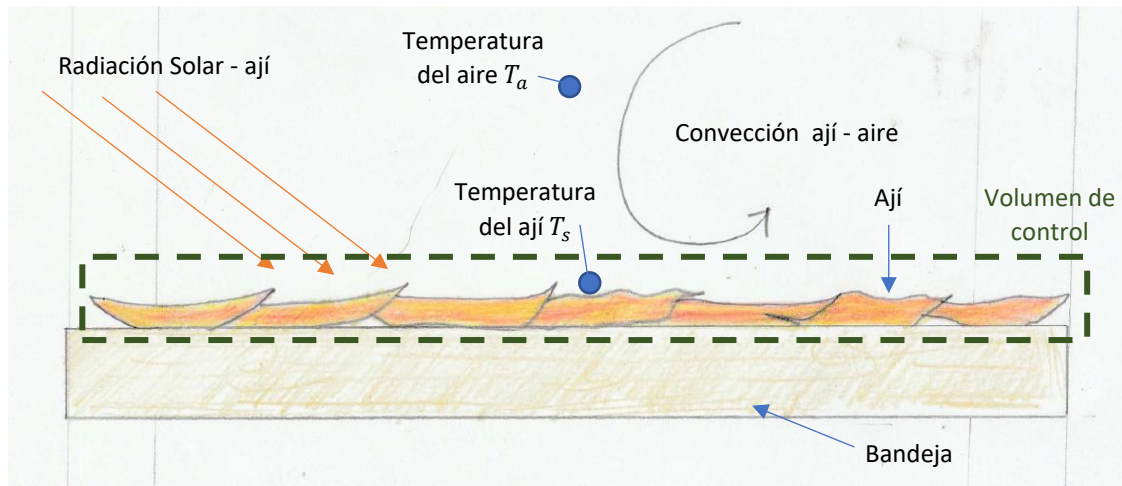


Figura 60. Transferencia de calor en el ají

Fuente: propia

3.1.2. Consideraciones

A partir del planteamiento del modelo y para proceder con el cálculo se hacen las siguientes consideraciones para la primera etapa del secado.

- Se aproxima la temperatura de la superficie del ají a la temperatura de bulbo húmedo del aire según recomendaciones (Sighn 2009).
- No se considera una estratificación del aire al interior del domo.
- La influencia de la estructura del domo y de las bandejas, sobre el ají son despreciables.
- Se considera que el secado es de capa delgada.
- Se considera que entre el ají y el aire alrededor opera un mecanismo de convección natural debido a los siguientes motivos: El extractor eólico opera de forma intermitente, además la velocidad del aire en la sección horizontal donde se ubica el ají es baja (0.025

m/s si fuera uniforme en toda el área), sin embargo el flujo del aire no es uniforme y se da principalmente por los espacios con menor obstrucción por lo tanto no atraviesa directamente las bandejas y no se ha utilizado ventiladores que generen un flujo a través del producto.

3.1.3. Valores de entrada

Los valores de temperatura y humedad relativa al interior del domo, y de radiación solar son variables dependiendo de la hora y para los diferentes días de secado. Por lo tanto, para el cálculo se ha considerado un día representativo desde las 8:30 am hasta las 3:30 pm con los datos medidos promedios durante las pruebas de secado.

Este día representativo toma los datos experimentales medidos para la temperatura y humedad relativa al interior del domo durante las fechas de las pruebas de secado y se encuentran en el anexo 6 y para la radiación se toma los valores meteorológicos medidos por la especialidad de Física de la PUCP durante las dos pruebas de secado que se encuentran en el anexo 5. A partir de estos datos se presenta a continuación el día representativo sobre el cual procederán los cálculos.

Tabla 13. Día representativo

Hora	Temperatura promedio del aire interior del domo	Humedad relativa promedio del aire interior del domo	Radiacion solar
-	°C	%	W/m ²
10:00:00 a.m.	45.8	27.7	719.6
11:00:00 a.m.	50.6	17.1	878.4
12:00:00 p.m.	52.2	13.6	924.0
01:00:00 p.m.	50.7	14.5	853.4
02:00:00 p.m.	50.3	14.8	804.4
03:00:00 p.m.	48.8	16.1	664.7

3.1.4. Planteamiento del cálculo del calor total hacia la superficie

En la primera etapa de secado la energía absorbida por el producto es utilizada para lograr un cambio de fase del agua en la superficie del producto. Según Cengel para un caso de secado se considera que el calor total aportado a la superficie del ají es igual al calor latente de vaporización del agua por la velocidad de secado del producto (2011: 840).

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_c * h_L \quad (5)$$

\dot{Q}_s : *Transferencia de calor total en la superficie del ají (W)*

h_L : *Entalpía de vaporización del agua ($\frac{kJ}{kg}$)*

\dot{m}_c : *velocidad de secado ($\frac{kg}{s}$)*

El término \dot{Q}_s incluye al calor total aportado hacia la superficie del ají, por lo cual el valor del calor total aportado hacia la superficie es el valor del calor aportado por convección ají –aire sumado con el valor aportado por radiación solar.

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_c + \dot{Q}_r \quad (6)$$

\dot{Q}_s : *Transferencia de calor en la superficie (W)*

\dot{Q}_c : *Transferencia de calor por convección ají – aire (W)*

\dot{Q}_r : *Trasnferencia de calor por radiación solar – ají (W)*

En los cálculos presentados a continuación se utilizará los datos para las 11:00 am para mostrar el procedimiento de cálculo y se presentarán los resultados para el resto de horas durante el día representativo.

3.1.5. Cálculo del calor por convección ají - aire

El valor de la transferencia de calor por convección depende del coeficiente convectivo, el área de la superficie del ají y de la diferencia entre la temperatura del aire alrededor del ají y la temperatura de la superficie del ají.

$$\dot{Q}_c = h * A * (T_a - T_s) \quad (7)$$

h : Coeficiente convectivo $\left(\frac{W}{m^2 * K}\right)$

A : Área de la superficie del ají (m^2)

T_a : Temperatura del aire ($^{\circ}C$)

T_s : Temperatura de la superficie del ají ($^{\circ}C$)

3.1.5.1. Cálculo del coeficiente convectivo

Para obtener el calor aportado por convección, en primer lugar, debemos hallar el coeficiente convectivo. Debido a que no existe ningún equipo que genere un flujo de aire directo sobre el producto se considera un mecanismo de convección natural sobre el aire y el ají. Para una convección natural obtenemos el coeficiente de convección a partir de la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{h * L_c}{k} = C * (Gr * Pr)^n = C * Ra^n \quad (8)$$

Nu : número de Nusselt

h : Coeficiente convectivo $\left(\frac{W}{m^2 * K}\right)$

L_c : Longitud característica (m)

k : Conductividad térmica del fluido $\left(\frac{W}{m * K}\right)$

C y n : Constantes de la configuración geométrica de la superficie y del régimen de flujo

Gr : Número de Grashof

Pr : Número de Prandtl

Ra : Número de Rayleigh

Y además,

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_a - T_s) * Lc^3}{\mu^2} \quad (9)$$

g : Gravedad ($\frac{m}{s^2}$)

μ : Viscosidad cinemática del fluido ($\frac{m^2}{s}$)

T_s : Temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)

T_x : Temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie ($^{\circ}C$)

β : Coeficiente de expansión volumétrica ($\frac{1}{T}$ para gases ideales) ($1/K$)

T_f : Temperatura de película ($^{\circ}C$)

En primer lugar calcularemos el número de Grashof, para el cálculo de coeficiente de convección. Para las 11:00 am los datos para la temperatura del aire y la humedad relativa al interior del domo son:

$$T_a = 50.6 \text{ }^{\circ}C$$

$$H_a = 17.1 \%$$

Según Sighn (2009) La temperatura de la superficie del producto se considera igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire a las condiciones del aire al interior del secador. De la carta psicrométrica mi temperatura de bulbo húmedo, y por lo tanto mi temperatura de la superficie del ají.

$$T_s = 27.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Todas las propiedades son evaluadas a la temperatura promedio entre la temperatura de la superficie del producto (T_s) y la del fluido (T_a), a esta temperatura se le conoce como temperatura de película.

$$T_f = \frac{(T_s + T_a)}{2}$$

$$T_f = 39.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Las propiedades evaluadas a la temperatura de película T_f son:

$$\mu = 1.68 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr = 0.735$$

$$k = 0.0265 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$$

$$B = \frac{1}{T_F + 273} = 0.003211 \text{ } \text{K}^{-1}$$

Para determinar la longitud característica y la expresión del número de Nusselt recurrimos a tablas de recomendaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies.

Configuración geométrica	Longitud característica L_c	Intervalo de Ra	Nu
Plástico horizontal (Área superficial A y perímetro p) a) Superficie superior de una placa caliente (o superficie inferior de una placa fría)	A_s/p	10^4-10^7	$Nu = 0.54Ra_l^{1/4}$ (9-22)
		10^7-10^{11}	$Nu = 0.15Ra_l^{1/3}$ (9-23)
b) Superficie inferior de una placa caliente (o superficie superior de una placa fría)		10^5-10^{11}	$Nu = 0.27Ra_l^{1/4}$ (9-24)

Figura 61. Recomendaciones empíricas para la convección natural sobre superficies.

Fuente: Cengel 2011: 528

Dadas las características geométricas de las bandejas y del ají se considera a una bandeja de ají como una superficie horizontal. Además, dado que esta superficie del ají se encuentra más fría que su entorno entonces se utiliza la opción b) que corresponde a superficie superior de una placa fría. Entonces podemos considerar a la longitud característica como:

$$L_c = \frac{A_s}{p} \quad (10)$$

A_s : Área de la superficie de una bandeja (m^2)

p : Perímetro de la superficie de una bandeja (m)

Cada bandeja posee las siguientes dimensiones:

$$A_s = 0.874 \text{ m}^2$$

$$p = 3.82 \text{ m}$$

Y entonces se calcula la longitud característica para una bandeja,

$$L_c = \frac{0.874}{3.82} = 0.23 \text{ m}$$

Podemos calcular Grashof:

$$Gr = \frac{9.81 * 0.003211 * (50.6 - 27.5) * 0.23^3}{(1.68 * 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 3.06 * 10^7$$

Y también ahora el número de Rayleigh:

$$Ra = Gr * Pr = 3.06 * 10^7 * 0.735 = 2.25 * 10^7$$

Nos encontramos dentro del rango en donde es posible aplicar las correlaciones experimentales recomendadas según la figura 61, entonces podemos calcular Nusselt como:

$$Nu = C * (Ra)^n = 0.27 * Ra^{0.25}$$

$$Nu = 0.27 * (2.25 * 10^7)^{0.25}$$

$$Nu = 18.60$$

Y finalmente podremos calcular el coeficiente convectivo mediante

$$Nu = \frac{h * Lc}{k}$$

$$h = \frac{Nu * k}{Lc}$$

$$h = \frac{18.60 * 0.0265}{0.23}$$

$$h = 2.16 \frac{W}{K * m^2}$$

Siguiendo el procedimiento mostrado se calculó el valor del coeficiente convectivo durante las horas del día representativo y se muestran a continuación:

Tabla 14. Coeficientes convectivos

Hora	Coeficiente convectivo
-	H (W/Km2)
10:00:00 a.m.	2.01
11:00:00 a.m.	2.16
12:00:00 p.m.	2.21
01:00:00 p.m.	2.19
02:00:00 p.m.	2.18
03:00:00 p.m.	2.15

3.1.5.2. Calor por convección

Ya se conocen los valores de los coeficientes convectivos, con lo cual podemos utilizar para hallar la transferencia de calor por convección.

A continuación se calcula el valor de transferencia de calor por convección para las 11:00 am y se muestra el resultado para las otras horas.

$$\dot{Q}_c = h * A * (T_a - T_s) \quad (11)$$

$$\frac{\dot{Q}_c}{A} = 2.16 * (50.6 - 27.5)$$

$$\frac{\dot{Q}_c}{A} = 50 \frac{W}{m^2}$$

Dado que en nuestro secado se utilizaron 6 bandejas totalmente llenas de ají, las cuales ocupan un espacio total de $5.24 m^2$, entonces el calor total suministrado a esa superficie por convección es:

$$\dot{Q}_c = 262 W = 0.262 kW$$

Para el resto de horas del día este valor se muestra a continuación:

Tabla 15. Calor por convección ají -aire

Hora	Calor por convección
-	\dot{Q}_c (kW)
10:00:00 a.m.	0.182
11:00:00 a.m.	0.262
12:00:00 p.m.	0.295
01:00:00 p.m.	0.279
02:00:00 p.m.	0.274
03:00:00 p.m.	0.257

Se puede observar que la superficie del ají absorbe calor por convección. Este calor es máximo al medio día. Esto se debe a que a esa hora la temperatura del aire al interior del domo es mayor.

3.1.6. Cálculo del calor por radiación solar - ají

Además del calor por convección, la superficie del ají recibe calor por radiación solar. El calor absorbido depende de la absorptividad del ají, la irradiación solar, la transmisibilidad de la cubierta y el factor por la semisombra.

$$\dot{Q}_r = I_t * \alpha_p * A * \tau_c * F$$

I_t : Irradiación solar ($\frac{W}{m^2}$)

α_p : Absorptividad del producto

τ_c : Transmisibilidad de la cubierta

F : Factor por semisombra

El valor de la irradiación solar es obtenido de los registros de los datos ambientales de la irradiación solar horizontal medidos por la especialidad de física PUCP. Para el cálculo se utiliza el valor promedio de la irradiación para las 11:00 am.

$$I_t = 878.4 \frac{W}{m^2}$$

La transmisibilidad de la cubierta se obtiene de la información brindada por el fabricante de la cubierta y se muestra en el capítulo 1.4.1.

$$\tau_c = 0.81$$

La absorptividad de la superficie producto se obtiene a partir de las aproximaciones que nos brinda la figura 62. Nos detalla que se puede aproximar la radiación solar absorbida dependiendo del color de la superficie.

Color de la superficie	Factor de absorción- Fracción de la radiación incidente absorbida
Superficies blancas y lisas	0.25 - 0.40
Gris, gris oscuro	0.40 - 0.50
Verde, rojo y marrón	0.50 - 0.70
Marrón oscuro v azul	0.70 - 0.80
Azul oscuro a negro	0.80 - 0.90

Figura 62. Radiación solar absorbida por superficies

Fuente: The Engineering Toolbox: 2020

Para nuestro caso, el aji se encuentra en la categoría de superficies color verde, rojo y marrón. Por lo cual obtenemos el siguiente coeficiente de absorptividad:

$$\alpha_p = 0.6$$

Debido a que nuestro producto se encuentra bajo la sombra de las bandejas superiores el 50 % de la radiación solar logra atravesar la malla, por lo cual se obtiene el factor por semisombra. Esta información la brinda el fabricante Globalpa (2021).

$$F = 0.5$$

Con los valores obtenidos calculamos la transferencia de calor por radiación para las 11:00 am y luego se muestran los resultados para el resto de horas durante el día.

$$\dot{Q}_r = I_t * \alpha_p * A * \tau_c * F$$

$$\dot{Q}_r = 878.4 * 0.6 * 5.24 * 0.81 * 0.5$$

$$\dot{Q}_r = 1121 \text{ W} = 1.121 \text{ kW}$$

Tabla 16. Calor por radiación solar

Hora	Calor por radiación solar
-	\dot{Q}_r (kW)
10:00:00 a.m.	0.918
11:00:00 a.m.	1.121
12:00:00 p.m.	1.179
01:00:00 p.m.	1.089
02:00:00 p.m.	1.026
03:00:00 p.m.	0.848

En la tabla 16 Se puede observar que el calor por radiación es mayor al medio día, esto corresponder a que a esa hora tenemos la mayor radiación solar.

3.1.7. Calor total hacia la superficie

De la ecuación (6) podemos hallar el calor suministrado del aire hacia la superficie con los valores hallados de calor por convección aire – ají y por radiación solar- ají. Para las 11:00 am se muestra el resultado.

$$\dot{Q}_s = \dot{Q}_c + \dot{Q}_r$$

$$\dot{Q}_s = 262 + 1121$$

$$\dot{Q}_s = 1383 \text{ W} = 1.383 \text{ kW}$$

EL resultado para el resto de horas se muestra a continuación.

Tabla 17. Calor total

Hora	Calor total
-	\dot{Q}_s (kW)
10:00:00 a.m.	1.100
11:00:00 a.m.	1.383
12:00:00 p.m.	1.474
01:00:00 p.m.	1.368
02:00:00 p.m.	1.301
03:00:00 p.m.	1.106

La superficie de ají absorbe calor. En la tabla 17 se puede observar que Este calor es mayor al medio día (12:00 pm) y menor en la mañana (11:00 am) y en la tarde (3:00 pm) estos valores corresponden a 1.474, 1.100 y 1.106 kW respectivamente. Esto se debe a que al medio día tenemos los mayores valores de radiación y de temperatura al interior del domo, mientras que en la mañana estos valores son los menores esto se muestra en la tabla13. Estas diferencias en el calor absorbido por la superficie del ají tienen como resultado un comportamiento diferente del producto para cada hora del día.

3.1.8. Determinación de la velocidad de secado

Para obtener el flujo de secado se hace uso de la ecuación (5). h_L Corresponde al calor latente de vaporización del agua a la temperatura de bulbo húmedo del aire (27.5 °C) y se obtiene de tablas de saturación del agua.

$$h_L = 2436.3 \frac{kJ}{kg}$$

Ahora resolviendo la ecuación (5) podemos obtener la cantidad de agua que pierde el ají por por segundo para las 11:00.

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{Q}_s}{h_L}$$

$$\dot{m}_c = \frac{1.383}{2436.3}$$

$$\dot{m}_c = 5.68 * 10^{-4} \frac{kg}{s} = 2.05 \frac{kg}{h}$$

Para poder construir la curva de secado es necesario obtener la velocidad de secado en unidades de humedad en base seca.

$$\dot{X} = \frac{\dot{m}_c}{m_{seco}}$$

\dot{X}_c : velocidad de secado $\left(\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ solido} * h}\right)$

m_{seco} : masa de ají seco (kg)

Podemos hallar la masa de producto seco en el ají, es la diferencia entre la masa total inicial y la masa de agua inicial.

$$m_{seco} = m_{total} - m_{0\text{agua}-i}$$

m_{total} : masa de producto total inicial (kg)

$m_{0\text{agua}-i}$: masa de agua inicial (kg)

m_{seco} : masa de ají seco (kg)

Entonces la masa de ají seco será:

$$m_{seco} = 17.4 - 15.6$$

$$m_{seco} = 1.8 \text{ kg}$$

Con estos valores podemos hallar la velocidad de secado en unidades de base seca para las 11:00 am.

$$\dot{X} = \frac{2.05}{1.83} = 1.12 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg solido} * \text{h}}$$

A continuación se muestran los resultados para el resto de horas.

Tabla 18. Velocidad de secado del ají

Hora	velocidad de secado	velocidad de secado (humedad)
-	\dot{m}_c (kg/h)	\dot{X} (kg agua/ kg seco*h)
10:00:00 a.m.	1.63	0.89
11:00:00 a.m.	2.05	1.12
12:00:00 p.m.	2.18	1.19
01:00:00 p.m.	2.02	1.11
02:00:00 p.m.	1.92	1.05
03:00:00 p.m.	1.64	0.89

En la tabla 18 se puede observar la velocidad de secado para las diferentes horas del día.

Debido a que la velocidad es proporcional al calor aportado hacia la superficie del ají, existe la máxima velocidad a medio día (12:00 pm) y las menores velocidades en la mañana (10:00 am) y en la tarde (3:00 pm).

3.1.9. Valor de la humedad durante la primera etapa

Con la velocidad de secado para la primera etapa podemos saber cómo varía la humedad en el tiempo desde el inicio del secado, podemos hallar cuánto tiempo duró el secado de la primera etapa.

Tabla 19. Humedad del producto en la primera etapa

Hora	Horas de secado	Velocidad de secado (1/ h)	Humedad producto (kg agua /kg seco)	Humedad producto (%)	Masa del producto
09:00:00 a.m.	0	0.00	8.52	0.90	17.43
10:00:00 a.m.	1	0.89	7.63	0.88	15.80
11:00:00 a.m.	2	1.12	6.52	0.87	13.75
12:00:00 p.m.	3	1.19	5.32	0.84	11.57

En la tabla 19 se muestra la variación en la humedad del producto en base seca por hora. La primera etapa del secado ocurre desde el valor de la humedad inicial hasta la humedad crítica. La humedad crítica tiene un valor de 5.3 kg agua/kg sólido. Con las velocidades de secado calculadas la humedad varía desde un valor inicial de 8.52 obtenido experimentalmente hasta un valor final de 5.3, que corresponde a la humedad crítica, en un tiempo de 3 horas. En ese lapso de tiempo la masa del ají varía desde 17.43 kg hasta 11.57 kg, perdiendo en total 5.86 kg de agua.

3.2. Tiempo de secado para la segunda etapa

En la segunda etapa del secado predominarán los mecanismos internos, la pérdida de agua depende de la velocidad de transporte a través del producto (Mercer 2014: 5). Esta etapa inicia con la humedad crítica y continúa hasta que llega a una humedad de equilibrio.

Las expresiones utilizadas para determinar este tiempo dependen de la forma geométrica y la estructura interna del producto (Sighn 200: 673). Para productos con geometría plana similar a la disposición del ají utilizado en este caso se usará:

$$\frac{(X - X_e)}{(X_c - X_e)} = \frac{8}{\pi^2} * \exp\left(\frac{-\pi^2 * D * t}{4 * d_c^2}\right) \quad (13)$$

X : Contenido de humedad requerido $\left(\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ masa seca}}\right)$

X_c : Contenido de humedad crítica $\left(\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ masa seca}}\right)$

d_c : Dimensión característica (m)

D : Difusividad de la masa $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

X_c : Contenido de humedad crítica $\left(\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ masa seca}}\right)$

t : Tiempo (segundos)

En esta fórmula podemos despejar la humedad requerida (X) y de esta forma calcular el valor de esta humedad para un tiempo determinado.

$$X = \left(\frac{8}{\pi^2} * \exp\left(\frac{-\pi^2 * D * t}{4 * d_c^2}\right)\right) * (X_c - X_e) + X_e$$

La dimensión característica es la mitad del espesor del ají y el valor de la difusividad promedio para el ají es tomado de Panagiotou para el secado de ají (2004:18). El valor del espesor del ají es medido experimentalmente y corresponde a 4 mm.

A continuación se muestran los valores:

$$d_c = 0.0025 \text{ m}$$

$$D = 5.8 * 10^{-11} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Por lo tanto, calcularemos como ejemplo la humedad obtenida luego de un transcurso de 3 horas o 10800 segundos de la segunda etapa de secado.

$$X = \left(\frac{8}{\pi^2} * \exp \left(\frac{-\pi^2 * 9.7 * 10^{-11} * 10800}{4 * 0.0025^2} \right) \right) * (5.4 - 0.057) + 0.057$$

$$X = 3.0 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg seco}}$$

Luego de 3 horas de secado desde el inicio de la segunda etapa se obtiene una humedad en base seca de 3.0 kg agua/kg sólido. De esta misma forma es posible hallar los valores de humedad para cualquier instante de tiempo desde el inicio de la segunda etapa de secado.

3.3. Curva de secado teórica

Se han resuelto los valores de la humedad en el tiempo para la primera y para la segunda etapa de secado. A continuación se presenta la curva de secado teórica obtenida. Esta curva incluye a la primera y a la segunda etapa de secado y muestra la variación de la humedad, en base seca, por hora.

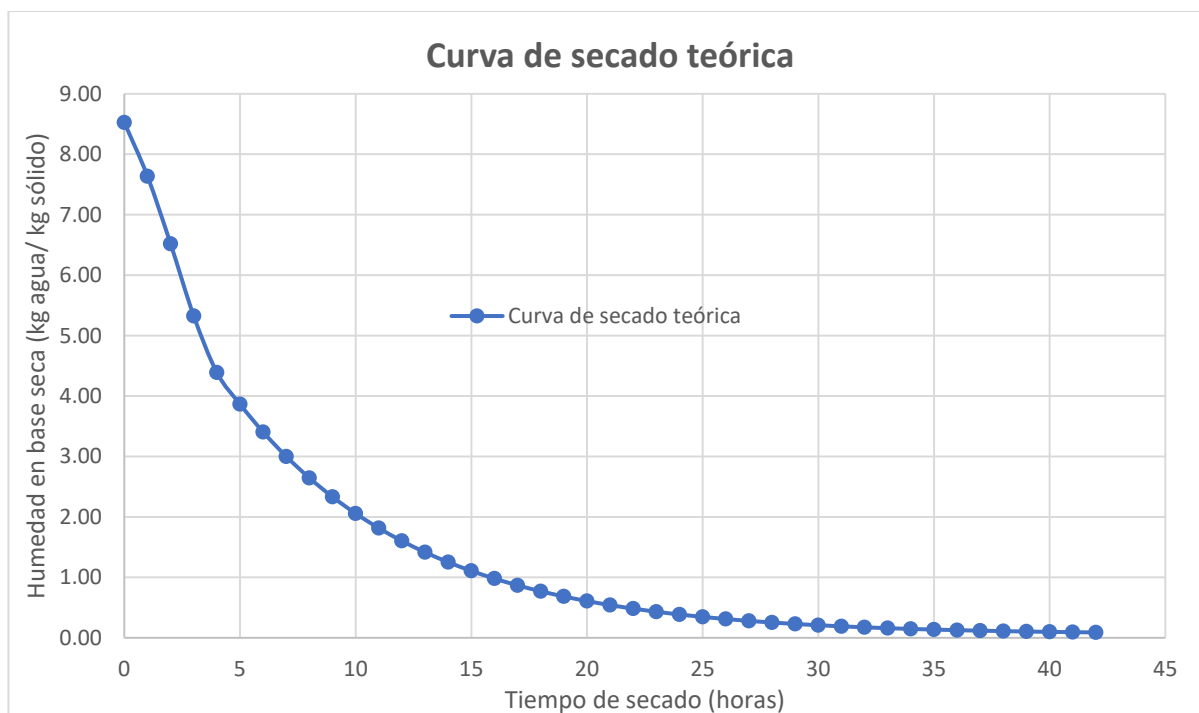


Figura 63. Humedad en base seca vs. Tiempo

En la curva de secado se muestra como varía el contenido de humedad en el tiempo. La curva se elaboró a partir del modelo planteado. Los valores de la humedad se muestran para 42 horas de secado, dado que se están considerando 6 horas de secado por día, la gráfica considera en total 7 días de secado.

Se observa que la mayor pérdida de la humedad se da durante las primeras horas del secado. Tal como se mencionó en el capítulo 1.2. el valor de conservación del producto se da a una humedad 12 – 20 % en base húmeda o de 0.136 – 0.25 en base seca para el ají amarillo. Este valor de humedad requerido se obtiene luego de 28 horas de secado, por lo tanto se obtiene luego de 5 días al interior del domo según el cálculo teórico. Los resultados teóricos completos se muestran en el anexo 7 del presente documento.

3.4. Validación del modelo con los resultados experimentales

Con los resultados teóricos se procede a realizar la comparación con los resultados experimentales. A continuación se muestra la humedad en base seca durante los días de secado.

Se muestran los resultados teóricos, y los de la prueba experimental 1 y 2.

Tabla 20. Humedad del ají teórico, y en la prueba 1 y 2

	Teórica	Prueba 1	Prueba 2
Día	Humedad del producto (kg agua /kg seco)	Humedad del producto (kg agua /kg seco)	Humedad del producto (kg agua /kg seco)
0	8.52	8.52	8.52
1	3.40	3.83	3.93
2	1.60	1.99	1.37
3	0.77	0.86	0.52
4	0.39	0.13	0.33
5	0.21	0.07	0.25
6	0.13	0.05	0.24
7	0.09	0.04	0.24

En la tabla 21 se muestra el valor de la masa de ají durante los días de secado. Se muestran los resultados teóricos, y de la prueba experimental 1 y 2.

Tabla 21. Masa del ají teórica, y en la prueba 1 y 2

	Teórica	Prueba 1	Prueba 2
Día	Masa del producto (kg)	Masa del producto (kg)	Masa del producto (kg)
0	17.43	17.43	17.43
1	8.06	8.85	9.02
2	4.76	5.47	4.33
3	3.24	3.40	2.78
4	2.54	2.07	2.44
5	2.21	1.97	2.29
6	2.06	1.92	2.27
7	1.99	1.90	2.28

Se grafica la variación de la humedad en base seca del producto durante los días de secado de los resultados teóricos con los resultados de las dos pruebas experimentales. Las gráficas se muestran a continuación en la figura 64.

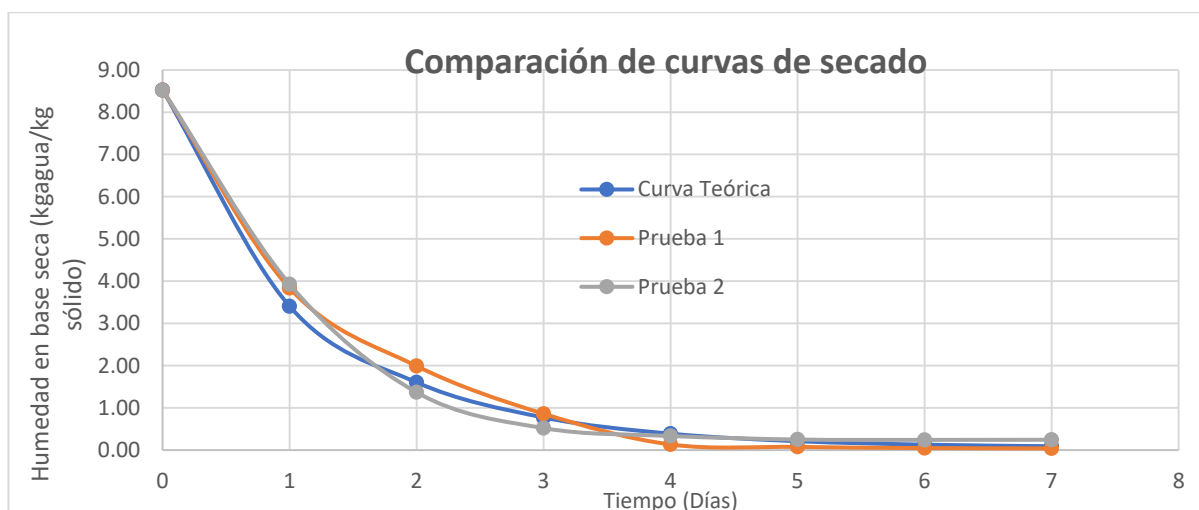


Figura 64. Comparación curvas de secado

La máxima diferencia entre el resultado teórico y experimental es de 0.52 kg agua/sólido, este se muestra entre el resultado teórico y el de la prueba 2 en el día 1 de secado, y se puede observar en la tabla 20. El valor promedio de la diferencia entre los resultados experimentales y el teórico es de 0.17 kg agua/kg sólido.

Para validar los resultados teóricos con los experimentales, se calcula el valor del coeficiente de determinación para los valores de la humedad en base seca. Este nos muestra el nivel de concordancia entre los valores experimentales y los valores teóricos obtenidos (Hossain 2007). Un valor de 0 significa ninguna concordancia entre el valor experimental y el teórico mientras que un valor de 1 significa una completa concordancia entre el valor experimental y el teórico.

EL coeficiente de determinación sigue la siguiente fórmula:

$$R^2 = \frac{(\sum v_t * v_e)^2}{\sum v_e^2 * \sum v_t^2}$$

R^2 : *coeficiente de determinación*

v_t : *Valor teórico*

v_e : *valor experimental*

Se evaluó el coeficiente para los resultados teóricos con cada una de las pruebas realizadas (2 en total) y se promediaron los resultados, y se obtuvo lo siguiente:

$$R^2 = 0.995$$

Se obtiene un valor del coeficiente de determinación cercano a 1, lo cual indica lo cual indica una alta concordancia en el modelo propuesto para determinar el comportamiento de la humedad del ají, puesto en validación a través de las dos pruebas de secado realizadas.

CONCLUSIONES

Se evalúa y se presenta un secador solar, basado en una estructura de fácil armado, fácil fabricación, portátil, bajo costo y que trabaja únicamente con energías renovables, en el distrito de San Miguel, departamento de Lima, para el secado del ají amarillo. A partir de lo expuesto, se concluye lo siguiente:

En el interior del domo la temperatura del aire es adecuada para el secado, al elevar la temperatura en 20 °C en promedio con respecto a la temperatura ambiental, entre las 10 am y las 3pm. Esta temperatura se encuentra dentro del rango sugerido para el secado productos alimenticios y es adecuada para el ají amarillo.

A partir de las curvas de secado experimentales, se obtiene un tiempo secado para lograr la humedad final requerida de 12 - 20 % en 4 – 5 días. Se mejora comparado con el tiempo de secado tradicional que es de 12 – 20 días. Por otro lado, el producto secado al ambiente, procesado en simultáneo con la prueba de secado al interior del domo, no logró su humedad final requerida al cabo de 7 días de secado.

Se desarrolló un modelo teórico para obtener la curva del producto. El modelo desarrollado se validó con los resultados experimentales y se encontró una buena concordancia en los resultados. Por lo tanto, el modelo teórico nos representa adecuadamente el comportamiento del proceso de secado del ají en el domo para las condiciones evaluadas.

Por las razones expuestas, se concluye que el secador tipo domo geodésico tiene las cualidades de un buen secador solar, logrando mejorar el proceso de secado del ají amarillo y representa una alternativa útil y económica para el agricultor o procesador.

BIBLIOGRAFÍA

ARUN, MUJUMDAR

1986 Handbook of Industrial Drying. Tercera Edición. Singapur: CRC Press

ANGELES QUEIROLO, Carlos

2012 Modelado de la cinética del secado del pimiento (*Capsicum annum*) variedad Piquillo. Perú.

BANOUT J.

2011 Design and performance evaluation of a double-pass solar dryer for drying of red chilli (*Capsicum annum* L.). Volumen 85. Solar Energy. pp. 506–515.

BELESSIOTIS VG, DELYANNIS E

2011 Solar Drying. Volumen 85. Solar Energy. pp. 1665–1691.

BLANCO, LUCIA CANO

2016 Guía para el desarrollo de Proyecto de secado en comunidades rurales.

EKECHUKWU O.

1999 Review of Solar-energy Drying systems I: an overview of drying principles and theory. Volumen 40. Energy Conversion and Management. pp. 593–613.

GLOBALLPA

2021 Globallpa malla diamante ficha técnica. Lima, Perú.

<https://www.globallpa.com/storage/ft/GM-1702.pdf>

HOSSAIN, MOHAMMED

2006 Single-Layer drying characteristics and colour kinetics of red chilli. International Journal of Food Science and Technology.

JAGER, MATTHIAS

2013 Las Cadenas de Valor de los Ajíes Nativos del Perú. Lima, Perú: Biodiversity International.

KUMAR, Anil, OM PRAKASH

2017 Solar Drying Technology: Concept, Design, Modeling, Economics, and Environment. India: Springer.

MERCER, Donald G.

2014 An Introduction to the Dehydration and Drying of Fruits and Vegetables. University of Guelph, Ontario.

MENZIES DJ

1971 Digital Simulation of agricultural Dryer Performance. Volumen 16. Journal of Agricultural Engineering Research.. pp. 223–244.

MINAGRI

2018 Plan de desarrollo sostenible de las especies del género Capsicum 2018-2028. Pimientos y Ajíes.

MOTT Robert, Joseph UNTENER

2015 Mecánica de Fluidos. Séptima Edición. USA: Pearson.

PALO-TEJADA, Juan

2020 Secado del ají Panca en un secador solar fotovoltaico de tubos al vacío. Arequipa, Perú.

RIVASPLATA, Cesar

2009 Planificación y diseño de una planta solar para ají. Tacna, Perú.

<https://es.slideshare.net/robvaler/planificacin-y-diseo-de-una-planta-de-secado-solar-para-aj>

ROJAS, Rosario

2016 Ajíes Nativos Peruanos: Caracterización agro-morfológica, química nutricional y Sensorial. Lima, Perú: Universidad Cayetano Heredia.

SINGH, Paul, Dennis HELDMAN

2009 Introduction to food engineering. Cuarta Edición. USA: Food Science and Technology.

SERRANO, Pedro

2010 Domo geodésico: Instructivo No 3. Universidad Técnica Federico Santa María.

SOCIEDAD PERUANA DE GASTRONOMÍA

2009 Ajíes Peruanos: Sazón para el Mundo. Perú.

THE ENGINEERING TOOLBOX

2020 Absorbed solar radiation.

https://www.engineeringtoolbox.com/solar-radiation-absorbed-materials-d_1568.html

UNALM

2012 El punto de ají: investigación en Capsicum nativos 1 y 2. Lima, Perú.

UEZU

2019 Curvas de rendimiento ventiladores eólicos. Lima, Perú.

<https://uezuperu.com/ingenieros/extractores-eolicos.html>

UNI, CONCYTEC, UNA

1986 II Seminario de Secado solar. Cusco.

VERGARA, Sandra

2018 Thermal analysis of geodesic dome for capsicum baccatum. Lima, Perú.

YUNUS A. CENGEL, AFSHIN J. GHAJAR

2011 Transferencia de calor y de masa: Fundamentos y Aplicaciones. Cuarta Edición. USA: Mc Graw Hill.