

Capítulo III

El secado y el enfoque de calidad



El secado del cacao

Los granos de cacao son sometidos a proceso de fermentación para la formación de precursores de sabor y aroma mediante levaduras y bacterias. Al final de esta etapa, la humedad disminuye de un 65 % (temperatura de bulbo húmedo [WB]) a un 55 % (WB) (Orna Chávez et al., 2018). Después de esta fase, inicia el proceso de secado, que permite reducir el contenido de humedad a valores entre 6 % (WB) y 8 % (WB) y promover la formación del de sabor y aroma del chocolate. Con este proceso se disminuye el riesgo de contaminación por hongos y se aumenta la vida útil del grano (López Cerino & Chávez García, 2018). La reducción del contenido de humedad se produce por evaporación, en la cual intervienen la transferencia de masa y calor (Fito et al., 2016). Este proceso de secado puede ser natural o forzado; para los granos de cacao, tradicionalmente se realiza con exposición solar sobre plataformas de madera, uso de marquesinas, paseras corredizas, esteras de guadua y casas elbas. También se utilizan recursos disponibles como superficies de cemento y plásticos, aunque esta práctica no es recomendable ya que puede afectar la calidad final del grano de cacao (Jaimes Suárez et al., 2021). El uso de equipos de secado permite reducir el tiempo de secado, disminuir la mano de obra y asegurar la inocuidad del producto final. Sin embargo, si se utilizan equipos con combustibles, es importante evitar que los granos de cacao entren en contacto directo para prevenir contaminación (Maroto et al., 2017).

Es necesario realizar el proceso teniendo en cuenta la calidad y el cumplimiento de las normativas vigentes en cada país. En Colombia, el porcentaje de humedad que se debe alcanzar para comercializar el grano de cacao debe oscilar entre 7 % y 7,5 % (WB). El cumplimiento de este requisito está reglamentado por la Norma Técnica Colombiana (NTC) 1252 de 2021 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec], 2021). El incumplimiento de este requisito puede resultar en una reducción del precio del producto durante la transacción debido al incumplimiento de los rangos de humedad requeridos. Esto podría generar riesgos relacionados con la inocuidad, pues se podría propiciar la formación de hongos que afecten la calidad y la homogeneidad del producto seco.

Para el desarrollo del proceso de cacao con herramientas actuales o tradicionales, es necesario considerar las siguientes fases y recomendaciones técnicas.

Fase de presecado

El inicio del proceso de secado del cacao debe llevarse a cabo de manera pausada y controlada durante las primeras 48 horas. En este período, continúa la fermentación y comienza una fase de estabilización de las condiciones de temperatura, disminución de microorganismos fermentativos, pérdida de compuestos volátiles, oxidación y disminución de la humedad interna. El secado lento permite que el ácido acético y el ácido láctico, presentes en los líquidos residuales dentro del grano como resultado de la fermentación, se difundan hacia la superficie y se evaporen. Esto evita que la presencia excesiva de estos compuestos afecte la calidad sensorial del cacao. Además, esta fase garantiza una mayor oxidación y conservación del hinchamiento del grano logrado durante la fermentación, lo cual promueve una mayor movilidad de la humedad hacia la cascarilla.

Cuando se realizan secados acelerados con alta intensidad de radiación solar, existe el riesgo de formar una capa dura en la superficie del grano que impide la migración de la acidez y la humedad (encostamiento). Por lo tanto, es crucial llevar a cabo un proceso de pre-secado que facilite la evaporación de los compuestos ácidos exponiendo el grano de 2 a 3 horas al sol con radiación media, preferiblemente en horas de la tarde. El lecho de granos en la plataforma debe tener un espesor entre 5 cm y 8 cm, y se deben mover cada media hora para asegurar un secado uniforme, la separación de los granos y la movilidad del viento. Estas prácticas promueven un secado controlado que contribuye a una óptima calidad física, química y sensorial del grano (Aguilar, 2016; Jaimes Suárez et al., 2021; Perez & Contreras, 2017).

Fase de secado total

Después de la fase de pre-secado, comienza el proceso de secado completo, durante el cual se completan los procesos bioquímicos de formación de precursores de sabor y aroma y se reduce la humedad del grano hasta niveles de 7 a 7,5 % (WB). Surtido esto, se procede al almacenamiento de los granos de cacao (Parra Rosero, 2018). En esta etapa, se produce una mayor reducción de la humedad interna debido a la exposición prolongada de los granos al viento y la radiación solar. El tiempo total de secado está influenciado por las condiciones climáticas

y los métodos utilizados, razón por la cual puede variar entre 5 y 10 días. Durante este proceso, el peso de los granos de cacao disminuye. Por este motivo, se han reportado porcentajes de reducción del grano húmedo con respecto al grano seco que oscilan entre 63 % y 55 %. Esto significa que, aproximadamente, de cada 100 kg de cacao húmedo se obtienen entre 37 kg y 45 kg de cacao seco (Red Cacaotera, 2023).

El método óptimo de secado es el aprovechamiento de la energía solar; no obstante, también se pueden emplear métodos mecánicos. Estas alternativas contribuyen a estandarizar, agilizar y mejorar los procesos para garantizar la calidad y eficiencia.

Efectos del secado en la calidad del grano de cacao

En Colombia, la Norma Técnica Colombiana NTC 1252 de 2021 (Icontec, 2021) establece las especificaciones y requisitos de calidad del grano de cacao seco destinado a la comercialización. Para el parámetro de humedad, el cacao considerado premium o especial debe presentar un contenido de humedad del 7 % (WB), mientras que para el cacao estándar y corriente, la humedad permitida es del 7,5 % (WB). Además de este parámetro, se evalúa la fermentación interna en el grano, un factor que implica las fases iniciales de pre-secado y secado, ya que en ellas se completan los procesos bioquímicos. La calidad física y sensorial del cacao se ve afectada si estos procesos no se completan adecuadamente. La evaluación de la calidad física del grano se realiza mediante la prueba de corte y otros parámetros descritos en la tabla 12.

Tabla 12. La Norma Técnica Colombiana NTC 1252 de 2021 (Icontec, 2021) determina las especificaciones y requisitos de calidad para grano de cacao seco

Requisitos	Clasificación de cacao en grano		
	Premio/especial	Estándar	Corriente
Contenido de humedad (%)	7,0	7,5	7,5
Contenido de impurezas o materias extrañas (%)	0	0,3	0,5
Grano mohoso interno: #granos/100 granos (máximo)	1	3	5
Contenido de grano partido: #granos/100 granos (máximo)	1	2	5
Granos dañados por insectos o germinación: #granos/100 granos (% máximo)	1	2	3
Granos bien fermentados: #granos/100 granos (máximo)	70	65	55
Granos insuficientemente fermentados y violetas (% máximo)	30	35	45
Granos sin fermentar: #granos/100 granos (máximo)	1	3	5

Fuente: Elaboración propia con base en Icontec (2021)

La evaluación física del grano permite determinar si los procesos de fermentación y secado se llevaron a cabo correctamente y ayuda a prever la calidad y la transformación de la matriz alimentaria. Esta calidad también se confirma mediante el análisis sensorial, ya que puede suceder que el grano exhiba niveles adecuados de humedad y fermentación, pero durante el secado haya retenido acidez o esté contaminado.

El proceso de secado afecta las características físicas, químicas y sensoriales del grano de cacao, ya que promueve reacciones térmicas que causan cambios en los precursores de sabor y aroma, oscurecimiento enzimático, formación de pigmentos marrones y degradación de polifenoles (Ortiz de Bertorelli et al., 2009).

Desde el punto de vista de la inocuidad, un proceso de secado adecuado evita la presencia de ocratoxina A (OTA), una toxina producida por hongos del género *Aspergillus* y *Penicillium*. Según un estudio, el secado directo al sol reduce la presencia de estas toxinas, pues disminuye la actividad acuosa y la humedad, lo cual previene el crecimiento de microorganismos. Sin embargo, esta calidad se mantiene siempre

y cuando las condiciones climáticas sean estables. En caso de alta humedad, bajas temperaturas o lluvia, puede generarse contaminación por hongos (Ramos et al., 2016).

Los procesos de secado tienen un impacto significativo en la calidad general del grano de cacao, por lo que es crucial considerar el tipo de secador y las condiciones de operación. En la tabla 13 se muestra el efecto de la temperatura en las características físicas, sensoriales y químicas, según investigaciones realizadas.

Tabla 13. Efecto de la temperatura de secado en los granos de cacao deshidratados

Temperaturas	Tipo de secado que se origina	Físico	Sensorial	Químico
> 60 °C	Secado acelerado	Endurecimiento de la testa	Alto contenido de ácidos acético, propiónico, butírico, isobutírico e isovalérico,	Perdida de 70 % de polifenoles
40 a 54 °C	Secado controlado-pausado	Desprendimiento de cascarilla, porcentajes de humedad de 7 a 8 %	Liberación de ácidos, presencia de sabores específicos, menor intensidad de sabores amargos y astringentes	Conservación de polifenoles
Condiciones de lluvia y humedad	secado lento	Contaminación de hongos	Sabores indeseados, hongo, pizarroso	Conservación de polifenoles

Fuente: Elaboración propia con base en Dina et al. (2015)

El secado de la guayaba

Durante la deshidratación de la pulpa, rodajas o trozos de guayaba es probable que se produzcan alteraciones en las propiedades fisicoquímicas, principalmente en los sólidos solubles totales (SST) o grados Brix, así como en el porcentaje de acidez total titulable (ATT); en propiedades nutricionales como la cantidad de vitamina C (mg/100 g de pulpa) y en características sensoriales, especialmente en el color de la pulpa. Por lo tanto, es importante conocer los valores de referencia de estas propiedades en frutos de guayaba de los cultivares más destacados en Colombia antes de iniciar el proceso de deshidratación (tabla 14).

Tabla 14. Valores de referencia de las propiedades fisicoquímicas de frutos de guayaba de diferentes cultivares comerciales

Nombre del cultivar	Peso promedio del fruto (g)	Sólidos solubles (°Brix)	Acidez (%)	Índice de madurez	Vitamina C (mg/100 g de pulpa)	Color de la pulpa	Fuente
Guayaba Pera o Palmira ICA-1	180	11,3	0,53	21,7	40,2	Rosado	Ocampo et al. (2011)
Guayaba regional roja	50 a 99	10-14	0,3-0,5	20-30	80-100	Rojo intenso	Solarte et al. (2010)
Guayaba regional blanca	60 a 85	8-12	0,4-0,7	12-20	50-70	Blanco a amarillo claro	Solarte et al. (2010)
Guayaba manzana	350	5,7-9,9	Sin registro	Sin registro	62,6-342,1	Verde claro a amarillo claro	Parra Coronado (2015)
Corpoica Carmin 0328	93,2	13,1	0,5	14,7	45,4	Rojo	Carabalí Muñoz et al. (2017)
Corpoica Rosa C	127	10,8	0,7	26,7	80,9	Rosado	Carabalí Muñoz et al. (2017)

Fuente: Elaboración propia

Durante el secado de la guayaba, se recomienda evaluar los parámetros mencionados e incluir otros de interés, ya que proporcionan información sobre las características del nuevo producto y el grado de conservación con respecto a la fruta. A continuación, se describen algunos de estos parámetros:

- **Contenido de humedad:** debe ser menor al 20 % (wB), dado que en el proceso se elimina gran parte del agua y la humedad es un factor determinante en la estabilidad de las propiedades biofuncionales de los sólidos de guayaba deshidratada (Barbosa et al., 2010). Además, con la deshidratación se reduce el crecimiento de microorganismos. Adicionalmente, si se almacena adecuadamente en un lugar fresco y seco, el producto puede prolongar su vida útil por varios meses.
- **Color:** según Barbosa et al. (2010), el color de los sólidos obtenidos por secado con aire caliente es uniforme y exhibe un tono claro

(evaluado con el valor de luminosidad L^*) y tonalidades rojas y amarillas similares a las de la fruta (según los valores calculados de a^* y b^*). Por otro lado, Castro et al. (2017) nas regiões de cultivo irrigado das diferentes regiões do país, a goiaba apresenta grande desperdício pós-colheita, associado ao rápido amadurecimento, necessitando da aplicação de técnicas de processamento que diminuam o desperdício deste fruto. Objetivou-se, neste trabalho, estudar o processo de transferência de massa durante a desidrataç o osm tica de fatias de goiaba, al m de avaliar os parámetros sensoriais da goiaba-passa obtida sob diferentes temperaturas de processo e concentraç es de sacarose. Fatias de goiaba cv. Paluma ($3,0 \times 2,0 \times 0,9$ cm) indican que el color puede tornarse m s oscuro en comparación con la fruta fresca debido a reacciones químicas y cambios en la estructura de los pigmentos durante el proceso de deshidratación.

- **Vitamina C:** la vitamina C se mide en miligramos por 100 gramos de pulpa y es un indicador clave de la calidad del producto. Según Guerra et al. (2015), se observa una reducción del contenido de vitamina C, dependiendo de las diferentes temperaturas empleadas para el secado: a 30°C , 135 mg/100 g (temperatura de bulbo seco [DB]); a 40°C , 173,07 mg/100 g (DB); a 50°C , 114,27 mg/100 g (DB); a 60°C , 74,68 mg/100 g (DB), y a 70°C , 73,03 mg/100 g (DB). Por otro lado, Barbosa et al. (2010) reportaron un contenido de vitamina C de 118,65 mg de ácido ascórbico/100 g de fruta o de sólido después de secar la pulpa con aire caliente. Estrada et al. (2018) señalan que la vitamina C se considera un indicador crítico de la calidad en la elaboración de alimentos, debido a su baja estabilidad durante los procesos térmicos. Esta afirmación es respaldada por Hincapié Llanos et al. (2011), quienes encontraron una degradación de este compuesto entre 64,02 % y 74,98 % a temperaturas de secado entre 50°C y 60°C .

En la tabla 15 se presentan valores de referencia obtenidos en guayabas cultivadas en la Costa Atlántica Colombiana que fueron sometidas a dos procesos de deshidratación, con lo cual es posible detallar el nivel de variación de algunas propiedades de los alimentos obtenidos, como guayaba fresca, polvo y guayaba osmodeshidratada. De ahí la importancia de contar con evaluaciones de seguimiento antes, durante y después del procesamiento de las pulpas o frutos de guayaba.

Tabla 15. Valores de referencia de algunos parámetros fisicoquímicos para la guayaba fresca, en polvo y osmodeshidratada

Parámetros	Guayaba fresca	Guayaba en polvo	Guayaba osmodeshidratada
% Humedad	84,10	5,85	62,68
% Fibra cruda* y dietaria**	0,52*	44,44**	7,25**
Ca (mg/100g)	15,85	65,56	15,82
Fe (mg/100g)	<0,25	0,93	<0,25
Vitamina C (mg/100g)	41,59	87,21	<1,87

Fuente: Elaboración propia con base en Estrada et al. (2018)

Por otro lado, es importante conocer o evaluar los aspectos sensoriales de la guayaba deshidratada con el objetivo de lograr un aspecto atractivo; el sabor dulce y característico de la guayaba; el aroma agradable y característico de la fruta y la ausencia de aditivos artificiales, conservantes u otros ingredientes no deseados. Normalmente, estas variables requieren de un panel de expertos que califiquen de manera cuantitativa estas propiedades.

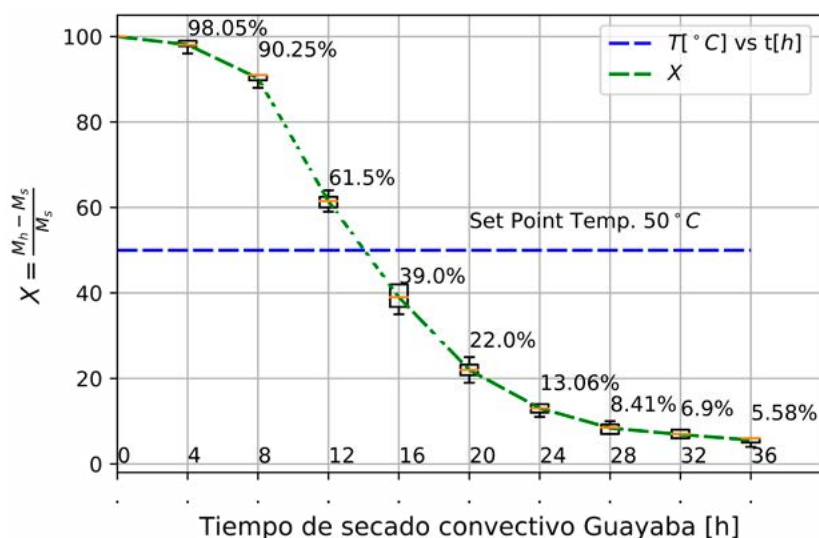


Figura 16. Curva de secado rodajas de guayaba expresada en % humedad versus tiempo (50 °C - 2m/s).

Fuente: Elaboración propia

La figura 16 muestra el comportamiento típico del secado de rodajas de guayaba bajo condiciones de 2 m/s de velocidad de aire y una temperatura de secado de 50 °C. Se observa una línea horizontal azul que

representa la temperatura del aire de secado, mientras que la línea verde muestra la tendencia de reducción del porcentaje de humedad (% h) en función del tiempo para varias muestras de guayaba en forma de rodaja. Cada *boxplot* representa el conjunto de datos de diferentes pruebas realizadas en un tiempo específico de secado. Gracias a este arreglo, se puede inferir la curva de comportamiento del secado.

Implementación de protocolos experimentales

Los estudios del proceso de secado de productos agroalimentarios proporcionan información crucial sobre su calidad, ya que mediante pruebas de laboratorio permiten caracterizar los efectos que diferentes condiciones del aire de secado tienen en los atributos finales del material, ya sea utilizando un secador o un deshidratador. Otro aporte significativo se relaciona con la cinética del proceso, la cual, como se ha mencionado anteriormente, describe la variación del contenido de humedad del material en función del tiempo. Esta relación está influenciada en los procesos de secado reales por el tipo de material, el contenido de humedad del aire, el contenido de humedad del producto, la geometría del producto y las características operativas del secador utilizado.

Por lo tanto, el uso de la unidad experimental con los dos enfoques expuestos requiere protocolos basados en estándares y procedimientos ampliamente aceptados por la comunidad científica. A continuación, se presenta un recuento detallado de los métodos adoptados para las pruebas con muestras de guayaba y cacao provenientes del departamento de Santander.

Curvas de secado de materiales agroindustriales

Existen cuatro métodos básicos para obtener la información para reconstruir la curva de secado de un producto (Kemp et al., 2001). En el primer método, se toman muestras de la unidad de secado a intervalos de tiempo definidos para determinar su contenido de humedad

aplicando métodos de laboratorio, o bien, la muestra se pesa y luego se reintroduce en la unidad. El segundo método requiere un registro continuo del peso de la muestra mediante un sistema ubicado dentro de la unidad experimental que ayuda a mantener el flujo de aire de secado en la zona de medición. En el tercer método, conocido como pesado intermitente, se interrumpe el flujo de aire dentro de la zona de secado mientras se realiza la medición del peso de la muestra. Por último, se encuentran los métodos indirectos, en los cuales se cuantifica la cantidad de humedad retirada en forma de vapor en lugar de medir el peso directamente. Para esto, se utilizan instrumentos como el analizador infrarrojo de gases.

Como es de esperar, cada método tiene sus ventajas y desventajas, las cuales dependen en gran medida de la configuración del aparato experimental. La unidad de secado desarrollada en este proyecto está diseñada para obtener datos sobre la cinética de secado mediante los métodos continuo e intermitente. Dependiendo del tipo de material, dentro de la unidad de secado se pueden disponer una sola muestra o un arreglo de muchas muestras distribuidas en una capa fina o gruesa, con un flujo de aire paralelo.

Es importante destacar que, según la literatura, al analizar una muestra unitaria dentro de un túnel de secado, la relación señal-ruido suele ser baja, lo que puede resultar en una curva de humedad con una dispersión significativa de la información. Por otro lado, al disponer las muestras en capas se obtienen curvas menos dispersas, pero se podría obtener menos información fundamental sobre la cinética del proceso de secado.

En cuanto al efecto de la velocidad del aire dentro del túnel, el estudio de las partículas en capas es más representativo para materiales secados en equipos de transporte neumático o en equipos rotativos. Por el contrario, el estudio de muestras individuales es útil para materiales de tamaño pequeño secados a bajas velocidades. En estos casos, el sistema de sujeción de la muestra en el flujo de aire es un aspecto importante para mejorar la calidad de la información obtenida.

Ahora bien, el registro del peso (equivalente a la masa) de las muestras se traduce en curvas de secado al determinar el contenido de humedad para cada instante de tiempo a lo largo de la prueba. Este contenido de humedad está definido como la masa de agua en el producto por unidad de masa de sólidos secos, es decir:

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

La masa seca (M_s) se determina al finalizar la prueba cuando no se observan cambios significativos en el peso de la muestra dentro de la sección de secado. Para esto, se utiliza un equipo analizador de humedad que emplea el método termogravimétrico con temperaturas entre 50 °C y 160 °C, o se realiza un análisis de laboratorio conocido como método de desecación por estufa, mediante el cual la muestra se calienta por encima de 100 °C (entre 105 °C y 130 °C) durante al menos 10 minutos. Luego, se deja reposar el material entre 2 y 3 minutos y se pesa nuevamente para determinar la masa seca. El registro gráfico de los valores de humedad de productos alimenticios obtenidos como una función discreta del tiempo presenta la forma general que se observa en la figura 17.

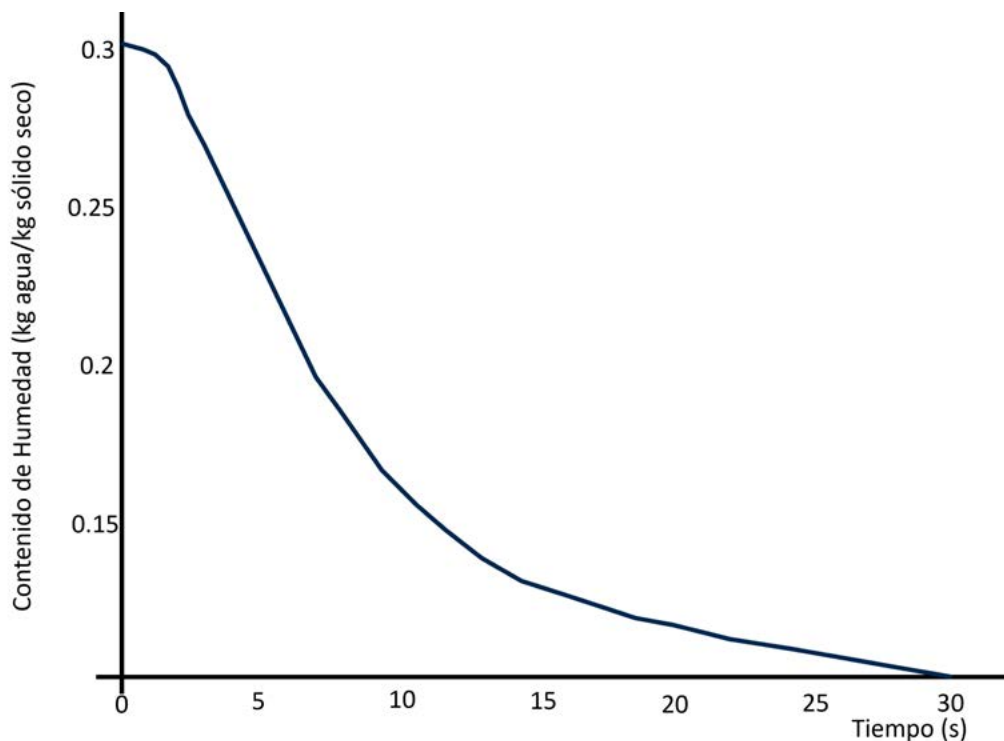


Figura 17. Curva típica de secado de un producto agroindustrial.

Fuente: Elaboración propia con base en Kemp et al. (2001)

Para graficar estas curvas se siguen unas estrategias que permiten utilizar adecuadamente los datos experimentales. Las estrategias se describen a continuación:

1. Graficar todos los datos de humedad para los instantes de tiempo analizados eliminando puntos extremos o anómalos.
2. Si se requiere obtener una curva continua, se puede utilizar un método de promediado con los puntos adyacentes. Además, para suavizar la curva se puede emplear un método de ajuste basado en segmentos de recta (*splitline fit*). Es importante diferenciar numéricamente las discontinuidades significativas, que son características de un ajuste deficiente.
3. Se puede utilizar un ajuste polinomial (empleando hasta cinco puntos consecutivos) para suavizar la curva obtenida. Los valores ajustados para el contenido de humedad se evalúan en cada punto experimental.
4. Finalmente, se pueden utilizar diferentes programas de computadora que consideren modelos teóricos o semiempíricos (previamente desarrollados y validados con productos agroindustriales) que hayan demostrado buena capacidad predictiva. En este caso, se puede seguir un proceso de identificación paramétrica basado en métodos de optimización.

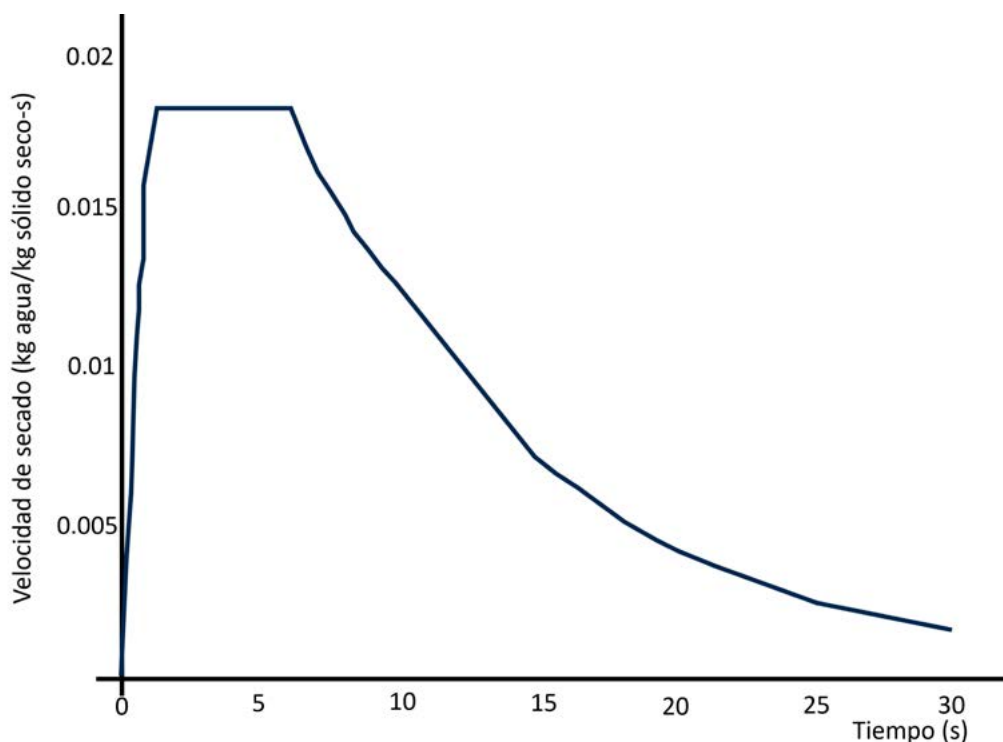


Figura 18. Curva de la razón de cambio del contenido de humedad versus el tiempo.

Fuente: Elaboración propia con base en Kemp et al. (2001)

La figura 18 y la figura 19 muestran otras dos curvas utilizadas con frecuencia en el secado de alimentos. La primera es la razón de cambio de la humedad ($\frac{dX}{dt}$) con respecto al tiempo (t) y la segunda la misma razón de cambio pero con respecto al contenido de humedad (X). Estas se obtienen a partir de los datos de la curva típica de secado mediante derivación numérica (utilizando el método de las diferencias finitas, por ejemplo). Las estrategias para su ajuste y suavizado son esencialmente las mismas que se describieron en el apartado anterior.

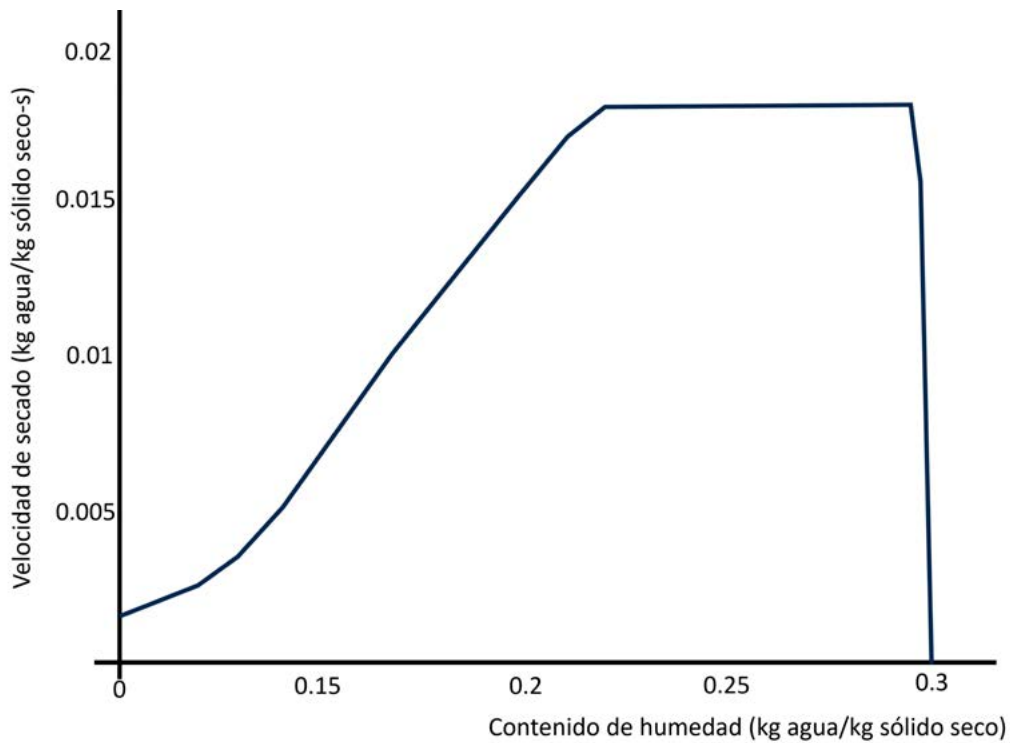


Figura 19. Curva de la razón de cambio del contenido de humedad versus el contenido de humedad.

Fuente: Elaboración propia con base en Kemp et al. (2001)

Control de variables de proceso para la elaboración de curvas de secado en el dispositivo desarrollado

La figura 18 mencionada en la sección anterior representa una de las curvas utilizadas para visualizar la relación entre el cambio de la

humedad y el cambio del peso a lo largo del tiempo. En el dispositivo experimental desarrollado en este proyecto se ha programado y utilizado una curva de secado convectivo basada en el concepto discutido anteriormente. Esta curva permite emular condiciones climáticas similares a las de San Vicente de Chucurí (Santander) durante las primeras horas y mantener una temperatura constante después de las 48 horas. Esto se hace con el fin de reducir el riesgo de saturación de las estructuras superficiales con grasa y permitir una deshidratación adecuada.

La curva de la figura 20 muestra una rampa de temperatura programada para iniciar el proceso con 28 °C durante 16 horas que se eleva a 38 °C y 34 °C durante 4 horas respectivamente, seguido de un periodo de 16 horas a 28 °C. La fase final del proceso se lleva a cabo a 40 °C durante 48 horas. Los puntos de análisis de la humedad del grano en la curva de temperatura de referencia se toman a las 0h, 16h, 24h, 36h y 84h.

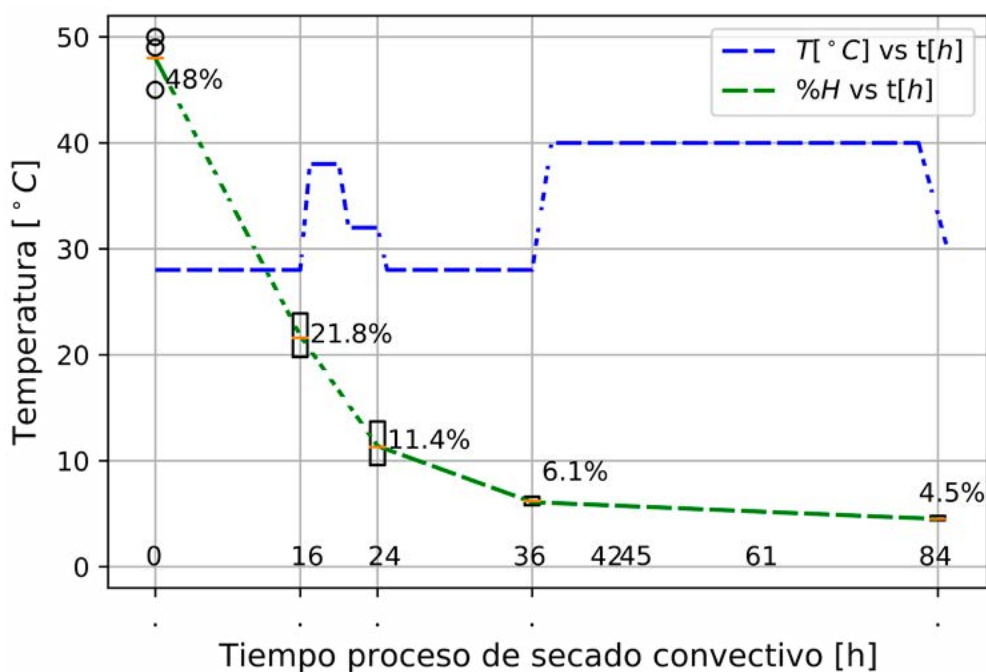


Figura 20. Rampa temperatura de secado versus el porcentaje de humedad del grano.

Fuente: Elaboración propia

Para ello, se diseñó un experimento para determinar la humedad del grano, con tres repeticiones de tres grupos. Se observa una efectiva tendencia de secado del grano en 4 días con bajas temperaturas, lo que

contribuye a obtener un porcentaje de humedad cercano al 5 % (WB). Los valores medios de pH en estos puntos corresponden a 6,391, 6,208, 6,091 y 6,168, respectivamente, lo cual indica una afectación prácticamente nula del pH durante el proceso, con una ligera tendencia a reducirlo, lo cual es deseado en un proceso de secado de cacao.