

Grado Universitario en Ingeniería en  
Tecnologías Industriales  
2018-2019

*Trabajo Fin de Grado*

“Estudio experimental de la cinética  
de secado empleando un secadero  
solar”

---

Sergio García Sánchez

Tutor

Luis Miguel García Gutiérrez

Leganés, 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons  
**Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## RESUMEN

La investigación aquí presentada, consiste en un trabajo experimental en el que se procedió a la utilización de un secadero solar para estudiar la cinética de secado de diferentes productos alimenticios.

La primera parte de la investigación se basó en la caracterización del secadero solar. Un proceso de análisis para fijar una serie de condiciones climáticas con las que trabajar posteriormente para el secado de los productos.

En la segunda parte, se trabajó secando zanahorias, plátanos y manzanas ante las condiciones de humedad y temperatura previamente fijadas, para estudiar cómo se comportaba cada muestra.

En la tercera parte del trabajo, se utilizaron los resultados de cada producto, sobre cómo se comportaban ante el secado, para estudiar la tendencia y velocidad de secado de cada producto, así como el análisis de la pérdida de masa.

Finalmente con los resultados experimentales realizamos un modelo para estudiar el comportamiento de cada fruta ante unas condiciones de humedad y temperatura variables.

**Palabras clave:** Secadero solar, Secado, Sol, Energías renovables, Moisture ratio, Drying rate, Tg, deshidratar.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación del trabajo .....	1
1.2 Secado .....	2
1.3 Dispositivos y estado actual .....	3
1.4 Energía solar térmica de baja temperatura .....	8
1.5 Objetivo .....	11
2. INSTALACIÓN Y COMPONENTES .....	13
2.1 Secadero .....	13
2.1.1. Instalación real de trabajo .....	14
2.2 Control de la instalación .....	15
3. ANÁLISIS PRELIMINAR .....	19
3.1 Base teórica .....	19
3.2 Caracterización de la instalación .....	23
3.3 Estimación de la radiación .....	29
3.3.1 Influencia de la nubosidad en la radiación incidente .....	31
4. METODOLOGÍA Y PREPARACIÓN .....	32
4.1 Introducción a los ensayos .....	32
4.1.1 Efectos del ácido cítrico .....	32
4.2 Muestras .....	33
4.3 Temperatura de transición vítrea .....	35
4.3.1 Relación entre la temperatura de transición vítrea y el secado .....	35
4.3.2 Influencia del contenido de agua .....	36
4.4 Thin-layer .....	37
5. TRABAJO EXPERIMENTAL .....	39
5.1 Estudio de la pérdida de masa .....	39
5.2 Resultados .....	43
5.2.1 Zanahoria .....	44
5.2.2 Plátano .....	46
5.2.3 Manzana .....	47
5.3 Análisis de los resultados .....	49
5.4 Drying rate .....	50

6. ESTUDIO TEÓRICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LOS PRODUCTOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	53
6.1 Modelo para la predicción del secado .....	53
6.1.1 Modelo para zanahoria .....	53
6.1.2 Modelo para el plátano .....	54
6.1.3 Modelo para la manzana.....	54
6.2 Análisis del modelo .....	55
6.3 Aplicación del modelo para la temperatura constante de 40°C.....	57
6.4 Moisture ratio variable.....	61
7. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO .....	64
7.1 Presupuesto .....	64
7.2 Análisis económico.....	66
8. CONCLUSIONES .....	69
9. BIBLIOGRAFÍA .....	71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Condiciones de ensayo .....	27
Tabla 3.2. Condiciones de ensayo representadas en Matlab .....	28
Tabla 4.1. Modelo Thin-Layer [27] .....	38
Tabla 5.1. Porcentaje de Me respecto a la masa inicial para manzana, plátano y zanahoria .....	43
Tabla 5.2. Masas iniciales de las muestras de zanahoria (Mo) y el Me, para cada ensayo .....	44
Tabla 5.3. Ecuaciones representadas en la figura 36 y coeficiente $R^2$ para las cuatro pruebas .....	45
Tabla 5.4. Masas iniciales de las muestras de plátano (Mo) y el Me, para cada ensayo	46
Tabla 5.5. Ecuaciones representadas en la figura 37 y coeficiente $R^2$ para las cuatro pruebas .....	47
Tabla 5.6. Masas iniciales de las muestras de manzana (Mo) y el Me, para cada ensayo .....	47
Tabla 5.7. Ecuaciones representadas en la figura 38 y coeficiente $R^2$ para las cuatro pruebas .....	48
Tabla 7.1. Desglose económico del secadero .....	66
Tabla 7.2. Coste y beneficio obtenido para cada producto .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Diferencia de la capacidad antioxidante en función de la temperatura. De [2].....	2
Fig. 2. Secado de tomates al aire. Obtenido de [5] .....	4
Fig. 3. Secado en sombra. Obtenido de [7] .....	5
Fig. 4. Secado escalonado. De [8] .....	5
Fig. 5. Secadero solar directo. [9].....	6
Fig. 6. Secadero solar indirecto. De [9] .....	6
Fig. 7. Secadero indirecto con silo. De [10].....	7
Fig. 8. Secadero solar mixto, de [9].....	7
Fig. 9. Secado en invernadero. Obtenido de [11] .....	8
Fig. 10. Cocinas solares. (a) De acumulación. (b) De concentración. Obtenido de [12]..	9
Fig. 11. Esquema del sistema para la obtención de ACS. Obtenido de [12].....	10
Fig. 12. Sistema solar para ACS y calefacción. Obtenido de [13] .....	11
Fig. 13. Secadero solar indirecto y su funcionamiento. Obtenido de [14].....	13
Fig. 14. Instalación del secadero. (a) Colector. (b) Cámara de secado. ....	14
Fig. 15. Disposición dentro de la cámara. ....	15
Fig. 16. Esquema del sistema de humidificación y calentamiento de aire. (a) Esquema de la instalación. (b) Fotos instalación real. (c) Detalle válvula de tres vías. ....	16
Fig. 17. Esquema completo de la instalación. De [15] .....	18
Fig. 18. Diagrama psicrométrico. De [16] .....	19
Fig. 19. Diagrama psicrométrico con los parámetros indicados.....	20
Fig. 20. Diagrama psicrométrico con los datos del ejemplo. ....	21
Fig. 21. Gráficas de la temperatura y humedad relativa en el colector. (a) Temperatura. (b)Humedad relativa. Obtenido de [15] .....	24
Fig. 22. Temperatura a la entrada y a la salida .....	25
Fig. 23. Humedad a la entrada y a la salida.....	25
Fig. 24. Radiación a lo largo del día 9 de mayo de 2019. Obtenido de [17].....	29
Fig. 25. Evolución de la temperatura a lo largo del día 9 de mayo de 2019 [18].....	30
Fig. 26. Temperaturas a la entrada y a la salida del colector.....	30
Fig. 27. Índice de transparencia atmosférica a lo largo de un año. De [19].....	31
Fig. 28. Disposición de la manzana. (a) Antes de ser secada. (b) Después de ser secada. ....	33
Fig. 29. Detalle manzana seca. ....	33
Fig. 30. Aspecto del plátano. (a) Antes de sufrir el secado. (b) Después de sufrir el secado. ....	34
Fig. 31. Zanahoria. (a) Antes de entrar en la cámara. (b) Después de sufrir el secado. .	34
Fig. 32. Efecto del contenido del agua en la Tg para manzana y plátano [23].....	36
Fig. 33. Evolución de la masa de la manzana para la temperatura de 35°C.....	39
Fig. 34. Evolución de la masa del plátano para la temperatura de 35°C.....	40
Fig. 35. Evolución de la masa de zanahoria para la temperatura de 35°C. ....	40
Fig. 36. Evolución temporal del <i>moisture ratio</i> de las muestras de zanahoria, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad. ....	45

Fig. 37. Evolución temporal del <i>moisture ratio</i> de las muestras de plátano, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad. ....	46
Fig. 38. Evolución temporal del <i>moisture ratio</i> de las muestras de manzana, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad. ....	48
Fig. 39. <i>Drying rate</i> . (a) Manzana. (b) Plátano. (c) Zanahoria. ....	51
Fig. 40. Coeficientes para la zanahoria. (a) Coeficiente a. (b) Coeficiente b. ....	53
Fig. 41. Coeficientes para el plátano. (a) Coeficiente a. (b) Coeficiente b. ....	54
Fig. 42. coeficientes para la manzana. (a) Coeficiente a. (b) Coeficiente b. ....	55
Fig. 43. Error del modelo. (a) Zanahoria. (b) Plátano. (c) Manzana. ....	56
Fig. 44. <i>Moisture ratio</i> de la manzana para los resultados experimentales y los del modelo. ....	57
Fig. 45. Evolución del <i>MR</i> de la manzana, para las temperaturas de trabajo y la temperatura de 40°C y 22°C, halladas con el modelo. ....	58
Fig. 46. Evolución del <i>MR</i> del plátano para las temperaturas de trabajo y la temperatura de 40°C hallada con el modelo. ....	59
Fig. 47. Evolución del <i>MR</i> de la zanahoria para las temperaturas de trabajo y la temperatura de 40°C hallada con el modelo. ....	60
Fig. 48. Temperatura para Valencia a lo largo de un día tipo. De [29]. ....	61
Fig. 49. Evolución del <i>MR</i> para temperatura variable. (a) Plátano y zanahoria. (b) Manzana. ....	63
Fig. 50. Modelo de diseño del secadero. ....	65



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación del trabajo

En primer lugar esta investigación surge de la necesidad de utilizar los conocimientos adquiridos durante estos años de universidad, para aprovecharlos en pro de aquellas personas menos favorecidas, más vulnerables y con menos recursos. Para facilitar, de alguna forma, la realización de actividades que en otros lugares del mundo serían cotidianas.

Algo tan sencillo como encender la luz o conservar alimentos para el consumo diario a una temperatura adecuada, para muchas personas son hábitos por los cuales no hay ningún tipo de preocupación, pero para otras se torna complicado. Son sabidos los efectos perjudiciales que conlleva el exceso de humedad en los alimentos y los materiales si no se preservan en unas condiciones óptimas, los cuales pueden ir desde la pérdida de las propiedades del producto impidiendo su utilización, hasta la aparición de moho impidiendo su consumo.

El proceso de secado de los productos alimenticios consiste en la extracción de la humedad de los alimentos, consiguiendo así, la conservación de todas las propiedades alimenticias durante más tiempo sin necesidad de electrodomésticos y/o envases de plásticos, evitando así el gasto de energía o la contaminación.

De la unión de estas ideas nace esta investigación, con la que se busca ofrecer información sobre la cinética de secado de alimentos para su conservación, contribuyendo a las alternativas de extracción de humedad, ya existentes que usan únicamente energía limpia y que principalmente están destinadas para aquellas personas y para aquellas regiones, para las que y en las que, es difícil acceder a la electricidad y a otras fuentes de energía por falta de recursos y/o por abandono de las propias instituciones, utilizando únicamente la energía procedente del sol.

## 1.2 Secado

La base de este trabajo y en torno a lo que gira todo el proceso y los ensayos es el secado. El secado consiste en extraer parte o la totalidad de la humedad de un producto cambiando así, sus propiedades. El proceso consiste en la circulación de una masa de aire previamente calentada, consiguiendo al pasar por los productos, extraer la humedad existente, teniendo de esta forma una transferencia de masa del producto al flujo de aire. Este aire aumenta su contenido de humedad, llegando un momento en el que el aire ya no podrá aceptar más humedad, teniendo entonces el aire saturado. Por esto basándonos en la psicrometría y en el diagrama psicrométrico, conviene aumentar la temperatura de la masa de aire todo lo posible para conseguir que el aire tenga más capacidad de arrastrar humedad sin llegar a saturarse.

Encontramos múltiples beneficios con la utilización de esta técnica. Al reducir el peso y las dimensiones de los productos, debido a la extracción de la humedad, se facilita el transporte y el almacenaje. Además, en concreto con los productos alimenticios, el deshidratado permite poder conservar los alimentos durante más tiempo evitando el desperdicio de comida. Esto es muy útil en regiones cuya principal fuente de alimentación proviene de cosechas, permitiendo de esta manera ampliar el tiempo durante el cual pueden acceder a unos alimentos que aun sean aptos para el consumo. El secado también influye positivamente a nivel de las propiedades químicas y biológicas de los alimentos, ya que se mejora la capacidad antioxidante y su actividad enzimática [1]. Podemos ver un ejemplo de esto en numerosas investigaciones sobre el tema en [2] [3]

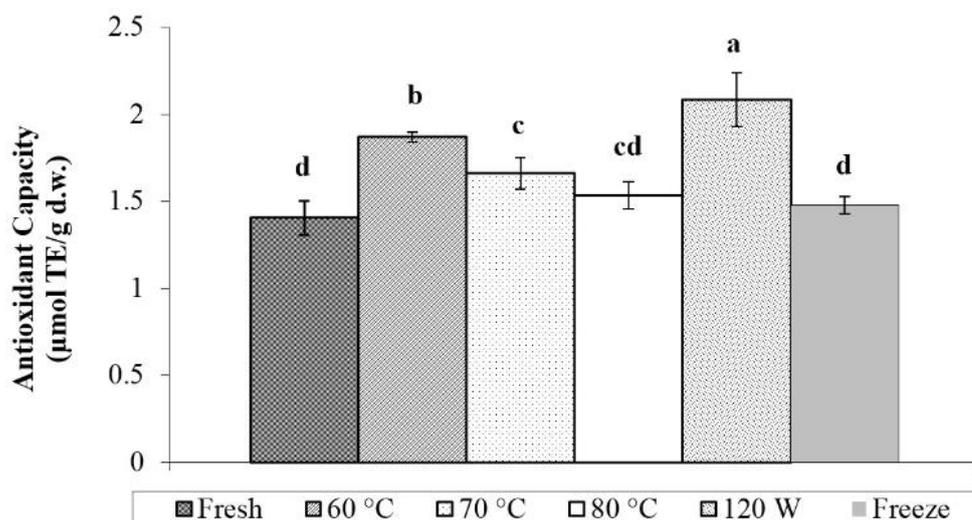


Fig. 1. Diferencia de la capacidad antioxidante en función de la temperatura. De [2]

En la figura 1 se muestra la temperatura de secado frente al contenido de antioxidantes para el caso de dátiles que era la muestra de este ejemplo. La forma en la que se determina la capacidad antioxidante de un producto se basa en la anulación del DPPH,

que es el radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo [4]. Lo que se consiga inhibir el DPPH es lo que determina su capacidad antioxidante. Los resultados se muestran por cantidad de Trolox que es un antioxidante y en función del contenido de dicho antioxidante se observa si tiene mayor o menor capacidad antioxidante el producto.

El inconveniente principal del secado mediante aire caliente es que necesita grandes cantidades de energía, lo que supone en ciertas ocasiones un gasto de dinero elevado y un suministro continuo y estable de energía y dado que la motivación de la investigación, busca facilitar el desarrollo de diferentes actividades en zonas y lugares con menos recursos, el proceso de secado que se estudiará de ahora en adelante basa su funcionamiento en la energía procedente del sol; consiguiendo utilizar esta técnica con una energía de fácil acceso y gratuita sin importar el lugar de la tierra en el que estemos. Por tanto para el secado de productos nos basaremos en los dispositivos que funcionan a base de radiación solar, más concretamente, un secador solar.

### **1.3 Dispositivos y estado actual**

Con el uso del secadero solar buscamos adecuar el proyecto a la motivación del trabajo ya que el secadero ofrece una alternativa limpia que permite secar productos alimenticios destinados al consumo y que tiene además, la ventaja de poder funcionar en zonas aisladas con difícil acceso a fuentes de energía.

Se encuentran dos tipos de secadero, indirecto y directo, en nuestro caso trabajamos con el indirecto. La diferencia entre las dos tecnologías reside en el lugar donde se recoge la radiación solar. En el directo la radiación incide directamente en la cámara de secado dentro de la cual se encuentran los productos a secar. En el caso del indirecto, la radiación calienta el aire que circula por un colector y entra en la cámara donde se depositan los productos. Dentro de esta diferenciación encontramos distintos tipos de secaderos y formas de secado.

## Secado directo al aire



Fig. 2. Secado de tomates al aire. Obtenido de [5]

Es el método tradicional y más rudimentario de secar alimentos, se exponen los productos directamente al sol, sin cubrir. Se corre el riesgo de que las muestras puedan ser contaminadas por agentes externos como puedan ser animales, insectos o la lluvia [6].

### Secado a la sombra



Fig. 3. Secado en sombra. Obtenido de [7]

Se diferenciad el secado al aire en que en este caso se tiene una estructura para secar protegiendo al producto de la radiación directa excesiva y de condiciones climáticas adversas. La estructura debajo de la cual se encuentra el producto es un techado para poder estar a la sombra.

### Secadero directo escalonado

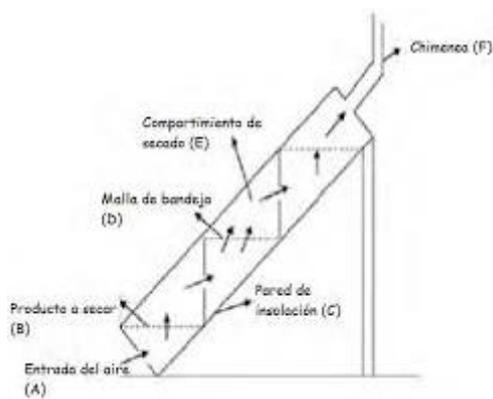


Fig. 4. Secado escalonado. De [8]

La instalación de la figura 4 consiste en unos escalones de metal donde se coloca el producto y por los cuales circula el aire reduciendo la humedad y termina saliendo por la chimenea superior.

## Secadero solar de gabinete

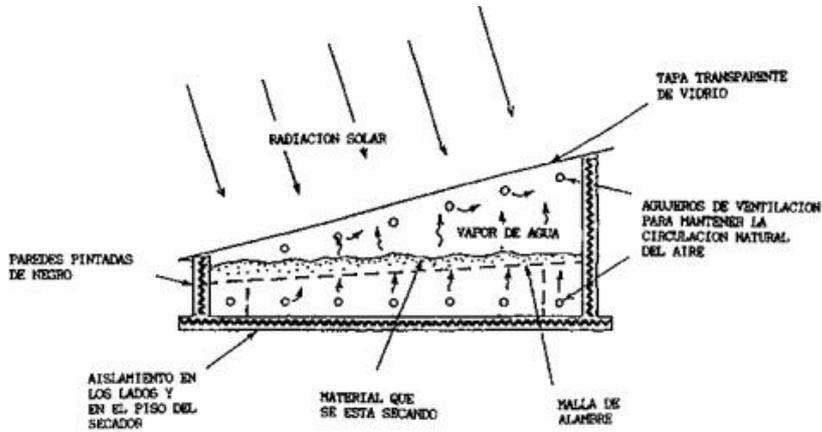


Fig. 5. Secadero solar directo. [9]

La figura 5 muestra otro tipo de instalación directa en la que se tiene una cubierta de vidrio transparente a la radiación que incide directamente sobre el producto.

## Secadero solar indirecto

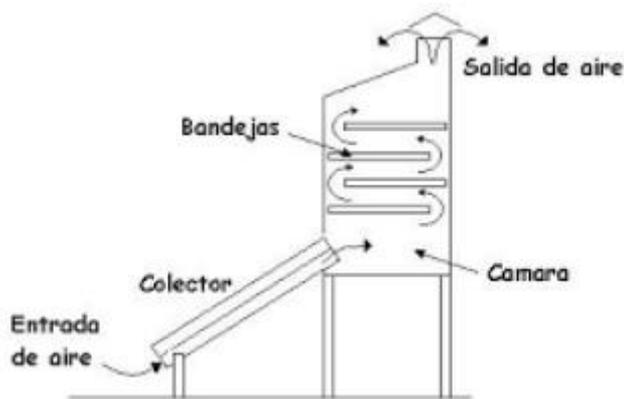


Fig. 6. Secadero solar indirecto. De [9]

Se colocan los productos a secar en las bandejas por donde circula el aire caliente que ha sido calentado a su paso por el colector.

### Secadero indirecto de silo



Fig. 7. Secadero indirecto con silo. De [10]

Es también el secado indirecto mediante el uso de un colector pero en este caso la cámara de secado es un silo, ya que este dispositivo es cuando se tienen mayores cantidades de producto. Se necesita un sistema con el que forzar el flujo de aire.

### Secadero solar mixto



Fig. 8. Secadero solar mixto, de [9]

En la figura 8 se muestra un secadero solar mixto que funciona mediante las dos tecnologías tanto secado directo como indirecto.

## Secado en invernadero



Fig. 9. Secado en invernadero. Obtenido de [11]

Se consigue alcanzar en el interior de la instalación una temperatura superior en  $20^{\circ}\text{C}$  a la del ambiente.

Existen gran cantidad de dispositivos y diseños distintos de secadero. Podemos encontrar secaderos tanto a nivel local como los presentados anteriormente, o a nivel industrial, destinados a producir en grandes cantidades. No solo existen secaderos que funcionan con energía solar, también podemos encontrar secaderos que utilizan electricidad, pero tanto los secaderos industriales como los eléctricos se encuentran fuera del foco de este trabajo.

Dentro de los secaderos podríamos hacer una diferenciación más, aparte de la ya indicada entre directo e indirecto, que tiene que ver con la forma en la que fluye el aire a través del secadero, pudiendo ser circulado por convección natural o convección forzada. La diferencia reside en que para la convección forzada, necesitaremos un sistema para hacer fluir el aire por el interior de la instalación.

Hay que señalar como ya hemos comentado, que todos los dispositivos anteriormente presentados funcionan a base de energía solar, por tanto su rendimiento se reduce considerablemente por la noche o en las horas del día de menor irradiación. Para evitar esto, existen instalaciones que hacen uso de productos como es la arena para almacenar la energía y así poder ser usada en los momentos del día con menor intensidad solar [6].

### **1.4 Energía solar térmica de baja temperatura**

Los secaderos solares se engloban dentro de la llamada energía solar térmica de baja temperatura en la que se encuentran otra serie de dispositivos que tiene la misma motivación que la del secadero, que es ofrecer alternativas al uso de dispositivos que funcionen con energías cuyo origen no es ni renovable ni limpio. Dentro de la energía solar térmica encontramos una serie de dispositivos que también trabajan con productos

alimenticios pero en este caso, para cocinarlos, algo que no ocurre en el secadero. Nos referimos a las cocinas solares que de la misma forma, están destinadas a poblaciones sin recursos y que consiguen evitar uso de combustibles y los riesgos derivados de la combustión, como son la inhalación de gases que en estas regiones son realmente perjudiciales, sobre todo para las mujeres, ya que son las que en su mayoría cocinan y que tradicionalmente recurren a la combustión de biomasa en recintos cerrados sin extracción de humos, provocando que con el tiempo tengan problemas respiratorios

Los tipos de cocina que encontramos son: **cocina de acumulación**, que utiliza el efecto invernadero, para la cocción de alimentos. **Cocina de concentración**, poniendo la olla en el foco de una parábola, consiguiendo concentrar en ella la radiación incidente y la **cocina indirecta** en la que se calienta un colector por el que circula aire, calentando la zona en la que se encuentra la comida [12]. La diferencia principal entre ellos es la forma en la que acumulan radiación. Pero realmente funcionan con el mismo principio que los secaderos, aunque se alcanzan temperaturas superiores ya que la cocción de los alimentos así lo requiere.



(a)



(b)

Fig. 10. Cocinas solares. (a) De acumulación. (b) De concentración. Obtenido de [12]

La llamada energía solar térmica de baja temperatura, la cual además de las aplicaciones anteriormente expuestas engloba a un mayor número de tecnologías que funcionan con los mismos principios.

Los dispositivos que están dentro de la energía solar térmica de baja temperatura, tienen el mismo fundamento, buscan captar la radiación solar procedente del sol para posteriormente calentar un fluido, como pueda ser agua o aire con la intención de aprovechar esta energía para diferentes aplicaciones.

Para ofrecer una visión global del campo de estudio en el que se basa el proyecto vamos a presentar las demás aplicaciones que pertenecen a esta área. Entre dichas aplicaciones, una de las más importantes y la que tiene un uso más extendido, es la obtención de agua caliente sanitaria. El funcionamiento se basa en el uso de captadores que son los que reciben la radiación solar para transmitir la energía en forma de calor al fluido que circula por los mismos. Dicho fluido es denominado caloportador y en muchas ocasiones es la misma agua que posteriormente es consumida. Se le denominada de baja

temperatura porque las temperaturas de consumo de los fluidos se encuentran en el rango de 50°C- 60°C.

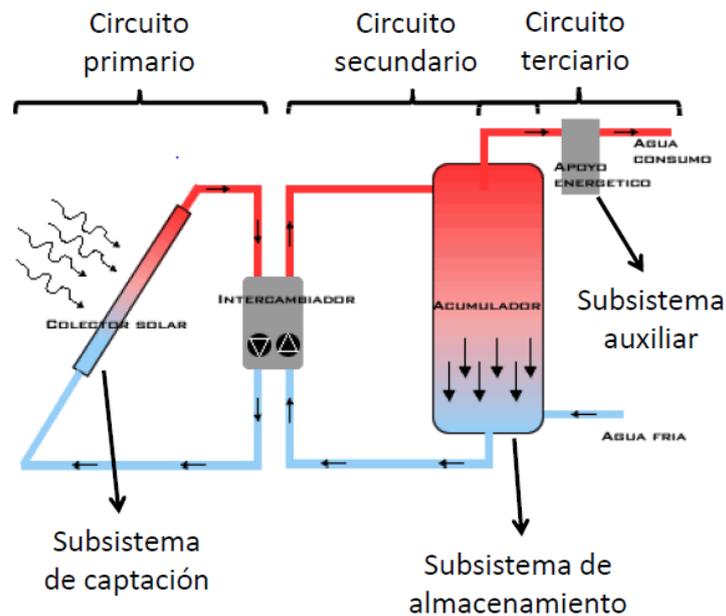


Fig. 11. Esquema del sistema para la obtención de ACS. Obtenido de [12]

En la figura 11 se presenta el esquema básico para la obtención de agua caliente sanitaria. El circuito primario consta del colector que transmite la energía procedente del sol al fluido que circula por este circuito, en forma de calor aumentando así su temperatura. El circuito secundario consta del sistema de almacenamiento en el que ya se encuentra el agua para consumo que circula a través del depósito de almacenamiento y pasa por un intercambiador de calor, el cual puede ser de placas o de serpentín y es donde se produce el intercambio de calor entre el fluido caloportador y el agua que será destinada al consumo. Para conseguir que el agua final tenga la temperatura adecuada, en el depósito de almacenamiento se produce la estratificación que consiste en la existencia de distintos niveles térmicos, en donde el agua que fluye al intercambiador o a los colectores lo hace lo más fría posible y la destinada a consumo lo más caliente posible. En cuanto al sistema terciario puede presentar un sistema auxiliar para situaciones en las que la temperatura no es la óptima para el consumo y requiere de un aporte extra que cubra la carencia de energía. Este sistema suele ser utilizado para los meses donde la radiación solar no es suficiente o cuando se produzcan condiciones climáticas adversas.

Además de para la obtención de ACS, otro de los usos importantes de la energía solar térmica de baja temperatura, es la destinada a sistemas de calefacción que tiene mucha relación con los sistemas de ACS, ya que en la mayoría de ocasiones se integran en un mismo circuito. En este caso se calienta el fluido caloportador, que circula por unos radiadores o por unas tuberías que están instaladas en el suelo de la habitación, calentando el aire que allí se encuentra. A esta tecnología se le denomina suelo radiante

que es más eficiente que el uso de radiadores que es el método convencional usado para calefacción. La razón por la cual es más eficiente el suelo radiante es que con un menor consumo distribuye de una manera más uniforme el calor.



Fig. 12. Sistema solar para ACS y calefacción. Obtenido de [13]

Estas son las aplicaciones principales de la energía de baja temperatura pero existen muchas otras tecnologías dentro de este campo, como puede ser la desinfección solar que consiste en la eliminación de microorganismos o bacterias, mediante ebullición o pasteurización o incluso se puede utilizar para procesos de destilación.

El principal inconveniente de la baja temperatura es que la radiación solar tiene una gran variabilidad y depende totalmente de las condiciones climáticas, por tanto el diseño de los sistemas de captación tienen que tener en cuenta esta situación y buscar el aumento de la densidad energética en todo momento. Se consigue mediante diseños que optimicen la concentración de la radiación, para poder aprovechar al máximo la energía, en los momentos del año en los que se tengan condiciones adversas que reduzcan la energía captada procedente del sol.

## 1.5 Objetivo

El objetivo principal del proyectos consiste en estudiar y explicar el comportamiento de unos determinados alimentos ante la circulación de una masa de aire con unas condiciones de temperatura y humedad determinadas, siendo sometidos a un proceso de secado que supone una transferencia de masa entre el producto y el aire, produciéndose una pérdida de contenido en agua por parte de los productos y una ganancia por parte del aire.

Los frutos del siguiente trabajo serán utilizados, con la intención mostrar una visión cuantitativa de la pérdida de masa de cada producto durante un tiempo concreto y de analizar cuáles de ellos presentan un mejor comportamiento ante el secado y cuales necesitan mayores temperaturas o tiempos para conseguir un porcentaje de secado que pueda considerarse razonable.

Más aun, con los resultados se busca ofrecer información valiosa para futuras investigaciones o trabajos en condiciones reales, con instalaciones similares o iguales a las ya presentadas, que puedan utilizar lo obtenido en esta investigación como un punto de partida o una referencia para avanzar o agilizar ciertos aspectos del proceso. Todo ello para que pueda ser interpretado no solo por personal cualificado sino también por personas ajenas al mundo ingenieril que puedan llegar a hacer uso de un secadero y que necesiten ciertas referencias para conocer cuánto tardan en secarse ciertos alimentos y que condiciones climáticas necesitan, que al fin y al cabo es uno de los propósitos de esta investigación.

## 2. INSTALACIÓN Y COMPONENTES

### 2.1 Secadero

El equipo con el que trabajaremos en el laboratorio como ya se ha dicho es un secadero solar indirecto, monitorizado con termopares y sensores, para controlar en todo momento la temperatura y la humedad, colocados en puntos estratégicos de la instalación.

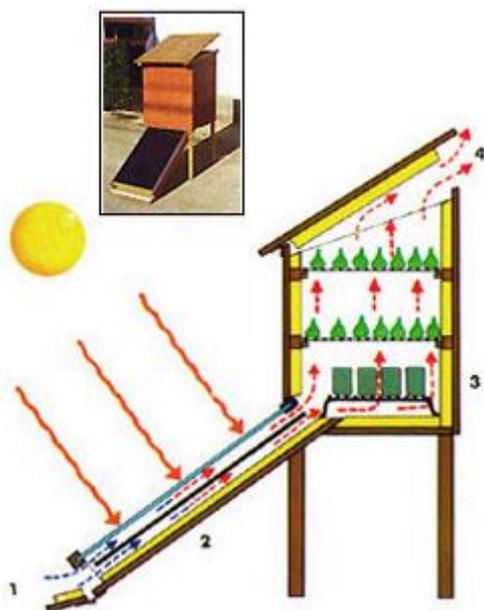


Fig. 13. Secadero solar indirecto y su funcionamiento. Obtenido de [14]

Las partes de este tipo de secadero son: colector, cámara de secado, bandejas y salida de aire. El colector consta de una cubierta que debe ser transparente a la radiación y la base suele ser negra para absorber el máximo de radiación posible, buscando que se concentre la mayor cantidad posible dentro del colector. Dentro de la cámara de secado se encuentran las bandejas donde se deposita el producto.

Vamos a explicar el proceso de secado y cómo funciona el secadero valiéndonos de la figura 13. El aire exterior entra por el colector (punto 1) con unas condiciones determinadas de humedad y temperatura que son las condiciones climáticas existentes en el lugar en el que se encuentre instalado el secadero. El colector (punto 2) a su vez recibe la radiación solar consiguiendo que el aire que pasa a través de él, aumente su temperatura y por tanto, disminuya su porcentaje de humedad relativa. Una vez que el aire ha fluido por el colector, asciende hasta la cámara (punto 3) con otras condiciones de humedad y temperatura diferentes a las que tenía cuando entro al colector. En la cámara previamente se han colocado las bandejas en las que hemos depositado el producto que queremos secar. El aire circula por la cámara, pasando por las bandejas absorbiendo la humedad de los productos. Finalmente, una vez que ya ha circulado por

todas las bandejas sale al exterior (punto 4). Este ciclo se repite durante todo el proceso de secado.

El ciclo se realiza gracias a la convección natural, producida por la diferencia de densidades en el aire debido a la diferencia de temperaturas al ser calentado en el colector. El hecho de que se utilicen estas instalaciones para el secado, en las que evitamos dejar a la intemperie los productos se debe a que de esta manera los aislamos de factores externos (lluvias, animales e insectos) que puedan alterar su composición y además evitamos que reciba directamente la radiación solar lo cual también puede afectar a la textura y al olor deseados junto a la capacidad de rehidratación [6].

### 2.1.1. Instalación real de trabajo



(a)

(b)

Fig. 14. Instalación del secadero. (a) Colector. (b) Cámara de secado.

En la figura 14 podemos ver la instalación real con la que se trabajó en el laboratorio. La figura 14 (a) se corresponde con el colector, mientras que la figura 14 (b) muestra la cámara de secado que está unida al colector.

La cámara de secado está diseñada para albergar varias bandejas con producto, pero en el laboratorio trabajamos únicamente con una rejilla que se colocaba encima de una báscula para poder, de esta forma, controlar la variación de masa. La disposición del producto dentro de la cámara es la siguiente:

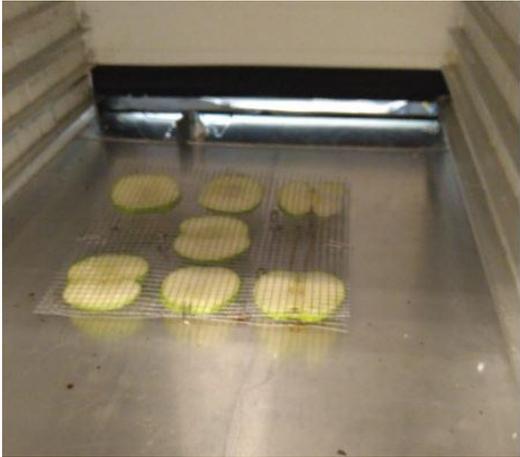


Fig. 15. Disposición dentro de la cámara.

## 2.2 Control de la instalación

El secadero con el que se trabajó tiene una serie de dispositivos para poder ser utilizado en interior, en ausencia de luz solar y para poder controlar las condiciones del aire entrante al colector.

El aporte energético para el calentamiento del aire se realiza mediante una resistencia que hace las veces de sol. En cuanto a las condiciones iniciales del aire (corresponderían a las condiciones que tendría el aire atmosférico a una hora determinada, para una región concreta con un clima específico), las controlaremos mediante una válvula de tres vías y una resistencia. El proceso para establecer las condiciones iniciales de temperatura y humedad es el siguiente: El aire se extrae de la red y se hace pasar por la válvula de tres vías (figura 16 (c)) que hace circular parte del aire por un depósito de agua (rodeado en azul en la figura 16) que posteriormente se une a la corriente principal, teniendo una corriente de aire con una humedad determinada. A continuación, el aire húmedo circula por otro dispositivo en el que se encuentra una resistencia que lo calienta hasta la temperatura deseada (rodeado en rojo en la figura 16). Después de este proceso entra en el secadero.

El esquema del sistema descrito anteriormente es este:

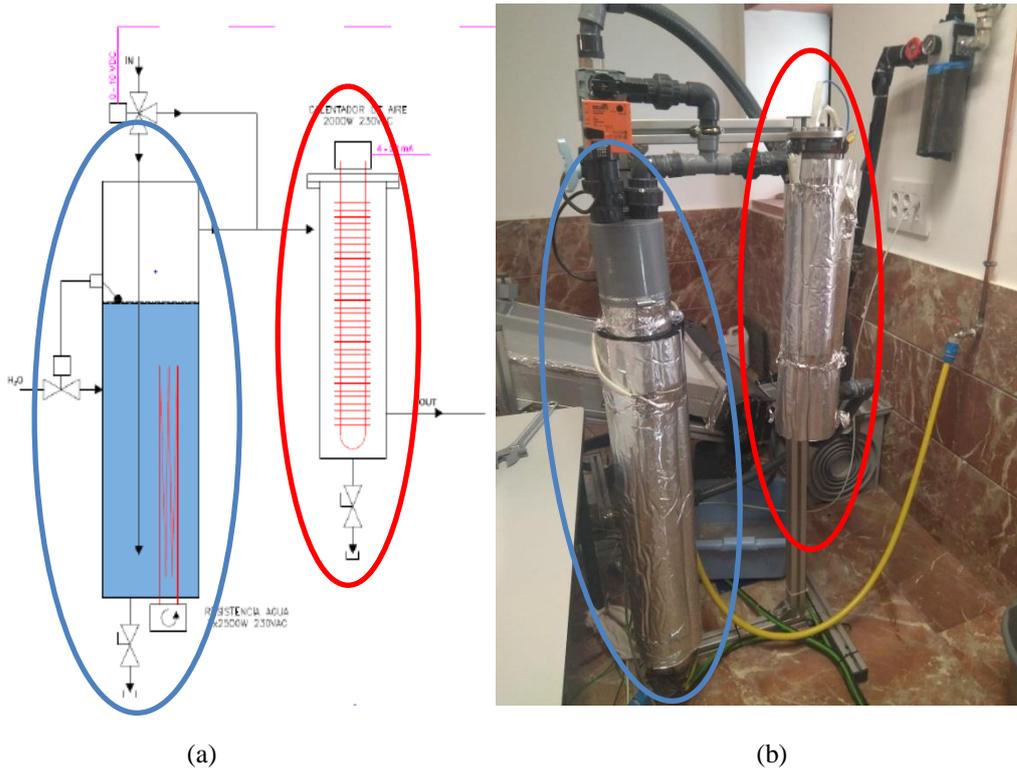


Fig. 16. Esquema del sistema de humidificación y calentamiento de aire. (a) Esquema de la instalación. (b) Fotos instalación real. (c) Detalle válvula de tres vías.

En la figura 16 (a) se muestra el circuito y el interior del sistema que establece las condiciones de temperatura y humedad del aire antes de entrar al colector. La figura 16 (b) se corresponde con la instalación real disponible en el laboratorio. El depósito que alberga la resistencia (rodeado en rojo), se conecta en su parte inferior con la entrada del

colector mediante una tubería de PVC, que es por donde circula el aire con las condiciones ya fijadas.

Tanto las condiciones de humedad y temperatura, como la resistencia que calentará posteriormente el aire en el colector, son controladas por un software diseñado exclusivamente para este propósito. Desde un ordenador estableceremos el porcentaje de humedad relativa, los grados a los que queramos que este el aire y la potencia que tiene que suministrar la resistencia, y el programa, a partir de estas instrucciones controlara la abertura de la válvula (midiendo cuánto aire deja pasar al depósito de agua para conseguir la humedad relativa especificada) y las resistencias para aportar el calor necesario, para conseguir las diferentes condiciones del aire en los diferentes puntos de la instalación.

Además el software guardara todos los datos (recogidos por los sensores) que se vayan teniendo a lo largo de cada prueba, realizando un muestreo con una frecuencia de 0.5 Hz (dos datos por segundo), tanto de las temperaturas y humedades a la entrada y salida del colector, a la salida de la cámara de secado y también datos del peso del producto para ver como varía (pérdida de humedad) a lo largo de la prueba a medida que pasa el aire caliente sobre él. El programa genera un archivo tipo texto con los datos, que es convertido a formato Excel, para poder ser leído y utilizado posteriormente en Matlab donde realizaremos la interpretación de los resultados y la representación de los mismos.

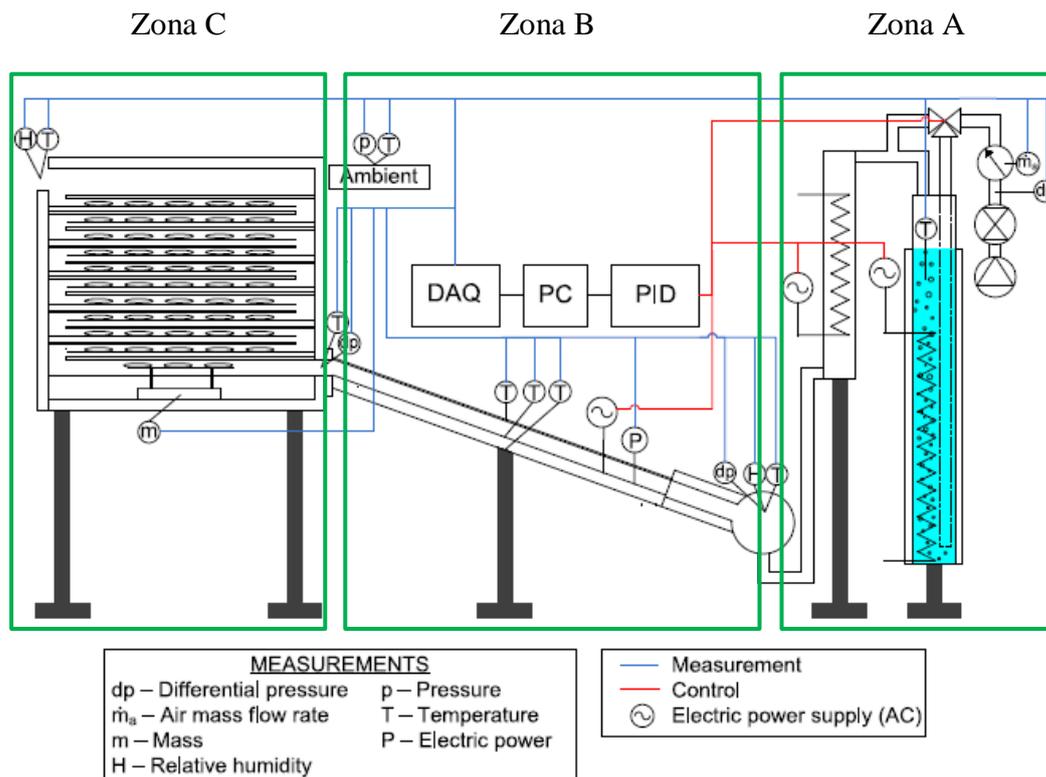


Fig. 17. Esquema completo de la instalación. De [15]

En la figura 17 se presenta el esquema global de la instalación con la que trabajamos en el laboratorio. Recorriendo la figura 17 de derecha a izquierda podemos ver 3 zonas por las que ira fluyendo el aire. La zona A representa el sistema que se encarga de fijar las condiciones iniciales, el cual hemos presentado anteriormente en detalle en la figura 16. La zona B está constituida por el colector y por la resistencia que aumenta de temperatura el aire que fluye por el colector. A y B se unen aguas abajo del colector por donde entra el aire con las condiciones fijadas en la zona A. La zona C corresponde con la cámara de secado, donde se alojan los productos para ser secado por el aire que llega de la zona B. Dentro de la cámara de secado representado por el símbolo m, tenemos la báscula presentada en el punto 2.1.1, imprescindible para controlar en todo momento del ensayo la variación de masa del producto.

Cada zona tiene además de los elementos primordiales que constituyen el secadero, una serie de sensores de medida repartidos estratégicamente para contralar en todo momento el funcionamiento de la instalación. Las líneas azules hacen referencia a los elementos encargados de la medida y las líneas roja a los de control.

### 3. ANÁLISIS PRELIMINAR

#### 3.1 Base teórica

Antes de hablar de los resultados y de los procesos de secado de las diferentes muestras, hay que introducir el fundamento teórico de la instalación y el trabajo previo de caracterización y manejo de todo el sistema.

El secado se realiza mediante una corriente de aire con unas condiciones de humedad y temperatura iniciales, que son fijadas previamente antes de entrar al colector. Dichas propiedades son fijadas mediante el estudio de la psicrometría.

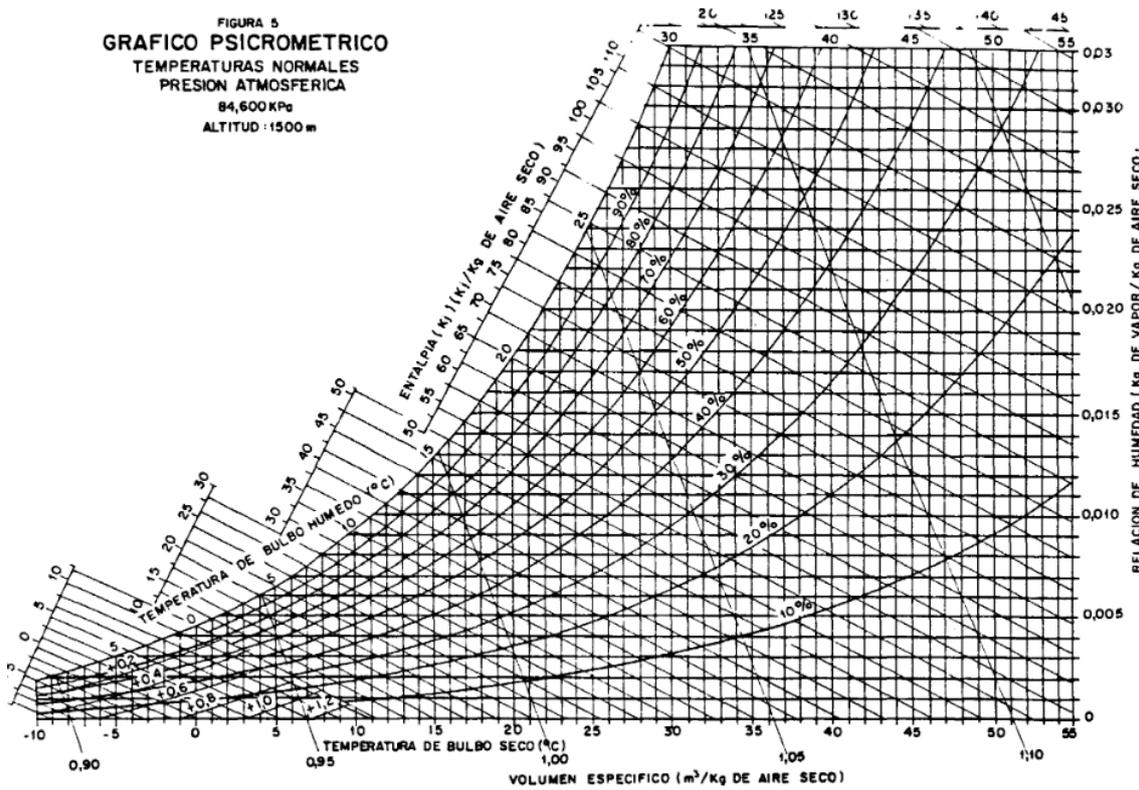


Fig. 18. Diagrama psicrométrico. De [16]

En la figura 18 se presenta el diagrama psicrométrico, el cual hemos utilizado a la hora de realizar los cálculos y para determinar las condiciones con las que vamos a trabajar.

La psicrometría se encarga del estudio de los sistemas constituidos por aire húmedo y de los procedimientos para controlar las características de dicho aire. El aire está formado por aire seco ( $m_a$ ) y por vapor de agua ( $m_v$ ) y tanto el aire como el vapor se consideran que tienen comportamiento de gas ideal. Para poder considerar que tienen comportamiento de gas ideal, las temperaturas de trabajo se tienen que encontrar dentro del rango de:  $-10^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$  [16]. En nuestros ensayos nos moveremos entre una temperatura mínima de  $22^{\circ}\text{C}$  y una temperatura máxima de  $35^{\circ}\text{C}$ , por tanto podremos considerar su comportamiento como ideal. Al ser ideales se registrarán y podremos calcular sus propiedades mediante la ley de Dalton o como se conoce comúnmente, la ley de los

gases ideales  $pV = nRT$ . Siendo  $p$  la presión,  $V$  el volumen,  $T$  la temperatura,  $n$  el número de moles y  $R$  la constante universal de los gases ideales. Sabiendo que el número de moles es  $n = \frac{m}{M_m}$  y que  $\frac{R}{M_m}$  será constante para cada gas, nos queda:

$$pV = mR_g T \quad (3.1)$$

A la hora de trabajar con el diagrama hay que conocer una serie de parámetros fundamentales para poder interpretarlo.

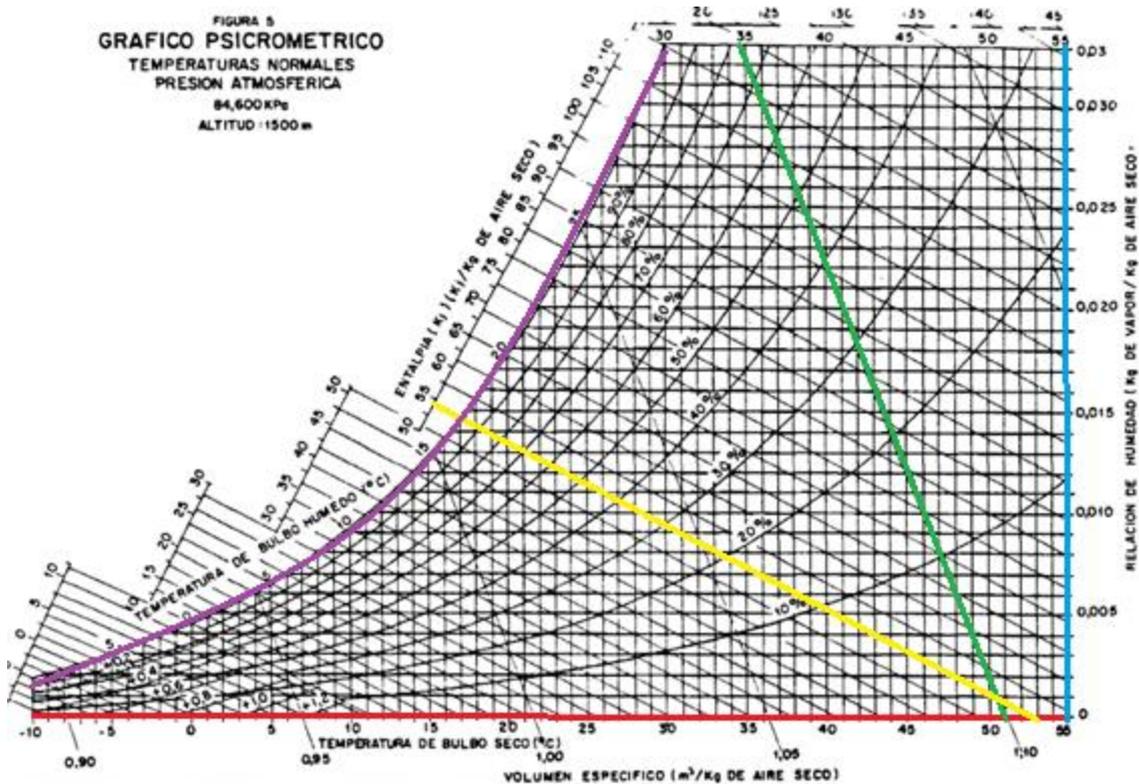


Fig. 19. Diagrama psicrométrico con los parámetros indicados.

La relación de humedades  $\omega = \frac{m_v}{m_a}$  que en el diagrama se corresponde con el eje de ordenadas pintado en azul, que indica los kilogramos de vapor de agua que hay por kilogramo de aire seco.

La humedad relativa, se da en porcentaje y está representada por las líneas curvas. Su expresión es la siguiente:  $\phi = \frac{P_v}{P_{vs}}$ , siendo  $P_v$  la presión de vapor y  $P_{vs}$  la presión de vapor saturado y representa la cantidad de vapor que tiene el aire respecto a la que podría tener si estuviera saturado, es decir, la máxima relación de vapor que podría aceptar. Una vez que el aire está saturado, tendríamos una humedad relativa del 100% lo que significa que no puede aceptar más vapor y llegando a la llamada temperatura de rocío o temperatura de saturación. A partir de este punto se produciría la condensación.

La temperatura de bulbo seco es la temperatura medida con un termómetro seco y se encuentra en el eje de abscisas del diagrama, pintado en rojo. La temperatura de bulbo

húmedo representa la temperatura medida con un termómetro envuelto en un tejido húmedo, midiendo de esta manera la temperatura húmeda del aire y en el diagrama se corresponde con la línea amarilla. Hay que señalar que las rectas que representan la temperatura de bulbo húmedo coinciden con las líneas de la entalpía, es decir que la recta amarilla y sus paralelas indican la entalpía y la temperatura de bulbo húmedo. Este hecho se debe a que al producirse la temperatura de bulbo húmedo de manera estacionaria, significa que el calor latente de evaporación es igual al calor que hay que aportarle al agua (aunque coincidan las rectas, los valores no coinciden).

Por último, la temperatura de rocío, la cual ya hemos presentado anteriormente, se corresponde en el diagrama con la curva representada en morado, que es el lugar donde intersectan las rectas de las temperaturas de bulbo húmedo, indicándonos que si nos encontramos en algún punto de dicha curva tendremos un aire totalmente saturado. La única manera de salir de esta situación y conseguir que el aire pueda aceptar más cantidad de vapor sin condensarse, es aportando calor para aumentar así la capacidad de almacenamiento del aire.

Basándonos en este diagrama y una vez presentadas las ecuaciones y los parámetros, vamos a explicar la razón de porqué calentar el aire al pasar por el colector, como se interpretan los resultados y cuál es la manera de proceder en la psicrometría.

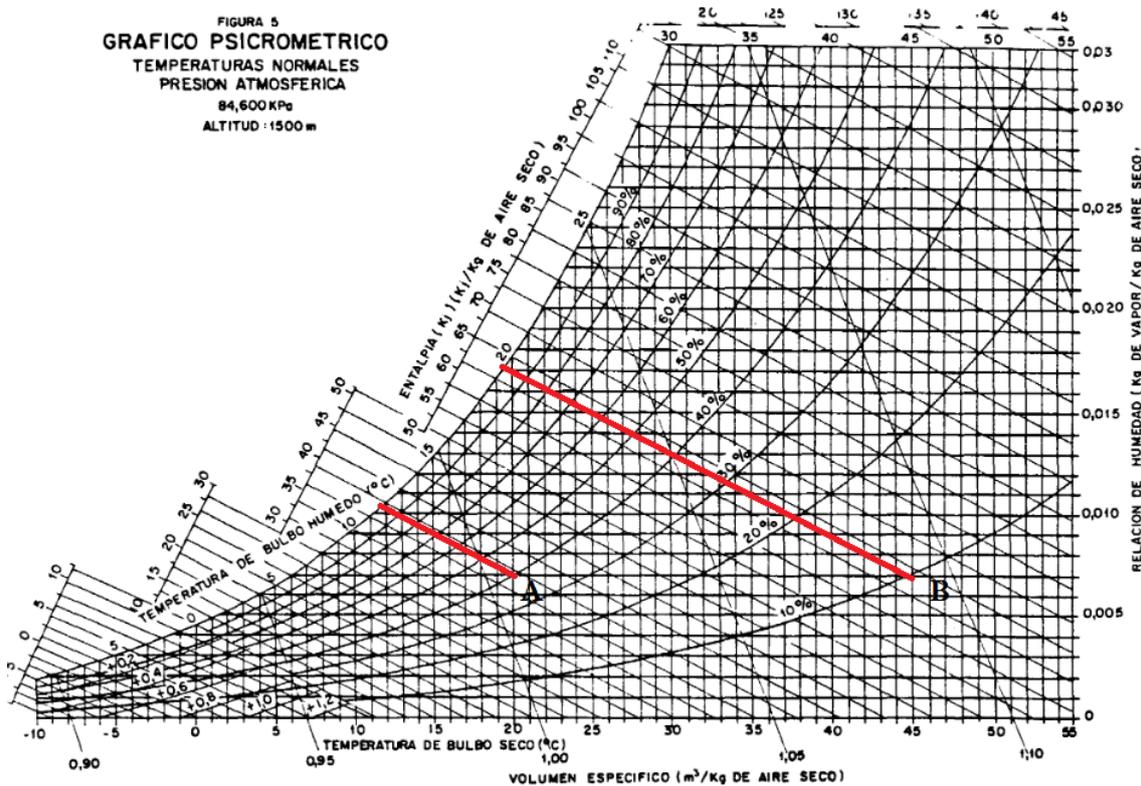


Fig. 20. Diagrama psicrométrico con los datos del ejemplo.

Observando la figura 20 se encuentran dos rectas coloreadas (punto A y punto B), representando cada una dos situaciones climáticas diferentes. Si se trabaja con el secadero en un clima con una humedad relativa, en torno a 40% y una temperatura

media de unos 20°C (en el gráfico esta situación se indica por la recta inferior, punto A), e introducimos el aire con estas condiciones directamente en la cámara de secado donde el propio aire extrae la humedad de los productos allí alojados, se puede comprobar que el recorrido hasta obtener un aire con 100% de humedad relativa (saturado), será mucho menor que el recorrido que habría, si nos encontramos como punto de partida en las condiciones representadas por el punto B. Podemos llegar al punto B, únicamente calentando el aire que se encuentra en el punto A hasta 45°C, de esta forma tendríamos aire con una mayor capacidad de secado, pudiendo extraer mayor cantidad de humedad de los productos en comparación con la situación de A sin llegar a saturarse.

Al calentar el aire inicial (punto A), nos movemos en línea recta en las rectas paralelas al eje x, que recordamos que representan a  $\omega$  y esto se debe a que en un secadero el calentamiento de aire mediante radiación solar, se produce en el colector, donde no se da intercambio de masa o lo que es lo mismo no hay ningún aporte de humedad al aire que está fluyendo por el colector, por eso mirando el diagrama psicrométrico si aumentamos de temperatura el aire sin que se produzca intercambio de masa, la relación de humedades permanecerá constante y por eso nos moveremos sobre una línea recta paralela al eje x desde el punto A al punto B. Dicho esto si calentamos el aire con las condiciones iniciales hasta 45°C, podemos observar que el aire hasta llegar a la temperatura de rocío puede aceptar mayor cantidad de humedad, es decir tiene un mayor recorrido en el diagrama, porque el recorrido empieza en una humedad relativa inferior a la de 40% y al aportar calor al aire conseguimos comenzar el proceso con una humedad relativa del 10%, permitiendo recibir 30 puntos más de humedad que antes. Esta es la razón de porqué suministrar calor al aire aprovechando la energía aportada por el sol, para asegurarnos una mayor capacidad de secado del aire, que influye en la cantidad de humedad que podremos extraer de los productos alojados en la instalación.

Debido a que toda nuestra investigación se realizó en un laboratorio que se encuentra en interior y que por tanto no hay posibilidad de trabajar con el secadero expuesto a la radiación solar como ya hemos indicado, recreamos este aporte energético utilizando una resistencia colocada en el colector (que es el lugar donde se reciben los rayos solares) para tener así, el foco transmisor de calor que aumente de temperatura el aire.

La ventaja de la resistencia es que seremos nosotros quienes controlemos las condiciones en todo momento sin depender de las fluctuaciones climáticas. Otra de las ventajas de la resistencia es que realizando un sencillo cálculo, conociendo previamente la temperatura de entrada al colector y la que queremos a la entrada de la cámara, podremos hallar el calor necesario que hay que aportar a la corriente de aire con la siguiente expresión:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (3.2)$$

Donde  $Q$  corresponde al calor que hay que aportar,  $m$  es el gasto másico,  $c_p$  es el calor específico y  $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre la entrada del colector y la entrada de la cámara de secado.

A lo largo de toda la investigación el gasto másico de aire con el que trabajaremos siempre será el mismo  $750 \frac{l}{min}$  ó lo que es lo mismo  $0,0145 \frac{Kg}{s}$ . Las propiedades del aire tanto  $c_p$  como la densidad ( $\rho$ ), se obtienen de las propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica para 300 K (ver anexo A).

### **3.2 Caracterización de la instalación**

Hay que señalar que la investigación tiene como referencia [15], ya que el secadero que utilizaremos es el mismo que se usó para dicha tesis y por tanto la primera parte del proyecto, que consistió en la caracterización y conocimiento de la instalación, se realizó teniendo en cuenta este trabajo.

Las condiciones del aire que introducíamos están basadas en datos observados en la tesis, los cuales usamos para comprobar el correcto funcionamiento de la instalación. Además de estas comprobaciones, todo el análisis previo consistió en realizar pruebas con diferentes condiciones para conocer que valores se podían alcanzar de un modo más sencillo por parte de la instalación y sobretodo, eran más estables durante un tiempo prolongado ya que los experimentos posteriores en los que trabajamos con producto, tienen una duración de 150 minutos.

Antes de mostrar los resultados sobre los datos de humedad y temperatura a los que llegamos y los cuales seleccionamos para ser utilizados en los ensayos, hay que decir que tuvimos que descartar para las pruebas el uso de la resistencia, ya que al realizar los ensayos previos de caracterización y comprobación su funcionamiento era irregular, impidiendo conseguir obtener ningún valor de potencia que fuera estable afectando por tanto, al resultado de las pruebas e impidiendo obtener información fiable y válida con la que trabajar. Por ello desde el control establecimos las condiciones teniendo en cuenta este hecho.

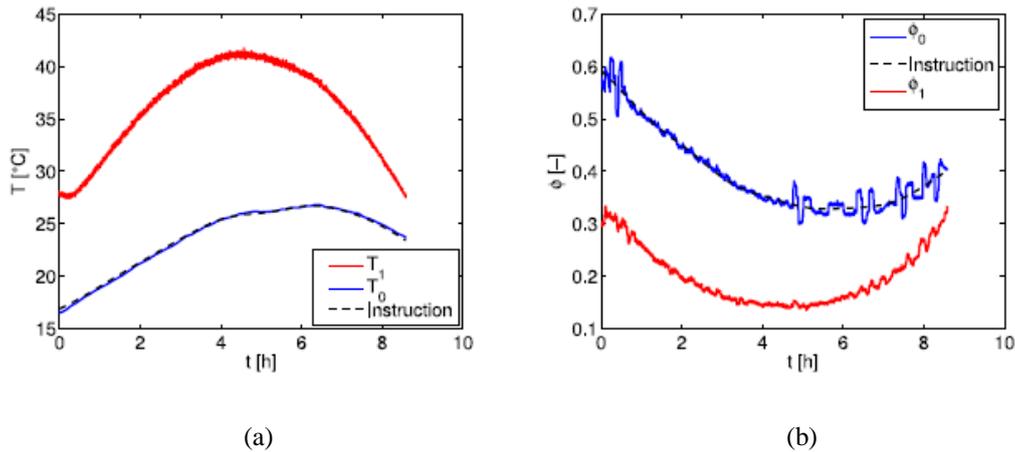


Fig. 21. Gráficas de la temperatura y humedad relativa en el colector. (a) Temperatura. (b) Humedad relativa. Obtenido de [15]

La figura 21 (a) muestra la temperatura y la figura 21 (b) la humedad relativa a la entrada y a la salida del colector, para un ensayo que tuvo una duración de 8 horas. Las curvas en rojo muestran las condiciones a la salida y las azules las condiciones a la entrada. A partir de esta información, introdujimos valores correspondientes a puntos de la figura 21 (a) y 21 (b) para ver si conseguíamos alcanzarlos y así demostrar que la instalación operaba correctamente.

Como ya hemos comentado no usamos la resistencia para nuestro trabajo y dado que la sustitución de la resistencia era inviable debido a que hubiese supuesto desarmar por completo la instalación, decidimos guiarnos por la curva a roja a la hora de establecer los valores de temperatura y humedad en el control, ya que en la práctica lo realmente importante es saber las condiciones del aire en la entrada de la cámara porque es con estas condiciones con las que se produce el secado.

Las muestras tomadas en laboratorio para la comprobación del correcto funcionamiento del secadero son las siguientes:

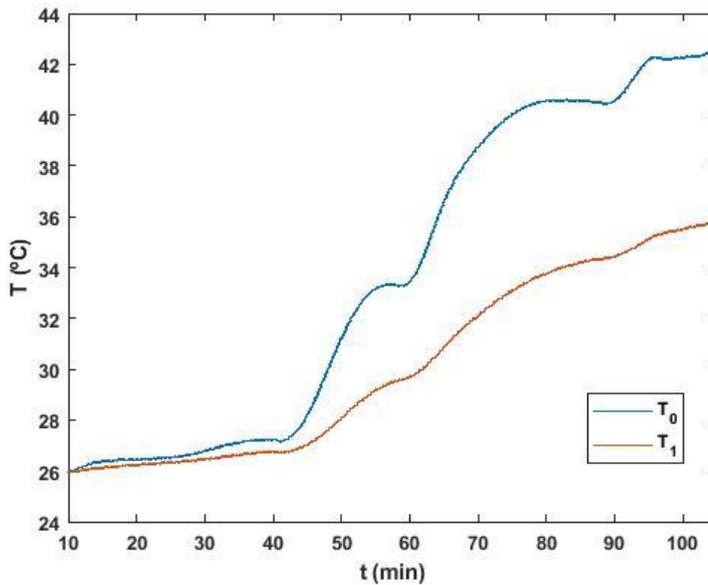


Fig. 22. Temperatura a la entrada y a la salida

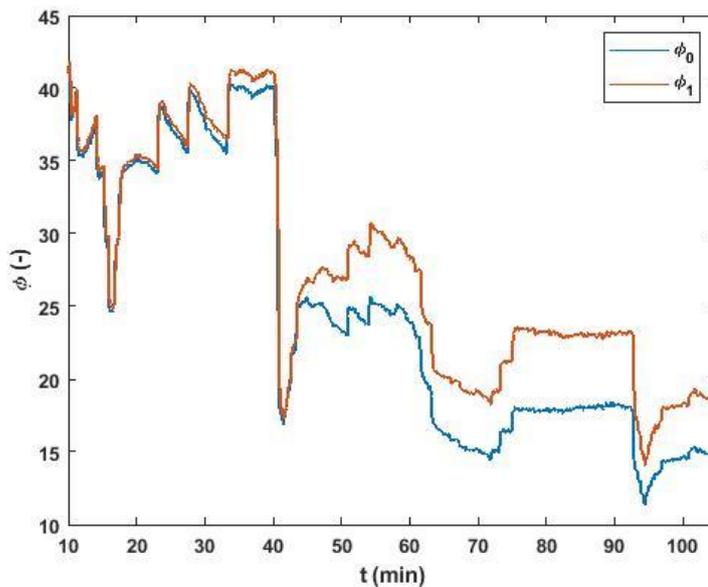


Fig. 23. Humedad a la entrada y a la salida

La figura 22 muestra la temperatura a la entrada del colector  $T_0$  y a la salida del mismo  $T_1$ . Como ya hemos apuntado anteriormente el no poder dar un aporte de calor al aire a su paso por el colector implica que, el colector se encuentre a la temperatura media de la sala donde se sitúa el secadero, por tanto, cuando la temperatura a la entrada del colector introducida desde el control sobrepasa y supera a la temperatura a la que se encuentra el colector, se produce una pequeña pérdida de temperatura. A la hora de escoger las condiciones con las que trabajamos a lo largo de todos los ensayos de secado se tuvo en cuenta este hecho.

Fuimos estableciendo temperaturas de forma progresiva, una vez que la instalación alcanzaba el valor correspondiente pasábamos a establecer la siguiente temperatura. Las temperaturas fueron: 26°C, 27°C, 33°C, 40°C y 42°C.

En la figura 23 se presentan el porcentaje de humedad relativa tanto a la entrada  $\phi_0$ , como a la salida del colector  $\phi_1$ . Observando la figura se puede apreciar que la humedad a la entrada y a la salida en la primera mitad del tiempo del ensayo es prácticamente la misma, mientras que en la segunda mitad del ensayo difieren. Esto se debe a que cuando la humedad relativa es mayor (en la primera parte del ensayo), la temperatura es menor, entonces al ser la temperatura más baja tanto la temperatura de entrada al colector como la del propio colector estarán en el mismo rango de valores, por tanto, no tendremos de momento pérdida de temperatura entre la entrada y la salida del colector, lo que se traduce en que las condiciones serán en todos los puntos (entrada, salida y colector) las mismas. En cambio, en la segunda parte del ensayo la temperatura comienza a ser cada vez mayor y por tanto supera a la temperatura a la que se encuentra el colector, por esto a la entrada, antes de fluir a lo largo del colector, la humedad será menor que a la salida del colector donde la temperatura es algo inferior que a la de la entrada y mirando el diagrama psicrométrico, como no se produce ningún intercambio másico de vapor con el aire que circula por el colector, a la salida, el aire será más frío y por tanto la humedad relativa será superior (recordar que según el diagrama al movernos en la misma línea de  $w$ , en un enfriamiento pasamos de una humedad relativa menor a una mayor)

Las fluctuaciones de la figura 23 se deben a que la válvula de 3 vías que regula la humedad que debe tener el aire es muy sensible y no consigue mantener perfectamente el valor fijado desde el control por eso presenta cierta inestabilidad. Esta inestabilidad es más acusada al cambiar de un valor a otro de humedad, cada vez que desde el control establecíamos un nuevo valor la instalación fluctuaba tomando valores cercanos por encima y por debajo durante un tiempo, hasta que conseguía estabilizarse en el entorno del valor buscado. Para la humedad los valores introducidos fueron: 35%, 40%, 25%, 18% y 15%.

En nuestro caso el objetivo del ensayo preliminar fue comprobar que la instalación podía alcanzar correctamente valores que fueran establecidos desde el control, los valores fueron obtenidos de la figura 21 y se cogieron valores alejados entre ellos. Si comparamos las figuras 22 y 23 con la figura 21 vemos que hay mayores variaciones en las dos primeras, esto se debe a que en la figura 21 las condiciones fueron cambiando muy poco a poco progresivamente a lo largo de un tiempo elevado, mientras que en las figuras 22 y 23 se fueron estableciendo valores que presentaba gran diferencia entre ellos y se hizo en un tiempo muy inferior a 8 horas.

Con los resultados fijamos 4 puntos, es decir 4 escenarios diferentes de temperatura y humedad relativa que fueran alcanzables por la instalación y que se mantuvieran estables durante el tiempo que durase el ensayo para poder obtener unos resultados válidos.

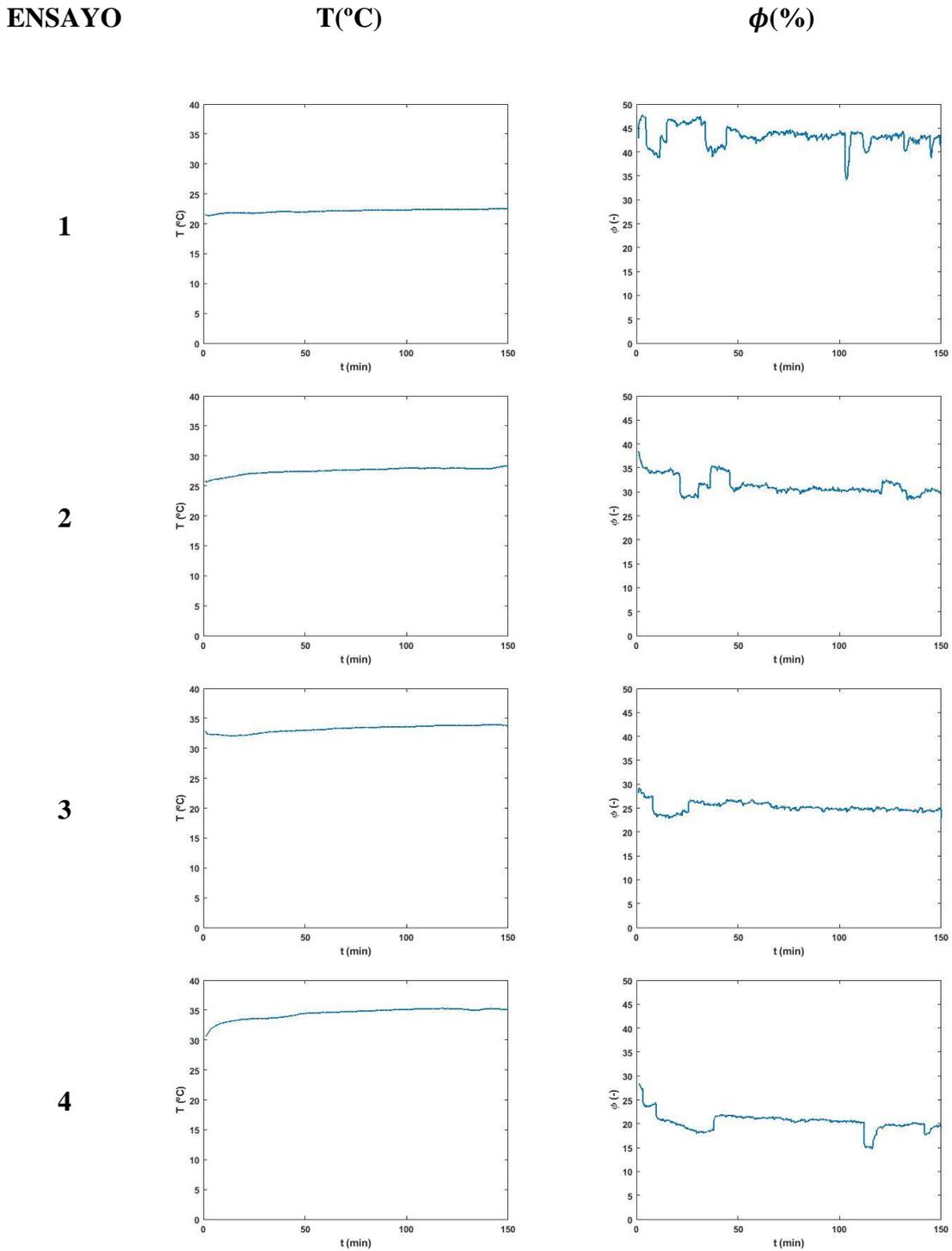
Estos 4 puntos presentados en la tabla 3.1, fueron las temperaturas y humedades a las que sometimos a los productos alimenticios, simulando tener el secadero instalado en una región con un clima concreto.

**Tabla 3.1. Condiciones de ensayo**

<b>ENSAYO</b>	<b>T(°C)</b>	<b><math>\phi</math>(%)</b>
<b>1</b>	<b>22</b>	<b>44</b>
<b>2</b>	<b>28</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>33</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>35</b>	<b>20</b>

Hay que señalar que la tabla 3.1 representa las condiciones a la entrada de la cámara de secado o lo que es lo mismo a la salida del colector.

**Tabla 3.2. Condiciones de ensayo representadas en Matlab**



A la vista de la tabla 3.2 podemos apreciar que el sistema alcanza y mantiene fácilmente la temperatura, pero para la humedad le es más complicado mantener durante 150 minutos el mismo valor, algo que es más acusado para mayores valores de humedad. Dicha variación se produce en un rango de valores de dos puntos como máximo por

encima y por debajo del valor fijado desde el control, lo cual supone un error de los equipos de control asumible a la hora de realizar la investigación.

### 3.3 Estimación de la radiación

Como hemos señalado, el no poder usar la resistencia afecta a las temperaturas que podremos alcanzar dentro de la cámara de secado, haciendo que trabajemos con temperaturas inferiores a las esperadas en la instalación del secadero. Es por ello que vamos a realizar un estudio de que temperatura se podría esperar tener a la entrada del cámara si tuviéramos el secadero trabajando al aire libre un día cualquiera.

Si tenemos en cuenta la mayor temperatura que alcanza el aire en los ensayos es de 35°C, cuando se trabaje en la realidad con la instalación expuesta al sol, podremos alcanzar temperaturas cercanas a 50°C, pudiendo decir entonces que se producirá una mayor pérdida de masa para las horas más intensas del día en las que tengamos los picos de irradiación sobre la horizontal terrestre.

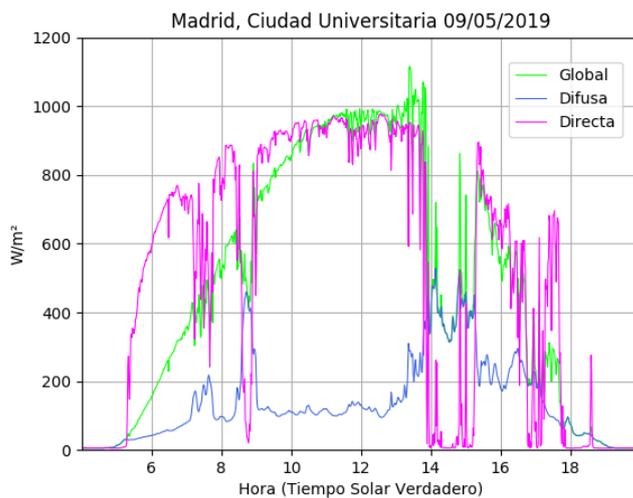


Fig. 24. Radiación a lo largo del día 9 de mayo de 2019. Obtenido de [17]

El día elegido para realizar el análisis es el 9 de mayo de 2019 y en la figura 24 se presenta la irradiación recogida a lo largo del día. Con esta información podremos analizar qué ocurre teniendo unas condiciones climáticas reales.

Volvemos a utilizar la ecuación 3.2 donde  $Q$ , la obtenemos de la figura 24, multiplicándola por el área del colector  $A = 0,5m^2$ . El resto de datos son con los que hemos trabajado a lo largo del proyecto.  $m = 0,0145 \frac{Kg}{s}$ ,  $cp = 1 \frac{KJ}{KgK}$ . En cuanto a la diferencia de temperaturas, la temperatura inicial varía en función del momento del día, pero será un dato conocido, mientras que la temperatura final será el dato que obtendremos al despejar en la expresión.

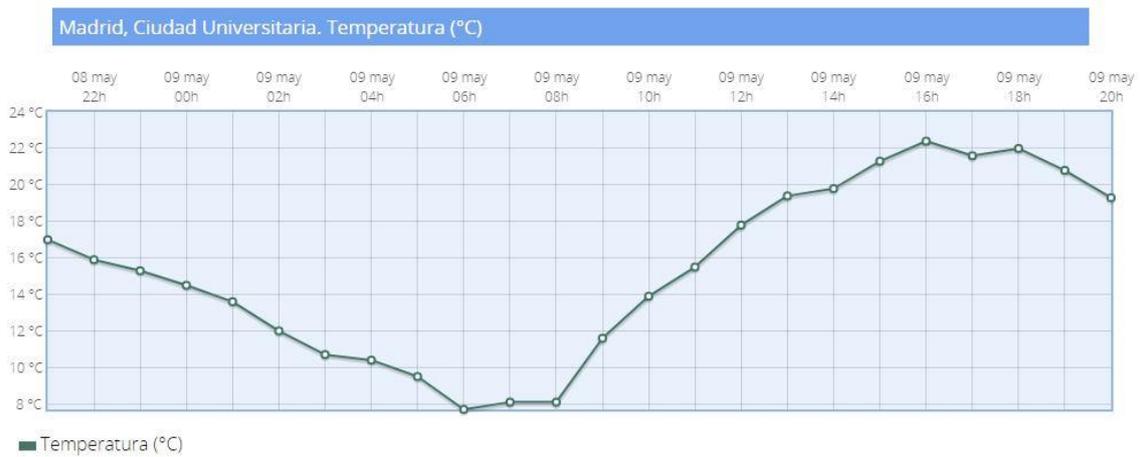


Fig. 25. Evolución de la temperatura a lo largo del día 9 de mayo de 2019 [18]

En la figura 25 tenemos los datos de temperatura para las distintas horas del día 9 de mayo. Esta temperatura hace referencia a la temperatura a la que entrara el aire en el colector, con esta información y los datos de irradiación podremos hallar a que temperatura entraría el aire a la cámara de secado.

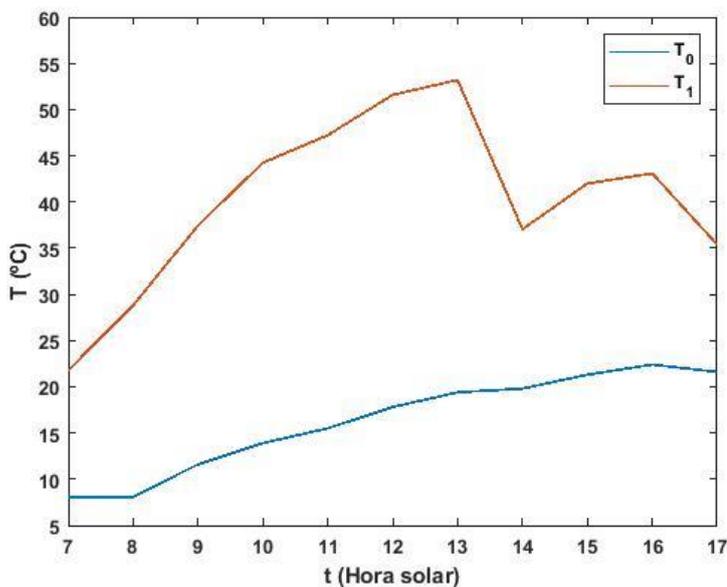


Fig. 26. Temperaturas a la entrada y a la salida del colector.

En la figura 26 se presenta la temperatura  $T_0$  registrada a lo largo del día y la temperatura  $T_1$  que se alcanzaría en el colector con la irradiación existente observamos que existen fluctuaciones en la temperatura a la que el aire sale del colector. Si nos fijamos en la figura 24 apreciamos grandes diferencias en los datos según la hora del día, la explicación la encontramos en que en la realidad, lo normal es que haya nubosidad y condiciones climáticas cambiantes lo que repercute en que haya

variaciones en los datos sobre la radiación registrados por los equipos disponibles, ya que las nubes actúan como pantalla y provocan la dispersión de la radiación, que supone en la práctica un menor incremento de temperatura del aire a su paso por el colector.

La época del año y las condiciones del día elegido para el secado de productos afectaran a la temperatura que alcanzaremos en el secadero. Tendremos unas condiciones más ventajosas en verano debido a la mayor temperatura y a la poca presencia de nubosidades y peores condiciones para los meses de invierno. En nuestra estimación hemos elegido un día tipo de la estación de primavera, en la que existen temperaturas intermedias y tenemos la presencia de nubes, aún con eso, el rango de temperaturas en el que nos movemos se encuentra entre 21,8°C y 53,2°C. Por tanto podemos decir que para la mayor parte del año se va a poder secar los productos a temperaturas superiores a las que hemos utilizado en nuestros ensayos, lo que influirá en la reducción del tiempo de secado.

### 3.3.1 Influencia de la nubosidad en la radiación incidente

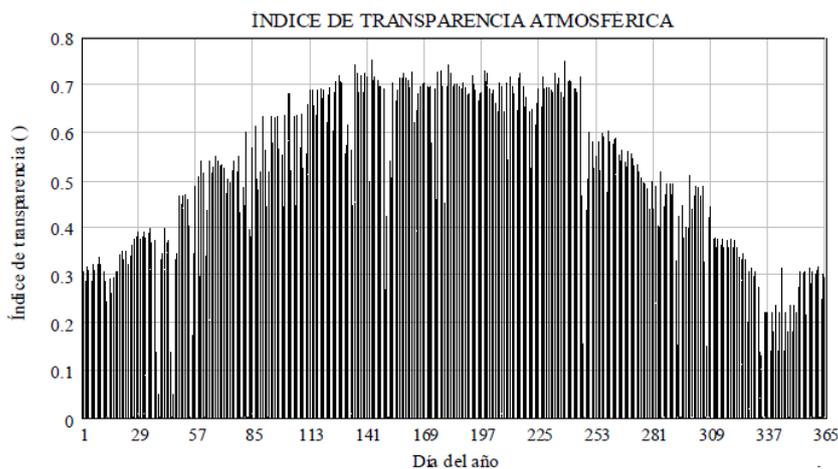


Fig. 27. Índice de transparencia atmosférica a lo largo de un año. De [19]

Podemos observar en la figura 27 el índice de transparencia atmosférica  $kt = \frac{I_H}{G_{on}}$ . Nos sirve para conocer cuánto afecta a la radiación recogida en la superficie terrestre, la existencia de nubes.  $I_H$  se corresponde con la radiación global sobre la superficie horizontal mientras que  $G_{on}$ , es la constante solar, que indica la radiación que llega a la tierra antes de atravesar la atmósfera. La división de estos términos indica la nubosidad existente ya que cuanto menor sea  $Kt$ , menos radiación llega a la superficie terrestre por tanto significará, que hay una alta nubosidad dispersando la radiación. Por tanto, podemos observar que en los meses de invierno la radiación que consigue superar los filtros existentes en la atmósfera es muy inferior a la que se tiene en el resto de estaciones. Hecho que afectara negativamente al rendimiento del secadero impidiendo alcanzar temperaturas suficientemente elevadas que permitan reducir los tiempos de reducción de humedad.

## 4. METODOLOGÍA Y PREPARACIÓN

### 4.1 Introducción a los ensayos

Una vez caracterizada la instalación y encontradas unas condiciones con las que trabajar, procedemos a secar productos. Ya que el uso primordial de estas instalaciones va a consistir en ofrecer una alternativa real a la conservación de alimentos mediante el secado de los mismos, nos decidimos por escoger comestibles esenciales en una dieta saludable como son las frutas y las hortalizas. Elegimos por tanto secar manzanas, plátanos y zanahorias.

La metodología seguida a la hora de secar las muestras consistió en cortar cada uno de los alimentos con las mismas dimensiones y mismo espesor para todos los ensayos. En cuanto al espesor, se cortaba cada producto lo suficientemente delgado como para poder despreciarlo y poder adecuar las curvas representativas de la cinética de secado mediante las ecuaciones del modelo Thin-layer, que desarrollaremos más adelante donde mostraremos en que consiste y las ecuaciones que lo definen. Las muestras eran cortadas y rociadas con limón, esto es debido a que el ácido cítrico previene la oxidación de las muestras [15]. Por último se colocaban las muestras sobre una rejilla que era introducida en la cámara de secado y posada sobre la balanza. Se realizaron cuatro ensayos para cada producto correspondiente cada uno, a las diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa previamente obtenidas en la caracterización de la instalación. Cada ensayo tiene una duración de 150 minutos.

#### 4.1.1 Efectos del ácido cítrico

Las muestras, tanto de zanahoria, manzana y plátano se introducen en el secadero sin ningún tipo de protección, exponiéndolas directamente al paso de aire para conseguir eliminar el contenido de humedad que se encuentra en su interior. Como consecuencia negativa de esta exposición, se produce el deterioro superficial de las muestras debido a que el contacto de las muestras con el oxígeno conlleva una reacción química de oxidación. Esto no ocurre a temperaturas bajas, pero el inconveniente es que nuestros experimentos se basan en el incremento progresivo de la temperatura, por tanto a medida que transcurre el ensayo se acelera el proceso.

Como paso previo a la introducción de las muestras en la cámara de secado, una vez hemos cortado los productos con las dimensiones correctas, procedemos a cortar un limón y a rociar cada pieza del ensayo correspondiente con el zumo obtenido de exprimir el limón.

La razón de realizar esta operación se debe a que el limón cuenta en su composición con ácido ascórbico que previene del proceso de oxidación, ya que es un elemento

antioxidante [20] [21]. Las propiedades antioxidantes se demuestran con el ensayo DPPH, que ya se introdujo y se explicó en el punto 1.2.

Por todo esto se rocían las muestras con limón, para prevenir el deterioro durante el proceso de secado, ya que sin esta operación dada la duración del ensayo los productos se verían muy perjudicados.

#### 4.2 Muestras

En cuanto a las muestras, los espesores eran; para manzana 3 mm, las de zanahoria de 1,5 mm y las de plátano de 2,5 mm y su distribución en la bandeja era la siguiente:

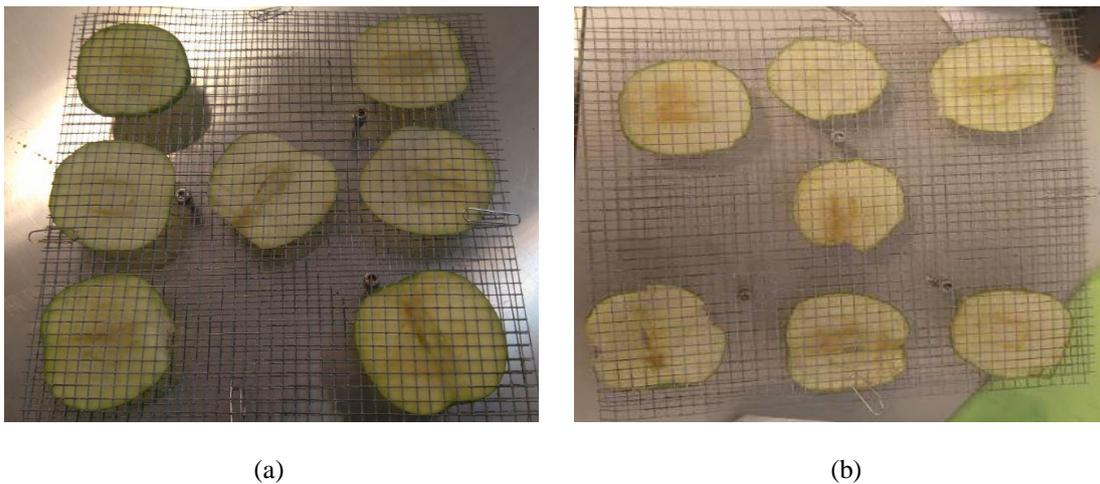


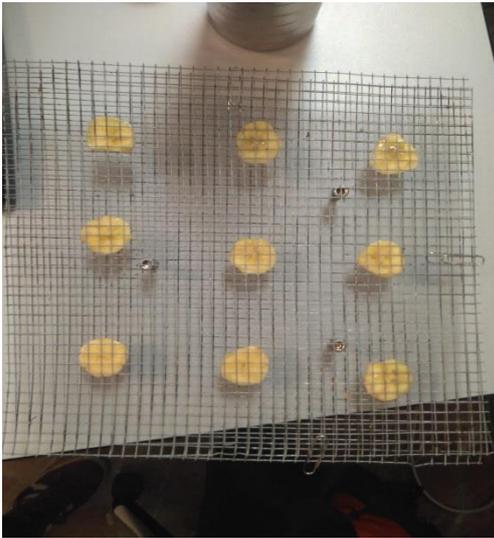
Fig. 28. Disposición de la manzana. (a) Antes de ser secada. (b) Después de ser secada.



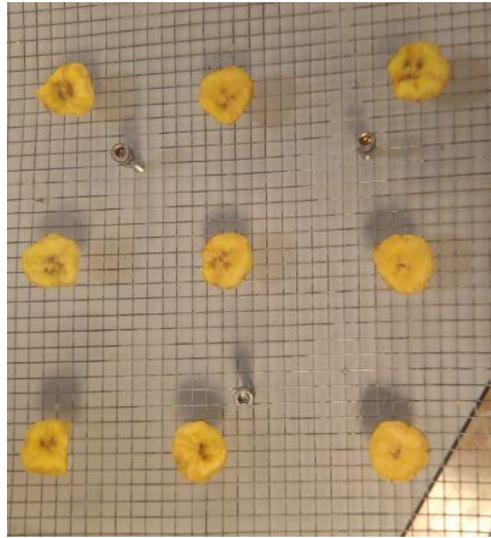
Fig. 29. Detalle manzana seca.

En la figura 28 (a) se presenta la manzana antes de ser secada y en la figura 28 (b) una vez ha sido secada. En la figura 29 se presenta el detalle de la manzana seca, donde

podemos observar como al perder masa debido a la extracción de humedad presenta contracciones y pliegues así como una pérdida de volumen.



(a)



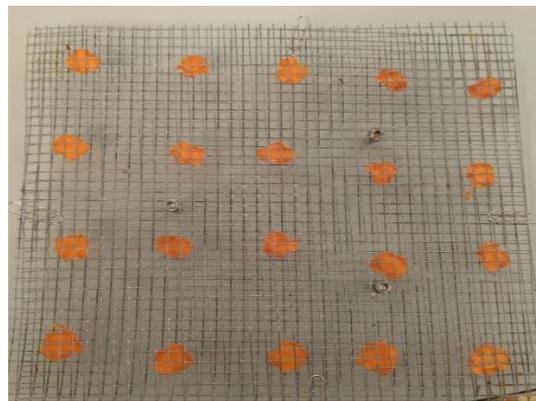
(b)

Fig. 30. Aspecto del plátano. (a) Antes de sufrir el secado. (b) Después de sufrir el secado.

En la figura 30 (a) se presenta el plátano antes de ser introducido en el secadero y la disposición en la rejilla de soporte. En la figura 30 (b) se tienen las muestras de plátano una vez han sufrido el proceso de secado. Podemos observar cómo una vez ha sido secado el plátano se pierde volumen así como se ve afectado su aspecto.



(a)



(b)

Fig. 31. Zanahoria. (a) Antes de entrar en la cámara. (b) Después de sufrir el secado.

En la figura 31 (b) se presenta la zanahoria después de ser sometida a la extracción de humedad. La zanahoria es un buen ejemplo para ver el cambio que existe entre un producto sin secar y una vez ha sido secado. Si comparamos la figura 31 (b) con la figura 31 (a) (donde la zanahoria aún no ha sido secada) podemos ver como después de someterla al secado, sufre una contracción debido a la pérdida de agua y una clara reducción de volumen.

A la vista de las fotografías apreciamos que para los tres productos, una vez han sido sometidos a un proceso de secado, se dan cambios importantes en sus características. Podemos ver cómo la pérdida de agua supone una pérdida de masa que conlleva a una reducción del espacio ocupado, algo que se puede observar en la contracción que sufre cada producto. Este fenómeno se aprovecha para optimizar el almacenamiento de los productos ya que una vez deshidratados ocupan menos volumen.

Comparando las características físicas de los productos antes de ser secados y después, hay que comentar que el producto seco, presenta un comportamiento más quebradizo y frágil a diferencia de cuando aún no ha perdido la masa de vapor existente en su interior, que presenta un comportamiento más flexible.

### **4.3 Temperatura de transición vítrea**

En las figuras presentadas en el punto 4.2 hemos podido observar las diferencias existentes entre el producto antes de ser sometido al proceso de secado y después. Se aprecian cambios a nivel macroscópico, pero además existen cambios a nivel microscópico que tienen una serie de consecuencias, como que el producto una vez seco se encuentre en un estado más rígido que antes. A su vez en estos cambios a nivel microscópico encontramos la explicación de porqué una vez secos los productos tienden a aguantar durante más tiempo sin degradarse.

Para explicar lo anterior, vamos a ayudarnos del concepto de temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ).  $T_g$  representa la temperatura a la cual, un compuesto o un material pasa de un estado inestable y amorfo a un estado en el que se produce una situación de estabilidad, el llamado estado vítreo. Esta temperatura representa un línea divisoria en la que dependiendo en que zona nos encontremos (por encima o por debajo de esta temperatura), tendremos un producto que pueda ser conservado durante un largo tiempo o un producto que se deteriore rápidamente. La temperatura de transición vítrea es propia de cada producto y para el caso que nos ocupa, por estar los productos alimenticios formados por varios componentes supone que el paso de un estado a otro se produce en un intervalo de temperaturas y no en una temperatura concreta [22].

#### **4.3.1 Relación entre la temperatura de transición vítrea y el secado**

Para referirnos a estos dos estados contrapuestos (estable o inestable), vamos a utilizar a partir de ahora dos términos usados en la literatura, que son: el estado vítreo para el estado más estable y rígido y gomoso para el estado amorfo, que es el estado natural en que se encuentran los productos alimenticios cuando no han sido sometidos a ningún proceso y es en este estado donde el deterioro se produce antes que en el estado estable.

Como hemos dicho, los productos cuando se encuentran en el estado vítreo presentan una mayor estabilidad lo que repercute favorablemente en su velocidad de degradación,

consiguiendo disminuirla y esto nos ayuda a explicar el porqué del secado de productos [22]. La temperatura de transición vítrea se ve afectada por el contenido de agua de cada producto, siendo contenido en agua y  $T_g$  inversamente proporcionales. A medida que reducimos el contenido de agua aumentamos la temperatura de transición vítrea. En el proceso de secado, lo que estamos haciendo es disminuir el contenido de agua de los productos consiguiendo de esa manera aumentar las probabilidades de situar a las muestras en el estado estable (vítrea) ya que al reducir el agua la temperatura de transición vítrea aumenta aumentando a su vez, la región en la que los productos son estables.

### 4.3.2 Influencia del contenido de agua

Con el ejemplo anterior hemos querido mostrar la importancia que tiene y cómo afecta el contenido del agua en la temperatura de transición vítrea y en la conservación de los alimentos.

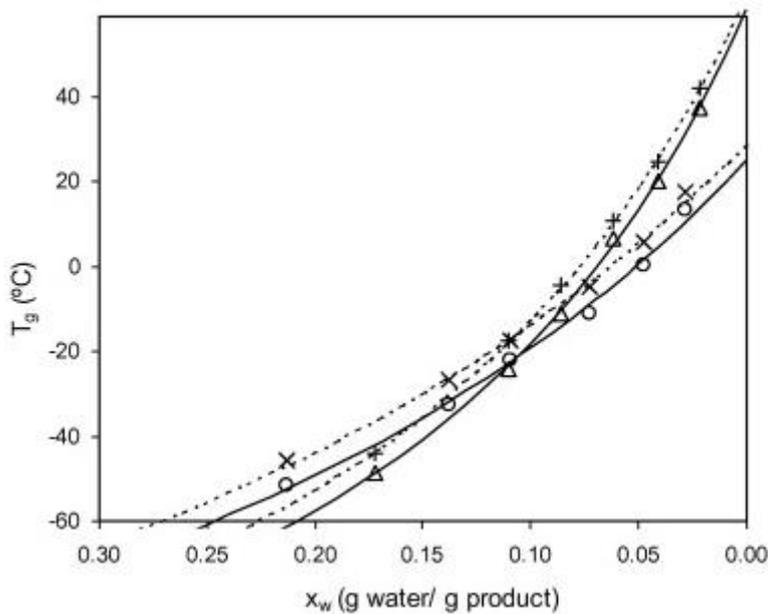


Fig. 32. Efecto del contenido del agua en la  $T_g$  para manzana y plátano [23]

En la figura 32 se presentan los gramos de agua por cada gramo de producto frente a la temperatura de transición vítrea. En la zona inferior de las curvas nos encontramos en el estado vítreo, mientras que por encima se está en el estado amorfo e inestable. Podemos observar que a medida que reducimos la masa de agua de los productos, aumenta la temperatura de transición vítrea, lo que significa que la región en la que el producto se encuentra en el estado estable es mayor o lo que es lo mismo no necesitaremos temperaturas excesivamente bajas para poder conservar los productos en un estado estable. Esto se debe a que el mayor contenido de agua en los alimentos, hace que la movilidad de las moléculas de soluto sea mayor, por tanto, la energía calorífica que hay

que cederles para poder pasar del estado vítreo al estado gomoso y flexible es menor [23]. Nos interesa entonces reducir el contenido de agua, para conseguir que la temperatura de transición vítre sea mayor y “dificultar” el paso al estado inestable.

Con este análisis aportamos la explicación microscópica de porqué es beneficiosa la acción del secado y porqué una vez deshidratados los alimentos duran más en el tiempo sin sufrir deterioro a diferencia de cuando los encontramos en su estado natural, que es cuando el contenido de agua es mayor y por tanto a la temperatura ambiente, los productos se encontrarán en el estado inestable ya que la temperatura de transición vítre en esta situación, se encuentra en un rango de temperaturas muy bajo.

#### 4.4 Thin-layer

El mecanismo del secado se basa en la difusión de humedad, se produce una transferencia de masa entre el producto y el aire que circula alrededor de él. Vamos a estudiar el proceso de secado de los diferentes productos para temperaturas constantes, mediante el modelo Thin-layer que consiste en secar las muestras considerándolas una capa de partículas o láminas [24] (es por eso que las muestras son cortadas con el mínimo espesor, como hemos indicado en el punto 4.1).

Utilizaremos el modelo para ajustar las curvas de secado obtenidas en los ensayos para las temperaturas utilizadas, consiguiendo de esta manera describir correctamente el proceso de secado y el mecanismo difusivo que se produce. Encontramos en la literatura varios modelos de Thin-layer para distintos productos, dichos modelos se basan en la segunda ley de Fick, la cual describe el mecanismo difusivo de masa y calor en régimen transitorio [25]. Gracias a esto, podemos escoger el modelo que mejor ajuste y prediga nuestra curva para el secado de la manzana, el plátano y la zanahoria.

Partiendo de la segunda ley de Fick:

$$\frac{dM}{dt} = D \frac{d^2 M}{dr^2} \quad (4.1)$$

Siendo  $M$  el contenido de humedad y  $r$  el recorrido de difusión [24]. Derivando de la segunda ley de Fick (4.1), considerando que la resistencia al flujo de humedad está uniformemente distribuido en el interior del material, que el coeficiente de difusión  $D$  es independiente del contenido de humedad y estableciendo las condiciones de contorno adecuadas conseguimos la solución a esta ecuación para distintas formas de las muestras, rectangular, esférica o cilíndrica [26]:

$$\begin{aligned} t = 0, & \quad 0 < r < L, & \quad M = M_i \\ t > 0, & \quad r = 0, & \quad \frac{dM}{dr} = 0 \\ t > 0, & \quad r = L, & \quad M = M_e \end{aligned}$$

Obtenemos como solución a 4.1 la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (4.2)$$

$MR$  es el ratio de humedad (viene del inglés *moisture ratio*),  $M_0$  la humedad inicial de la muestra,  $M(t)$  la humedad en cada instante de tiempo y  $M_e$  el contenido de humedad en el equilibrio, es decir cuando ya no es posible extraer más humedad del producto. La ecuación 4.2 es la que usaremos para realizar el estudio de la variación de humedad de los productos.

Los modelos presentes en la literatura para el ajuste del *moisture ratio* son los siguientes:

**Tabla 4.1. Modelo Thin-Layer [27]**

<b>CURVAS MODELO PARA THIN-LAYER</b>	
<b>NOMBRE</b>	<b>MODELO</b>
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two-Term	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Two-Term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
Aproximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Midilli et al.	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

## 5. TRABAJO EXPERIMENTAL

Una vez presentada y explicada la teoría que sirvió de base para todo el trabajo experimental, procedemos a mostrar y analizar los resultados obtenidos.

### 5.1 Estudio de la pérdida de masa

Los productos fueron sometidos a cuatro condiciones diferentes de humedad y temperatura, donde se observan cambios a medida que se les somete a condiciones más severa. La temperatura más elevada es en la que se espera obtener las mayores pérdidas de masa, debido a que el aire tiene mayor capacidad de extracción de humedad. La pérdida de masa se puede estimar teóricamente, ya que conocemos los datos sobre temperatura, humedad, presión y flujo de aire. A continuación, vamos a realizar una comparación entre lo que se espera perder de masa, con lo que se obtuvo en el laboratorio. Primero presentamos la evolución de la masa para cada producto cuando fueron sometidos a la mayor temperatura, que es cuando se tiene la mayor reducción de masa.

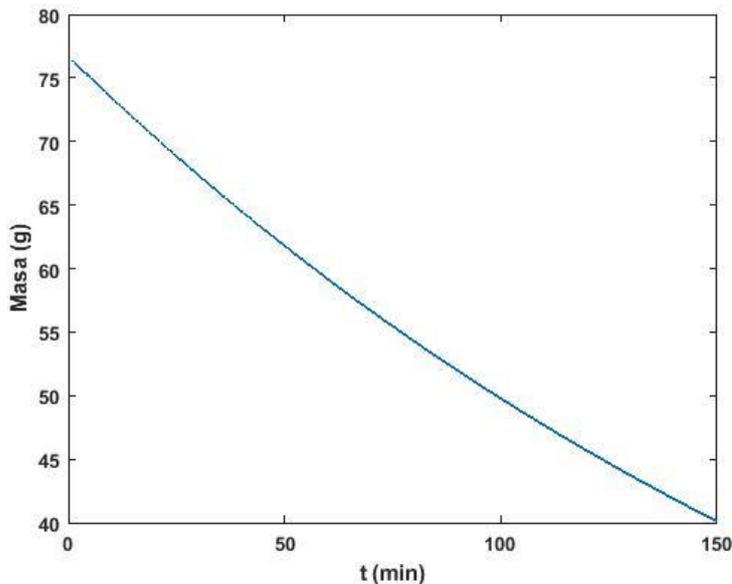


Fig. 33. Evolución de la masa de la manzana para la temperatura de 35°C.

En la figura 33 se presenta la evolución de la masa de manzana frente al tiempo para la mayor temperatura de trabajo. La manzana tiene una masa inicial de 76g y al cabo de 150 minutos reducimos la masa a 40g.

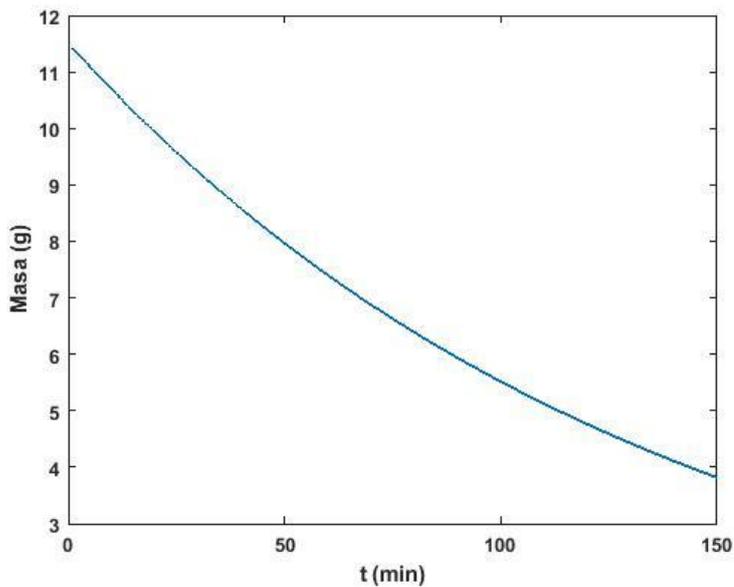


Fig. 34. Evolución de la masa del plátano para la temperatura de 35°C.

En la figura 34 se presenta la evolución de la masa frente al tiempo para la mayor temperatura de trabajo. El ensayo empieza con una masa inicial de 11,5g y termina en 3,8g.

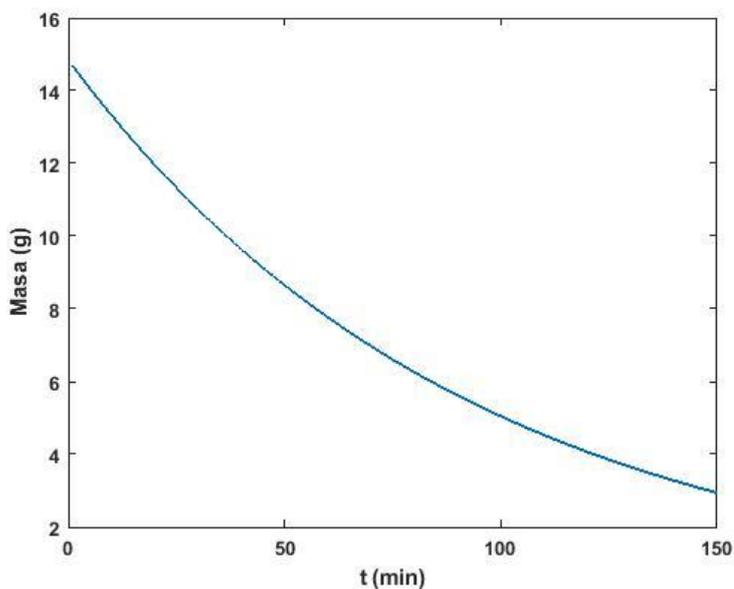


Fig. 35. Evolución de la masa de zanahoria para la temperatura de 35°C.

En la figura 35 se presenta la evolución de la masa frente al tiempo para la zanahoria cuando se es sometida a la mayor temperatura de trabajo. En el inicio tenemos 15g y tras 150 minutos tenemos una masa final de 3g.

A priori a la vista de las figuras 33, 34 y 35 se puede observar que hay una diferencia en la tendencia de secado para cada tipo de producto, algo que comentaremos más adelante. Basándonos en el fundamento teórico ya introducido en el punto 3, se puede comprobar en función de la relación de humedades y conocidas las temperaturas a la entrada y a la salida de la cámara, la cantidad de masa que se perderá a lo largo del ensayo. Sabemos que la relación de humedades, es la masa de vapor que hay por kilogramo de aire, como en el interior de la cámara, el único intercambio que se va a producir es la ganancia de vapor por parte del aire húmedo (el que extrae del producto), la masa de aire seco será una constante. Teniendo entonces esta expresión:

$$(\omega_2 - \omega_1) = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} \quad (5.1)$$

Siendo  $\omega_1$  el punto de entrada a la cámara y  $\omega_2$  el punto de salida, es decir una vez que el aire ya ha pasado por las muestras. Como ya se dijo el flujo de aire va a ser constante en todos los ensayos, teniendo el gasto másico de  $750 \frac{l}{min}$  que es lo mismo que  $0.0125 \frac{m^3}{s}$  y por último multiplicado por la densidad del aire tenemos que:

$$\dot{m}_a = 0.0125 \frac{m^3}{s} \cdot \rho = 0.0125 \frac{m^3}{s} \cdot 1.1614 \frac{Kg}{m^3} = 0.0145 \frac{Kg}{s} \quad (5.2)$$

Ya que tenemos sensores en la entrada y en la salida de la cámara, conocemos la temperatura y la humedad relativa en dichos puntos y como la presión también será una constante:  $p = 101000Pa$ , podremos hallar la cantidad de masa de agua perdida en el tiempo que dura la prueba.

Debido a que la obtención de la relación de humedades de forma manual con el diagrama psicrométrico es tedioso e impreciso, utilizaremos la herramienta de Matlab Coolprop que nos devuelve a partir de las condiciones de humedad y temperatura, el valor de humedad relativa correspondiente de una manera exacta. En cada uno de los ensayos cogiendo los valores en cualquier instante del experimento podemos obtener la cantidad de masa (vapor perdido por el producto) que se va a perder a lo largo de dicho ensayo. Por tanto hallado el flujo másico de vapor podremos saber qué cantidad de masa se pierde.

Partimos del ensayo para las manzanas de  $35^\circ C$  a la entrada de la cámara. A la hora de hacer los cálculos hay que tener en consideración que los aparatos de medida nos son totalmente precisos y que, en el laboratorio las condiciones de temperatura no son totalmente constantes.

Dicho esto vamos a realizar el cálculo de lo que se obtuvo y de lo que se esperaba obtener teóricamente.

El ensayo empieza en 76g y termina en 40g, tenemos una pérdida de masa de 36 g, es decir del 47.36%. Observando los datos obtenidos por los aparatos de medida tenemos

a la salida de la cámara una temperatura de 34.3°C y 21% de humedad relativa. Introduciendo estos datos en Matlab tenemos que la relación de humedades a la salida de la cámara es  $\omega_2 = 0.0071$ . A la entrada de la cámara de secado tenemos una relación de humedades de  $\omega_1 = 0.0068$ , ya que las condiciones son de 35.5°C y 19% de humedad relativa.

Una vez obtenidos la relación de humedades en los dos puntos de estudio, procedemos al cálculo:

$$(\omega_2 - \omega_1) = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} = (0.0071 - 0.0068) * 0.0145 \frac{Kg}{s} * 9000 s * 1000 \frac{g}{Kg} = 39.15g \quad (5.3)$$

Los 9000 segundos se corresponden con el tiempo de duración del ensayo. Como hemos dicho, la pérdida que obtuvimos en el laboratorio fue de 36 g. El cálculo realizado es orientativo, para hacernos ver entre qué cantidades de difusión de masa nos vamos a mover, pero realmente este cálculo teórico se hace suponiendo la idealidad de que durante todo el tiempo que dure el ensayo, las condiciones van a ser siempre las mismas, sin ningún tipo de variación. La realidad no es esa, por eso nuestro ensayo con la manzana (y lo mismo ocurre con zanahoria y plátano) difiere del cálculo, ya que como hemos dicho antes, los aparatos de medida no son totalmente precisos y las condiciones sufren pequeñas fluctuaciones a lo largo del ensayo, debido a que el sistema no mantiene perfectamente estables los valores de humedad y temperatura que hemos introducido.

Otro factor que afecta al resultado, es que nos movemos en un rango de temperaturas relativamente bajo, lo que significa, viendo el diagrama psicrométrico, que pequeñas fluctuaciones de solamente un punto en la temperatura y en la humedad relativa supone diferencias apreciables en los resultados.

Como resumen se puede decir que las estimaciones sobre cuanta pérdida de masa se produciría a lo largo de un ensayo, serían válidas si conseguimos asegurar que las condiciones de temperatura y humedad van a mantenerse constantes durante todo el tiempo, pero conseguir esto es casi imposible; se necesitarían medios muy precisos que no tuvieran ningún tipo de variación en tiempos muy largos y un perfecto aislamiento de todo el equipo en el que se consiguiera que no hubiera ningún tipo de pérdida.

Estos hechos, ponen de manifiesto la dificultad de alinear lo teórico con lo experimental ya que, en los cálculos teóricos no se pueden tener en cuenta ciertos factores que en el ensayo experimental son imposibles de predecir y controlar, por tanto, podemos concluir que para esta comprobación, los cálculos teóricos nos aportan información orientativa pero siempre teniendo en cuenta, que en la realidad, el resultado final presentará una desviación respecto a lo esperado debido a factores ajenos.

## 5.2 Resultados

En este punto se va a presentar la evolución del contenido de humedad ( $MR$ ) para las diferentes condiciones, en cada producto, pero antes, para poder hallar el *moisture ratio* debemos obtener para cada producto, el contenido de humedad en el equilibrio ( $M_e$ ). Para ello, utilizamos un horno en el que metimos las muestras de manzana, plátano y zanahoria y las sometimos a una temperatura de 115°C hasta que la masa de cada muestra no variara, es decir, cuando la muestra se encontraba totalmente seca, obteniendo de esta forma  $M_e$ .

**Tabla 5.1. Porcentaje de  $M_e$  respecto a la masa inicial para manzana, plátano y zanahoria**

	Manzana	Zanahoria	Plátano
Me	12,237%	9,7%	22,9%

La tabla 5.1 muestra los valores de  $M_e$  para los diferentes productos. Nos aporta la información necesaria para conocer cuanta humedad es posible extraer de cada muestra, o lo que es lo mismo cuanta masa queda una vez que toda la humedad ha sido extraída. Los valores de  $M_e$  son fundamentales para estudiar cuanta humedad resta en cada una de las muestras, una vez se les ha sometido a un proceso de secado.

En este punto es importante entender correctamente lo que es  $MR$ . El ratio de humedad es un parámetro adimensional que indica la reducción de humedad de la muestra durante el tiempo que dura el ensayo.  $MR$  toma valores entre 0 y 1. El valor 1 lo toma en el momento inicial del experimento que es cuando tenemos la muestra sin alterar (cuando aún no se ha extraído nada de humedad). El valor 0 es al que se llega cuando la muestra se encuentra en equilibrio con el aire o lo que es lo mismo, cuando el contenido de humedad en ese instante se iguala a  $M_e$ , y es en ese momento, cuando podríamos decir que se ha extraído la totalidad de la humedad de la muestra. En los experimentos trabajaremos entre estos dos valores y veremos qué resultados obtenemos para unas condiciones de temperatura y humedad concretas.

Lo idóneo y lo que intentaremos, será acercarnos lo máximo posible al valor de  $MR=0,1$ , ya que, según la literatura en este valor la velocidad a la que se reduce del contenido de humedad disminuye considerablemente, presentando una asíntota que para superarla, habrá que dejar las muestras secando durante tiempos muy elevados a elevadas temperaturas, lo que supondría un gasto innecesario de recursos, únicamente para eliminar un contenido de humedad que se puede considerar residual [15]. Por tanto si conseguimos llegar al valor de 0,1, podemos considerar que el producto está seco, dando por concluido el ensayo.

De las ecuaciones con las que podemos describir nuestro modelo de secado presentadas en la tabla 4.1, nos quedamos con la que mejor se ajusten nuestros resultados. Para ello

nos fijaremos en la que presente un coeficiente  $R^2$  elevado. Es por esto que utilizaremos el modelo de Wang and Singh, ya que con él, obtenemos una  $R^2$  superior al 0'99.

### 5.2.1 Zanahoria

**Tabla 5.2. Masas iniciales de las muestras de zanahoria ( $M_o$ ) y el  $M_e$ , para cada ensayo**

<b><math>M_o</math> (g)</b>	<b><math>M_e</math> (g)</b>	<b>T (°C)</b>	<b><math>\phi(-)</math></b>
<b>14,25</b>	<b>1,38</b>	<b>22</b>	<b>44</b>
<b>16,5</b>	<b>1,6</b>	<b>28</b>	<b>30</b>
<b>17,625</b>	<b>1,709</b>	<b>33</b>	<b>25</b>
<b>14,8125</b>	<b>1,4368</b>	<b>35</b>	<b>20</b>

La tabla 5.2 se ha hallado pesando las muestras iniciales de cada ensayo y para sacar el  $M_e$ , se ha utilizado la información presentada en la tabla 5.1. Para ensayos ideales en los que se consiguiera secar completamente las muestras, al final del ensayo se obtendría una muestra cuya masa sería la de la columna de  $M_e$ . En la realidad será difícil extraer completamente la humedad de las muestras ya que hay que tener en cuenta que en los secaderos que trabajan únicamente con energía solar dependen de las condiciones ambientes y estas, varían constantemente.

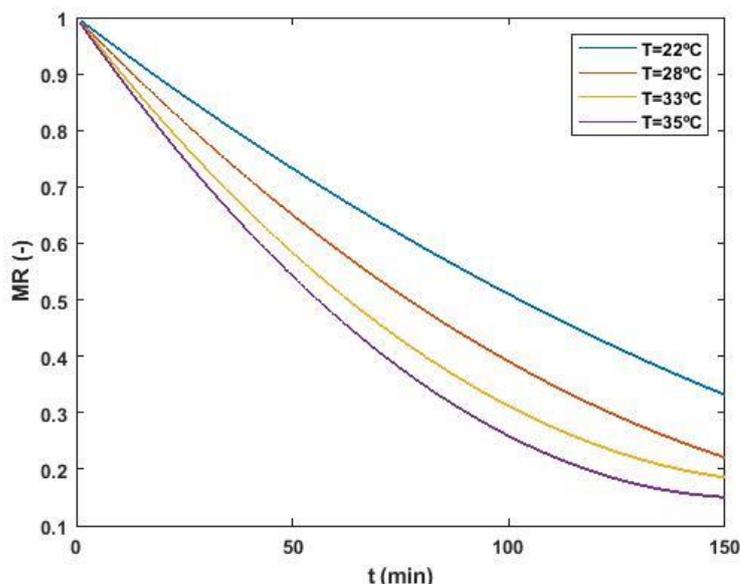


Fig. 36. Evolución temporal del *moisture ratio* de las muestras de zanahoria, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad.

En la figura 36 se presenta la variación del *MR* frente al tiempo para el caso de los ensayos con zanahoria. A medida que aumentamos la temperatura se observa que se acelera la reducción de humedad, es decir necesitamos menos tiempo para obtener un menor valor de *moisture ratio*. Para la mayor temperatura, tras 150 minutos, el *moisture ratio* se encuentra en un valor próximo al 0,1 (que es cuando podemos dar por concluido el ensayo).

**Tabla 5.3. Ecuaciones representadas en la figura 36 y coeficiente  $R^2$  para las cuatro pruebas**

T (°C)	Ecuación	$R^2$
22	$MR = 1 - 0.00579t + 8.925 \cdot 10^{-6}t^2$	0.9991
28	$MR = 1 - 0.00789t + 1.796 \cdot 10^{-5}t^2$	0.9995
33	$MR = 1 - 0.00978t + 2.908 \cdot 10^{-5}t^2$	0.9994
35	$MR = 1 - 0.01091t + 3.498 \cdot 10^{-5}t^2$	0.9993

En la tabla 5.3 se muestran los ajustes del *moisture ratio* de la zanahoria para los 4 ensayos, utilizando el modelo de Wang and Singh así como el  $R^2$  obtenido para cada ajuste.

### 5.2.2 Plátano

Tabla 5.4. Masas iniciales de las muestras de plátano (Mo) y el Me, para cada ensayo

Mo (g)	ME (g)	T (°C)	$\phi$ (-)
19,875	4,55	22	44
15,375	3,52	28	30
13,5	3,09	33	25
11,8125	2,7	35	20

Al igual que en la tabla 5.4 se presentan las masas iniciales de plátano para cada ensayo con su correspondiente valor de Me, que obtendríamos si consiguiéramos extraer completamente el contenido de humedad.

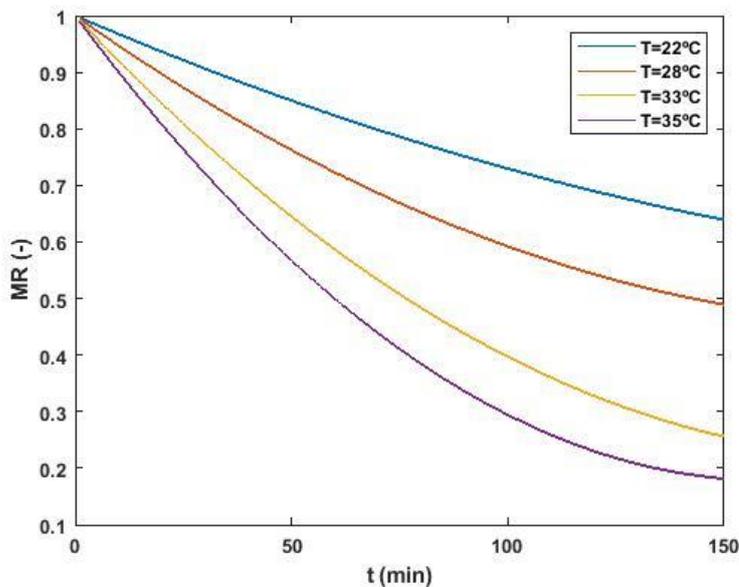


Fig. 37. Evolución temporal del *moisture ratio* de las muestras de plátano, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad.

En la figura 37 se muestra la variación del *moisture ratio* de las diferentes muestras de plátano frente al tiempo de duración del ensayo, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad. Al igual que en la zanahoria para mayores temperaturas se consigue aumentar la velocidad a la que reducimos la humedad, consiguiendo reducir el *moisture ratio* por debajo de 0,2.

**Tabla 5.5. Ecuaciones representadas en la figura 37 y coeficiente R<sup>2</sup> para las cuatro pruebas**

T (°C)	Ecuación	R <sup>2</sup>
22	$MR = 1 - 0.00333t + 5.959 \cdot 10^{-6}t^2$	0.9977
28	$MR = 1 - 0.00542t + 1.345 \cdot 10^{-5}t^2$	0.9981
33	$MR = 1 - 0.00817t + 2.141 \cdot 10^{-5}t^2$	0.9987
35	$MR = 1 - 0.01026t + 3.203 \cdot 10^{-5}t^2$	0.9978

La tabla 5.5 muestra los ajustes junto con su R<sup>2</sup> para cada ensayo, utilizando el modelo de Wang and Singh para la representación de la evolución del *moisture ratio*.

### 5.2.3 Manzana

**Tabla 5.6. Masas iniciales de las muestras de manzana (Mo) y el Me, para cada ensayo**

Mo(g)	ME(g)	T (°C)	$\phi$ (-)
73,125	8,948	22	44
60,5625	7,411	28	30
69,375	8,4894	33	25
75	9,1777	35	20

En la tabla 5.6 se presenta, al igual que en la zanahoria y el plátano, las masas iniciales de las muestras antes de someterlas al proceso de secado y su correspondiente Me, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad.

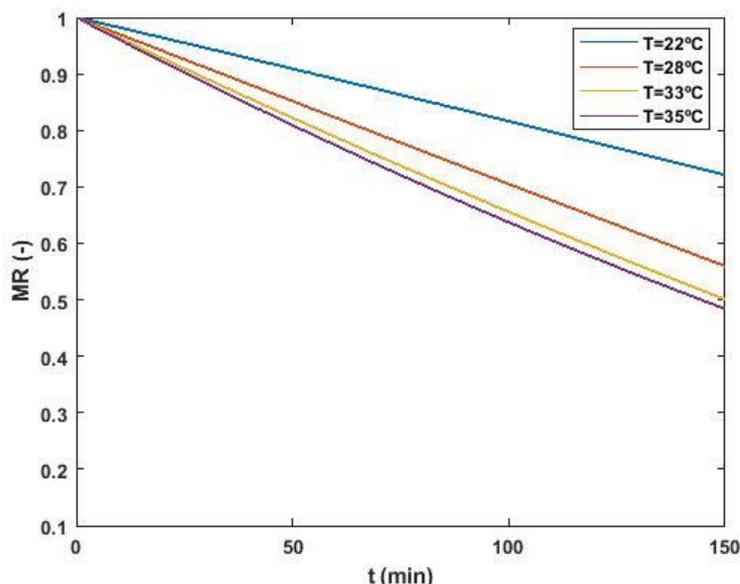


Fig. 38. Evolución temporal del *moisture ratio* de las muestras de manzana, para las diferentes condiciones de temperatura y humedad.

En la figura 38 se representa la evolución del *moisture ratio* con respecto al tiempo para las muestras de manzana, sometidas a las diferentes condiciones de temperatura y humedad. Para el caso de la manzana, podemos observar lo que ya hemos visto en los diferentes productos, a mayor temperatura conseguimos obtener un *moisture ratio* menor para el mismo tiempo. Tras 150 minutos conseguimos reducir el *moisture ratio* de la manzana a menos de 0,5.

**Tabla 5.7. Ecuaciones representadas en la figura 38 y coeficiente  $R^2$  para las cuatro pruebas**

T (°C)	Ecuación	$R^2$
22	$MR = 1 - 0.00188t + 7.295 \cdot 10^{-7}t^2$	0.9995
28	$MR = 1 - 0.00298t + 2.977 \cdot 10^{-7}t^2$	0.9998
33	$MR = 1 - 0.00367t + 2.274 \cdot 10^{-6}t^2$	0.9997
35	$MR = 1 - 0.00400t + 3.766 \cdot 10^{-6}t^2$	0.9996

Al igual que en los otros dos productos, la tabla 5.7 muestra las ecuaciones que definen la evolución del *moisture ratio*, realizando el ajuste con el modelo Thin-Layer de Wang and Singh.

### 5.3 Análisis de los resultados

Las figuras 36, 37 y 38 muestran la evolución del *moisture ratio* para los tres productos frente a los 150 minutos que dura el ensayo. Se puede observar que los tres tienen una característica común: la influencia de la temperatura en la velocidad de secado. En las tres figuras, a medida que incrementamos la temperatura aceleramos la reducción del *MR*. Por esto, para el proceso de extracción de humedad en secaderos solares como el utilizado en este ensayo, uno de los objetivos va a ser maximizar la concentración de radiación para poder obtener la máxima temperatura posible. Pudiendo entonces asegurar que, independientemente del producto que tengamos dentro de la cámara de secado, a mayor temperatura, conseguiremos una reducción mayor de su contenido en humedad.

Observando los resultados obtenidos para las muestras de plátano y zanahoria sus curvas para la última temperatura presentan un comportamiento similar. En los dos productos conseguimos reducir el *moisture ratio* por debajo del 0,2, en 150 minutos. Pero se aprecian diferencias en la forma en la que reducen el *moisture ratio* a lo largo del ensayo. En el caso de la zanahoria, todas sus curvas presentan una mayor pendiente que las curvas correspondientes para el caso del plátano. Si comparamos los ensayos en los dos productos para la temperatura de 22°C, podemos ver que para la zanahoria, llegamos a un *MR* cercano a 0,3, mientras que en el plátano, para 22°C apenas se llega a *MR* =0,7. Lo mismo ocurre para el ensayo a 28°C, en la zanahoria se reduce la humedad hasta tener un *MR* =0,2, en cambio en el plátano se reduce hasta un *MR* =0,5. Para las otras dos temperaturas, los comportamientos son similares ya que nos vamos acercando cada vez más al valor *MR* =0,1, donde se puede apreciar que las curvas comienzan a reducir su pendiente (nos acercamos a la asíntota existente en este valor), hecho que significa que la velocidad a la que se extrae humedad disminuye, ya que no hay apenas agua contenida en la muestra.

En cuanto al caso de la manzana, como ocurría en el plátano y en la zanahoria, en condiciones más severas de temperatura se aumenta la velocidad a la que el producto pierde humedad. Sin embargo, se observa que las curvas de la manzana difieren de las del plátano y las de la zanahoria. La principal diferencia que nos encontramos es, la cantidad de masa que se extrae de la manzana en el tiempo de ensayo. En este caso, el *MR* que se alcanza para la máxima temperatura no llega ni al valor de 0,4, se encuentra muy alejado del valor de 0,1. Para la manzana necesitaríamos mantenerla en la cámara de secado durante mayores tiempos, para intentar acercarnos a 0,1, pero eso puede suponer ocupar la instalación durante un tiempo demasiado alto, secando únicamente un solo producto, perdiendo tiempo de trabajo que podría ser destinado para secar otros alimentos. La otra opción sería aumentar la temperatura superando los 35°C alcanzados en la instalación, de esta forma nos aseguraríamos reducir el tiempo que mantenemos la manzana en el secadero, pero esto implicaría la captación de mayor cantidad de radiación durante un determinado tiempo, algo que es difícil en la realidad ya que a lo

largo de un día, la cantidad de radiación que llega al colector tiene una alta dependencia de las condiciones ambiente. Entonces para el caso de la manzana las condiciones de trabajo de nuestros ensayos, son insuficiente para acercar la pérdida de humedad al valor de  $MR = 0,1$ . En este caso, se hace más importante buscar mayores temperaturas que permitan secar la manzana en un tiempo razonable, ya que con nuestras temperaturas de trabajo se observa que la tendencia de la manzana, implica mayores tiempos de secado, para conseguir los mismos resultados que en los otros dos productos.

#### 5.4 Drying rate

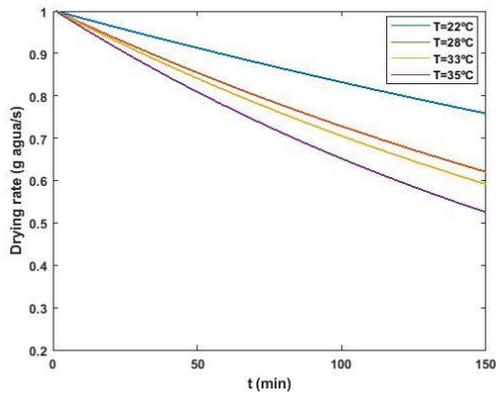
Una vez presentada la pérdida de masa para cada producto, procedemos a estudiar la velocidad a la que se produce dicha pérdida, para la zanahoria, el plátano y la manzana.

Para el estudio de la velocidad vamos a introducir el término  $DR$ , que viene del inglés *drying rate* y significa: ratio de secado. Con este término analizamos la velocidad a la que pierden masa los productos ya que es la división de la cantidad de masa eliminada por el tiempo:

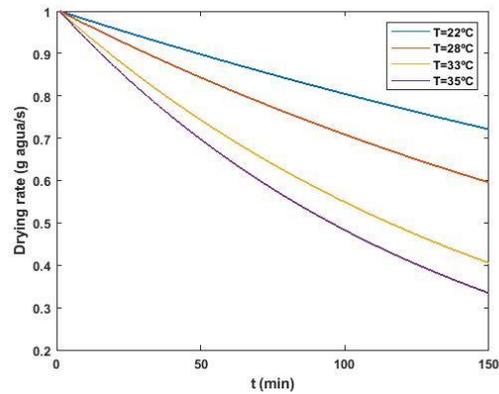
$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (5.4)$$

Los términos que componen la ecuación son:  $M_t$ , la masa en el tiempo  $t$  y  $M_{t+dt}$  que representa la masa para el tiempo  $t + dt$  [27]. El intervalo de tiempo  $dt$  es de 0,5 s ya que es el período de la instalación a la hora de registrar valores.

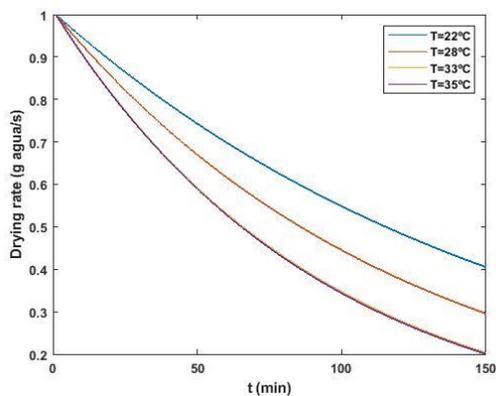
En la figura 39 mostramos el *drying rate* de los productos para las diferentes temperaturas de trabajo, frente al tiempo.



(a)



(b)



(c)

Fig. 39. *Drying rate*. (a) Manzana. (b) Plátano. (c) Zanahoria.

En las figuras 39 (a), 39 (b) y 39 (c) se observa el mismo comportamiento, en los minutos iniciales del ensayo, cuando tenemos un mayor contenido de agua en las muestras, las curvas muestran una mayor pendiente, esto significa que la velocidad al principio es mayor, ya que se extrae mayor cantidad de agua. A medida que transcurre el experimento, va quedando menos cantidad y la velocidad de secado va disminuyendo, por tanto, a medida que se elimina la humedad, la curva tiende a reducir su pendiente porque el proceso es más lento.

Podemos observar, que independientemente de que sean manzanas, zanahorias o plátanos el producto que estemos secando, a medida que aumentamos la temperatura en la cámara de secado, las sucesivas curvas tienen una pendiente más acusada. Este hecho significa que, a mayor temperatura de secado, mayor será la velocidad a la que extraemos agua de los productos. Haciendo que sea imprescindible buscar siempre optimizar la instalación, para poder conseguir que el aire que sale del colector, lo haga a

la mayor temperatura posible, con el fin de reducir el tiempo que se tarda en secar un alimento.

Comparando las tres figuras, vemos que la manzana tiene una velocidad de secado inferior a la del plátano y la zanahoria. A su vez, la zanahoria se seca más rápido que el plátano, pudiendo decir entonces que la zanahoria seca a mayor velocidad (o en menos tiempo) que manzana y plátano, siendo la manzana la que más tarda en secar.

Este hecho confirma lo presentado en el punto 5.2, donde la manzana para los 150 minutos presenta el peor comportamiento ante el secado, y entre el plátano y la zanahoria, aún con un comportamiento similar para la mayor temperatura de trabajo, es la zanahoria la que pierde mayor cantidad de masa. Hay que señalar, que si observamos la velocidad de secado, así como la evolución del *moisture ratio* en la zanahoria y el plátano, cuando el contenido de humedad es alto, los comportamientos son diferentes, pero a medida que aumentamos la temperatura y reducimos el contenido de humedad, el comportamiento se va pareciendo cada vez más (que es cuando nos acercamos a  $MR=0,1$ ). Comentar finalmente, que en la figura 39 (c), el *drying rate* para las dos mayores temperaturas, tiene un comportamiento muy parecido, eso se debe a que para 33°C y 35°C la zanahoria presenta una diferencia muy pequeña en cuanto a la velocidad de secado y también se debe, al propio ajuste de Matlab al ser representadas.

## 6. ESTUDIO TEÓRICO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LOS PRODUCTOS A PARTIR DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 6.1 Modelo para la predicción del secado

Las ecuaciones que definen la evolución del *moisture ratio* para cada temperatura, en cada producto (punto 5.2), dependen de los coeficientes a y b. Ya que tenemos los valores de dichos coeficiente para distintas temperaturas constantes, podemos obtener una ecuación general que defina a y b para cada producto. De esta forma podremos obtener un modelo con el que hallar, que valores toman los coeficientes a y b para diferentes temperaturas, y con ello, sustituyendo estos coeficientes en la ecuación de Wang and Singh, determinar la evolución del *moisture ratio*.

#### 6.1.1 Modelo para zanahoria

$$a = -7.243 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 2.631 \cdot 10^{-5} \cdot T - 0.002884 \quad (6.1)$$

$$b = 7.303 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 2.172 \cdot 10^{-6} \cdot T + 2.14 \cdot 10^{-5} \quad (6.2)$$

Las ecuaciones 6.1 y 6.2 definen los valores que toman los coeficientes a y b para las muestras de zanahoria, para diferentes temperaturas constantes.

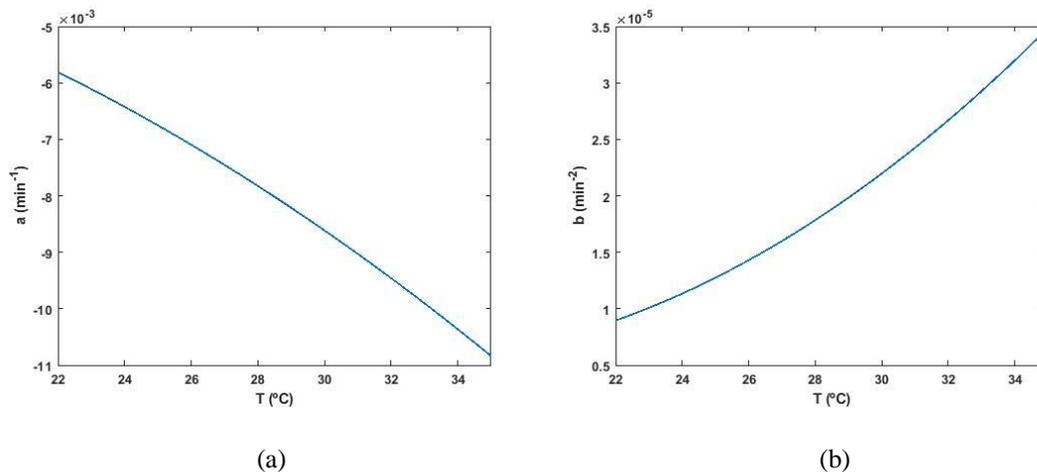


Fig. 40. Coeficientes para la zanahoria. (a) Coeficiente a. (b) Coeficiente b.

Las figuras 40 (a) y 40 (b) representan las ecuaciones (6.1) y (6.2) y muestran los valores que tomarán los coeficiente a y b para diferentes temperaturas.

### 6.1.2 Modelo para el plátano

$$a = -2.795 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0.001073 \cdot T - 0.01341 \quad (6.3)$$

$$b = 1.272 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 5.39 \cdot 10^{-6} \cdot T + 6.33 \cdot 10^{-5} \quad (6.4)$$

Las ecuaciones 6.3 y 6.4 definen los valores que toman los coeficientes a y b para las muestras de plátano, para diferentes temperaturas constantes.

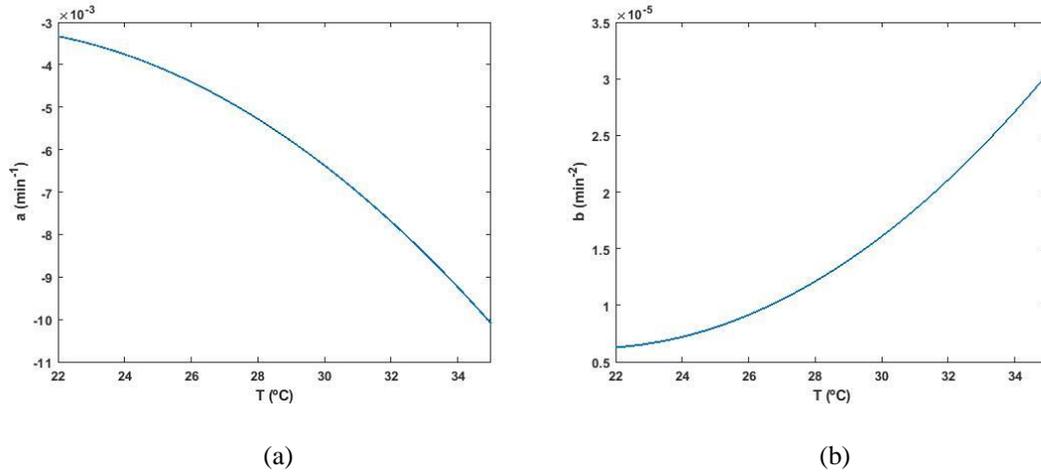


Fig. 41. Coeficientes para el plátano. (a) Coeficiente a. (b) Coeficiente b.

### 6.1.3 Modelo para la manzana

$$a = -4.214 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0.0001191 \cdot T - 0.00301 \quad (6.5)$$

$$b = 5.012 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 2.662 \cdot 10^{-6} \cdot T + 3.554 \cdot 10^{-5} \quad (6.6)$$

Las ecuaciones 6.5 y 6.6 definen los valores que toman los coeficientes a y b para las muestras de manzana, para diferentes temperaturas constantes.

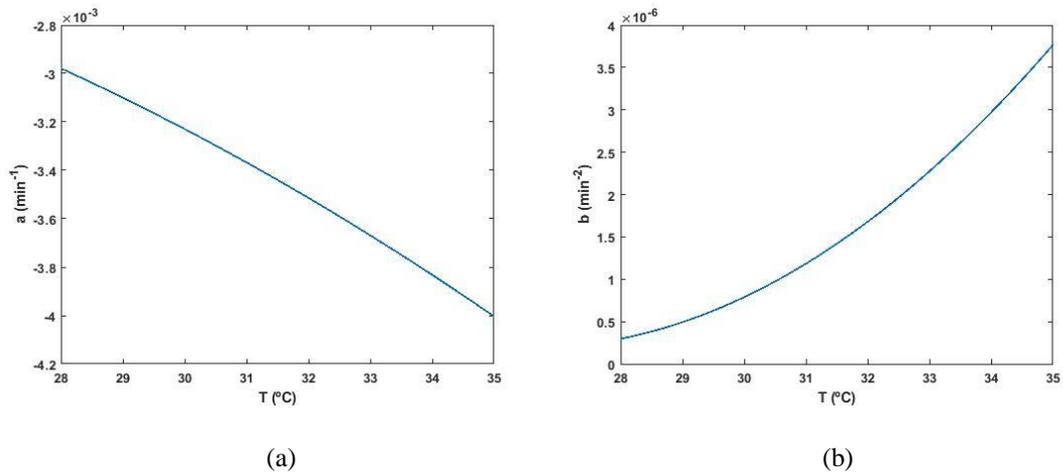


Fig. 42. Coeficientes para la manzana. (a) Coeficiente a. (b) Coeficiente b.

En el caso de la manzana, la figura 42 parte de  $28^{\circ}\text{C}$  ya que para los experimentos a  $22^{\circ}\text{C}$  no obteníamos resultados válidos para ninguna de las tres pruebas que hicimos a esa temperatura. Llevándonos a descartar lo obtenido para  $22^{\circ}\text{C}$  a la hora de hallar el modelo. Por esto, realizamos el cálculo de los coeficientes sin tener en cuenta este ensayo.

## 6.2 Análisis del modelo

Hay que tener en cuenta que el modelo es un ajuste realizado a partir de los datos experimentales, eso significa que las ecuaciones y figuras mostradas en el punto 6.1 para cada producto, tienen un porcentaje de error debido a que las expresiones que definen los coeficientes  $a$  y  $b$ , son una aproximación cuadrática de lo obtenido en los ensayos. Dicho esto vamos a representar este error y determinar a partir de qué porcentaje de *moisture ratio* se produce. Para ello mostraremos y compararemos la evolución del *moisture ratio* a  $35^{\circ}\text{C}$ , obtenida a partir de los coeficientes  $a$  y  $b$  hallados con las ecuaciones generales presentadas en el punto 6.1 y con lo obtenido en el laboratorio.

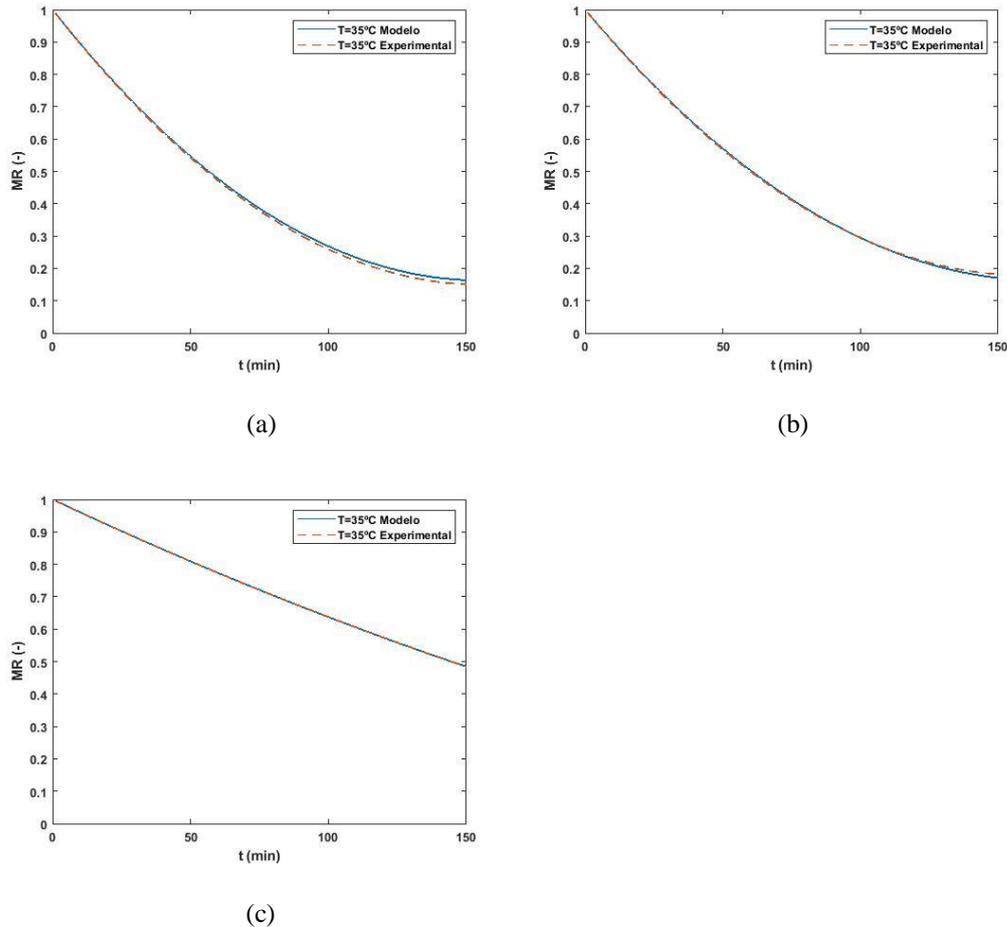


Fig. 43. Error del modelo. (a) Zanahoria. (b) Plátano. (c) Manzana.

Para el caso de la zanahoria y el plátano, el modelo no presenta apenas error cuando tenemos mayor contenido de humedad. A medida que se reduce, cuando nos acercamos a valores inferiores a  $MR=0,3$ , el modelo empieza a separarse de los resultados experimentales, incrementando el porcentaje de error. Podemos considerar este error como asumible, ya que empieza a producirse para valores muy bajos de contenido de humedad (cerca de 0,1), pudiendo entonces, utilizar el modelo para analizar el comportamiento de los productos ante diferentes temperaturas, sabiendo que en el tramo final es cuando el modelo deja de predecir con total precisión.

En cuanto a la manzana, el modelo y la curva experimental son casi la misma curva, ya que como ocurre en los otros dos productos, cuando el *moisture ratio* es mayor, el modelo no muestra error. El inconveniente del modelo para el caso de la manzana, es que, al no haber conseguido reducir más el *moisture ratio* en los ensayos experimentales, no podemos saber que error presentará nuestro modelo cuando el contenido de humedad sea bajo, impidiendo asegurar que el modelo se ajuste con un error asumible a lo que ocurriría en la realidad, cuando el contenido de humedad tome valores de  $MR$  cercanos a 0,1.

### 6.3 Aplicación del modelo para la temperatura constante de 40°C

Una vez presentado el modelo, vamos a utilizarlo, para analizar cómo se espera que se comporten los productos, si los sometemos a mayor temperatura asumiendo los errores anteriormente presentados.

Previo a este análisis, vamos a representar el comportamiento esperado con el modelo para la manzana a 22°C.

Como hemos señalado en el punto 6.1, para la manzana, descartamos el valor obtenido a la temperatura de 22°C, pero, ya que tenemos el modelo, vamos a analizar qué diferencia habría en la evolución del *moisture ratio*, entre el modelo y lo que obtuvimos experimentalmente

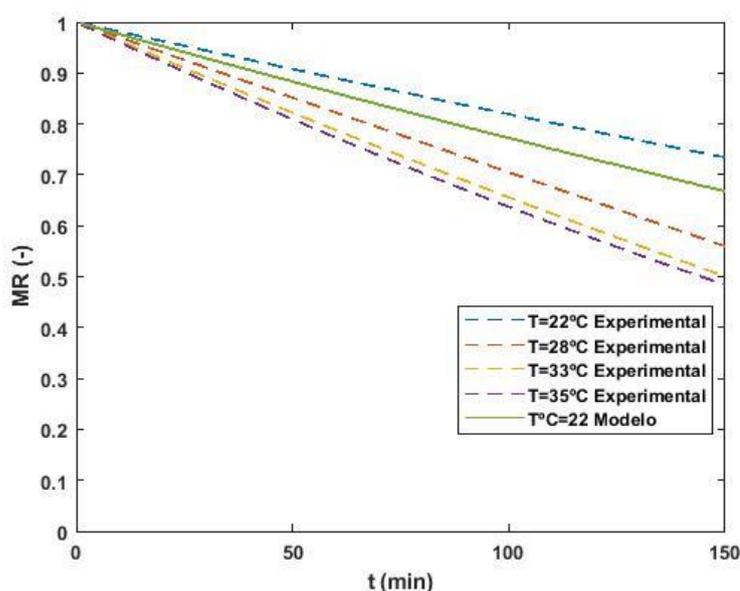


Fig. 44. *Moisture ratio* de la manzana para los resultados experimentales y los del modelo.

En la figura 44 se presenta la evolución del *MR* obtenido en el laboratorio en línea discontinua y la predicción del modelo para la temperatura de 22°C en línea continua. Asumiendo como hemos visto anteriormente, que al movernos en valores altos de contenido de humedad en la manzana, el error del modelo es bajo, podemos considerar, que el resultado del modelo es válido y confirmar que lo obtenido experimentalmente a 22°C no es fiable.

Dicho esto, vamos a utilizar el modelo para obtener predicciones sobre el comportamiento de los productos, a una temperatura constante igual a 40°C (superior a las de trabajo), con el objetivo de analizar que reducción de *MR* aproximado se conseguiría.

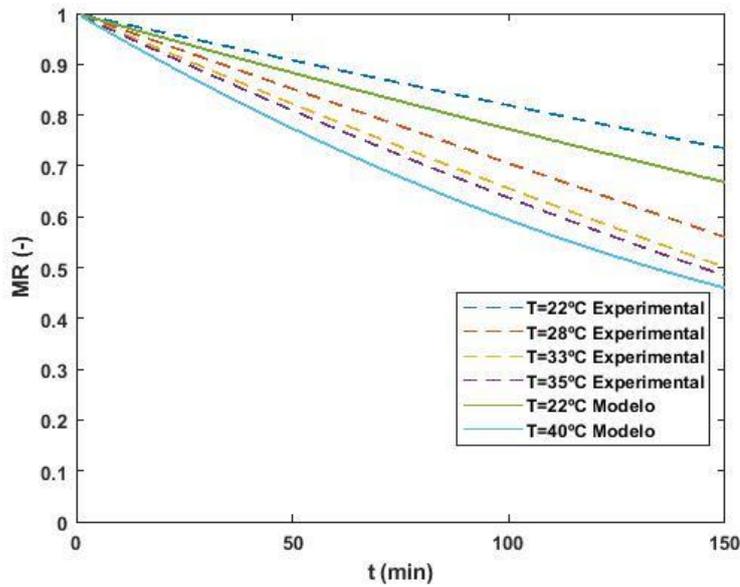


Fig. 45. Evolución del *MR* de la manzana, para las temperaturas de trabajo y la temperatura de 40°C y 22°C, halladas con el modelo.

En la figura 45 se representa la evolución del *moisture ratio* para la manzana a la temperatura constante de 40°C obtenida con el modelo, representada junto con los resultados experimentales del *moisture ratio*. Y además hemos incorporado también, la evolución a 22°C obtenida con el modelo. Podemos observar que el modelo a 40°C, muestra una pendiente mayor que para las demás temperaturas, siguiendo la tendencia esperada de que, a mayor temperatura, mayor reducción de *moisture ratio*.

Realizamos el mismo procedimiento para el plátano y la zanahoria.

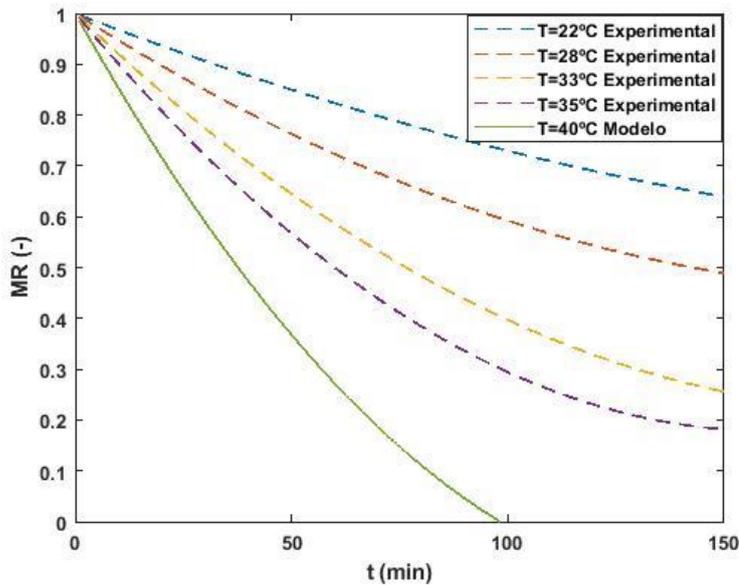


Fig. 46. Evolución del  $MR$  del plátano para las temperaturas de trabajo y la temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  hallada con el modelo.

En la figura 46 realizamos el mismo procedimiento que en el caso de la manzana, comparamos la evolución del *moisture ratio* del plátano obtenida en los ensayos, con la predicción del modelo para una temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ . Como hemos dicho, el modelo es muy preciso cuando los valores de *moisture ratio* son elevados (en la primera parte del ensayo) pero una vez que se reduce a valores inferiores a 0,3, el error comienza a incrementarse. En la figura 46 podemos apreciar este hecho, ya que lo esperado es que a medida que nos acerquemos a el valor de  $MR=0,1$ , la curva reduzca su pendiente y la reducción del *moisture ratio* sea mucho más lenta, en comparación con el principio del ensayo. En nuestro modelo para  $40^{\circ}\text{C}$  en el tramo final, esto no se produce, contradiciendo lo demostrado experimentalmente en este trabajo y en la literatura [15]. Lo esperado sería que a medida que nos acercamos a 0,1, la curva muestre una asíntota en el entorno de este valor.

Por tanto, finalmente podemos decir, que el modelo para el plátano a la temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ , nos da una referencia precisa de la tendencia que tendría la pendiente al principio del ensayo si lo realizáramos a dicha temperatura, pero a partir del valor  $MR=0,3$ , empieza a incrementar el error, haciendo que en el tramo final se aleje de lo esperado en la realidad.

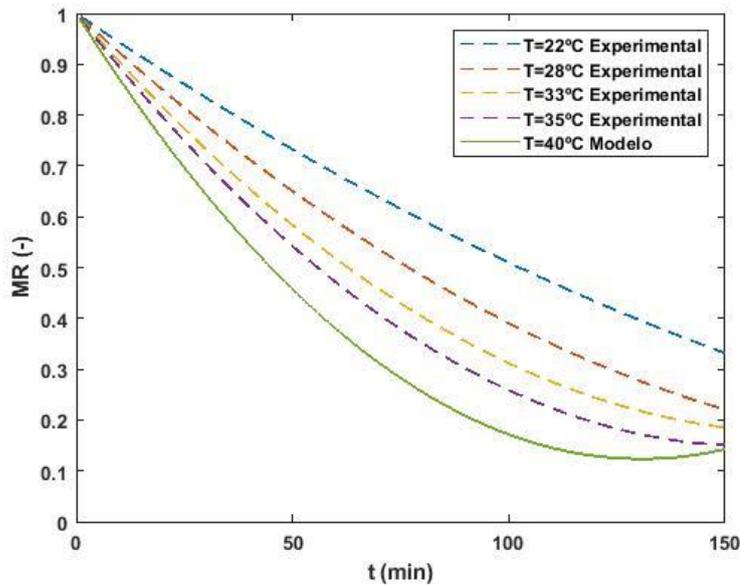


Fig. 47. Evolución del  $MR$  de la zanahoria para las temperaturas de trabajo y la temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  hallada con el modelo.

En la figura 47 se presenta la evolución del *moisture ratio* para la zanahoria, a la temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  hallada con el modelo, junto con lo obtenido experimentalmente. A diferencia del plátano, en la zanahoria el comportamiento de la curva con el modelo a  $40^{\circ}\text{C}$ , presenta una reducción en la velocidad a la que se pierde de humedad, a medida que nos acercamos a valores más pequeños. Hay que tener en cuenta, que en la zanahoria también aparecía un error en el modelo al superar el valor de  $MR=0,3$ , que es apreciable en el tramo final de la figura 47, ya que en los minutos finales, a partir de 130 minutos, en vez de continuar la tendencia y recuperar la horizontalidad cuando se acerca a 0,1, muestra una subida, que significaría que vuelve a ganar humedad, algo que es imposible que ocurra en la realidad. Aún con esto, la curva obtenida con el modelo para la zanahoria, se acerca al comportamiento esperado.

La diferencia entre el tramo final de la zanahoria y del plátano reside en que en el plátano, el error se hace más acusado cuanto más nos acercamos a  $MR=0,1$ , mientras que en la zanahoria, aun existiendo este error, no es tan elevado y permite tener una buena aproximación de la realidad.

Lo que se puede concluir de los tres modelos, es que los tres siguen la tendencia confirmada experimentalmente; a mayor temperatura se espera mayor reducción de *moisture ratio*, o dicho de otra forma, cuanto mayor temperatura tengamos, menor será el tiempo que se tarda en reducir el contenido de humedad en los productos.

#### 6.4 Moisture ratio variable

Además de para predecir el comportamiento de los productos a otras temperaturas constantes, diferentes de las de trabajo, el modelo hallado, puede ser usado para estudiar como evolucionaría el *moisture ratio*, si sometemos a los productos a las condiciones de un día real.

Como ya hemos visto en el punto 5.1.2, las condiciones de temperatura y humedad no son constantes a lo largo del día, varían en función de la hora en la que nos encontremos, por ello, para poder estudiar la evolución del *moisture ratio* cuando la temperatura no sea constante en el tiempo, lo primero que debemos saber es como evolución de la temperatura a lo largo de un día concreto. De [28] obtenemos la temperatura registrada para un día tipo en la ciudad de Valencia, presentada en la figura 48.

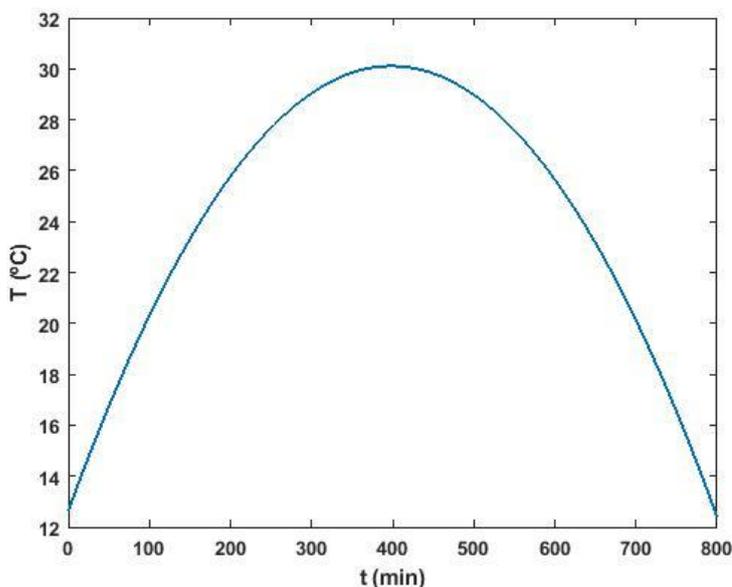


Fig. 48. Temperatura para Valencia a lo largo de un día tipo. De [28].

Vamos a estudiar qué ocurriría con los productos de estudio de este trabajo, si fueran secados en Valencia para el día presentado en la figura 48. Para ello utilizaremos el modelo hallado en el punto 6.1 para la evolución del *MR* y cogeremos de la figura 48, el intervalo de tiempo del día, en el que se dan las temperaturas que se encuentran dentro del rango con el que hemos trabajado en el laboratorio y con el que hemos hallado el modelo (22°C-35°C). El rango anteriormente mencionado es válido únicamente para el plátano y la zanahoria, pero para la manzana, como los resultados para la temperatura de 22°C tuvimos que descartarlos, supone que tengamos que coger un intervalo de tiempo distinto, en el que se den temperaturas entre 28°C y 35°C.

Para poder obtener el *moisture ratio* cuando la temperatura es variable a partir de un modelo obtenido con temperaturas constantes, habrá que ir hallando el *MR* para sucesivos intervalos de tiempo suficientemente pequeños, donde podamos considerar

que no varía. El intervalo de tiempo será de  $dt = 0,5s$  y el procedimiento para ir hallando el  $MR$  en cada intervalo será el siguiente:

Utilizaremos la ecuación que define la temperatura de la figura 48, para conocer que temperatura tenemos en cada instante de tiempo:

$$T = -0.00011 \cdot t^2 + 0.0877 \cdot t + 12.63$$

Siento  $t$  los valores de tiempo entre 127 minutos y 668 minutos para zanahoria y plátano y para la manzana,  $t$  será el tiempo entre 260 minutos y 539 minutos (son los intervalos de tiempo en los que se dan las temperaturas de trabajo de nuestros ensayos), ambos intervalos sacados de la figura 48.

Cada 0,5s obtendremos la temperatura, la cual iremos sustituyendo en las ecuaciones (6.1), (6.2), (6.3), (6.4), (6.5) y (6.6) para hallar los coeficientes  $a$  y  $b$  de los productos. Una vez obtenido los coeficientes, los sustituiremos en la ecuación de Wang and Singh.

$$MR_{dt} = 1 + a \cdot dt + b \cdot dt^2 \quad (6.7)$$

La ecuación 6.7, nos dará el *moisture ratio* para el intervalo de tiempo  $dt$ . Con esto, obtenemos cuanto se ha reducido el contenido de humedad realizando la siguiente operación:

$$\Delta MR = 1 - MR_{dt} \quad (6.8)$$

Seguidamente, restamos el resultado de (6.8) al  $MR$  global, obteniendo así, el valor de  $MR$  cuando ha transcurrido el intervalo de tiempo  $dt$ :

$$MR(t + dt) = MR(t) - \Delta MR \quad (6.9)$$

Realizando esta operación cada  $dt$ , a lo largo de los intervalos de tiempo de cada producto, obteniendo la evolución del *moisture ratio*, presentada en la figura 49.

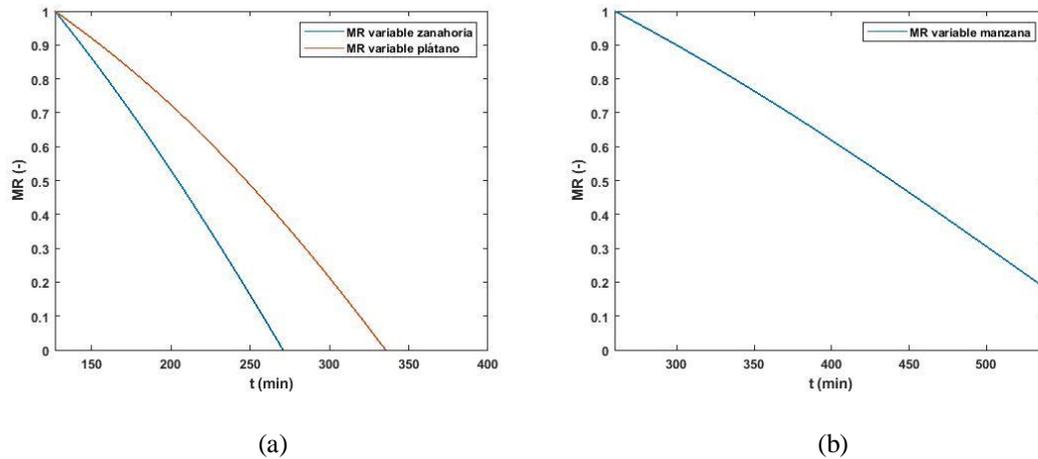


Fig. 49. Evolución del  $MR$  para temperatura variable. (a) Plátano y zanahoria. (b) Manzana.

La figura 49 (a) muestra la evolución del *moisture ratio* para temperatura variable en el caso de la zanahoria y el plátano y la figura 49 (b), muestra la evolución del *moisture ratio* para temperatura variable en el caso de la manzana.

Si observamos la figura 49 (a) y comparamos el comportamiento entre la zanahoria y el plátano, podemos ver que se confirma lo demostrado experimentalmente e indicado en los puntos 5.2, 5.3 y 5.4. Esto es, que la zanahoria tiene un mejor comportamiento ante el secado, lo que significa que se seca en un menor tiempo que el plátano.

En cuanto a la figura 49 (b), vemos que la manzana según el modelo y la evolución de temperaturas, no se conseguiría secar del todo, aunque después de 270 minutos se está muy cerca del valor de  $MR=0,1$ .

## 7. PRESUPUESTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO

En este capítulo pondremos el foco en el coste aproximado de construcción de un secadero solar y que beneficio podríamos obtener si destináramos la producción del secadero a la venta.

### 7.1 Presupuesto

A la hora de calcular el presupuesto estimado para la construcción de la instalación, hemos creído importante alinear este apartado con la motivación del trabajo. Por ello, hemos calculado el coste que supondría construir el secadero, en la zona en la que se espera que sea utilizado, donde como ya hemos señalado los recursos son limitados y será difícil y costoso acceder a materiales como los utilizados en la construcción de la instalación del laboratorio.

El precio de un secadero como el de laboratorio, asciende a un coste de 1000€ sin tener en cuenta el coste de los sensores, balanza y costes de construcción. Podemos ver los costes de un secadero de este tipo, desglosados y detallados en [28]. Este coste es inasumible por las personas que van a ser las destinatarias últimas del proyecto y por eso pensamos, que es más interesante hacer un plan de construcción y un presupuesto, enfocado a sus posibilidades reales.

Antes de estimar el coste de los materiales debemos definir las dimensiones que tendrá el secadero. Para ello, nos basaremos en el diseño del secadero utilizado en el laboratorio. La cámara de secado tendrá una altura de 1 m, un ancho de 0,7 m y un largo de 0,4 m, sujeta por cuatro apoyos de altura 0,3 m. Por tanto, la altura total del secadero será de 1,3 m. Dentro de la cámara tendremos cuatro bandejas con forma rectangular, midiendo el lado mayor 0,60 y el lado menor 0,30 m, que irán apoyadas sobre unos tacos de madera, los cuales tendrán la longitud del ancho de la cámara (0,4 m). En cuanto al colector, tendrá 0,7 m de ancho al igual que la cámara de secado, 0,2 m de alto y un largo de 1,16 m. Por tanto, la entrada y la salida del colector tendrán unas dimensiones de 0,7 m de ancho y 0,2 de alto.

La entrada del colector se apoyará en el suelo, formando un ángulo de 15° y la salida del colector se unirá con la cámara de secado, justo encima de los apoyos donde es sujeta la cámara.

Una vez definidas las dimensiones habrá que indicar que materiales se utilizarán para la construcción. Todos los elementos del secadero, junto con las bandejas estarán contruidos a partir de listones de madera de base 5·2,5 cm. Para las uniones entre listones, necesitaremos tornillos 6·60 mm. Estos materiales en cuanto a la estructura, pero además, necesitaremos: un tablero que haga de puerta para meter y sacar el producto, tres bisagras para la unión entra la puerta y la cámara y dos pasadores para cerrar la cámara. Las uniones anteriores se realizarán con tornillos 4,2·25 mm. El tablón

tendrá un ancho de 0,7 m como la cámara, pero de largo tendrá 0,6 m ya que así, habrá una abertura por dónde pueda salir el aire una vez ha pasado por el producto.

Además de la estructura utilizaremos: malla para la base de las bandejas y así poder apoyar el producto, plástico negro y plástico transparente para forrar y sellar el secadero. Uniremos el plástico a los tablones mediante grapas. La cubierta del colector se forrará de plástico transparente para que pueda traspasar la radiación, mientras que la base del colector, irá forrada de plástico negro para que actúe, absorbiendo al máximo la radiación que le llega. La cámara irá toda ella forrada en negro.

Junto con los materiales, necesitaremos herramientas para trabajar. Será necesario disponer de una taladradora, un martillo, una grapadora, grapas, destornillador, un arco de sierra y una lija.

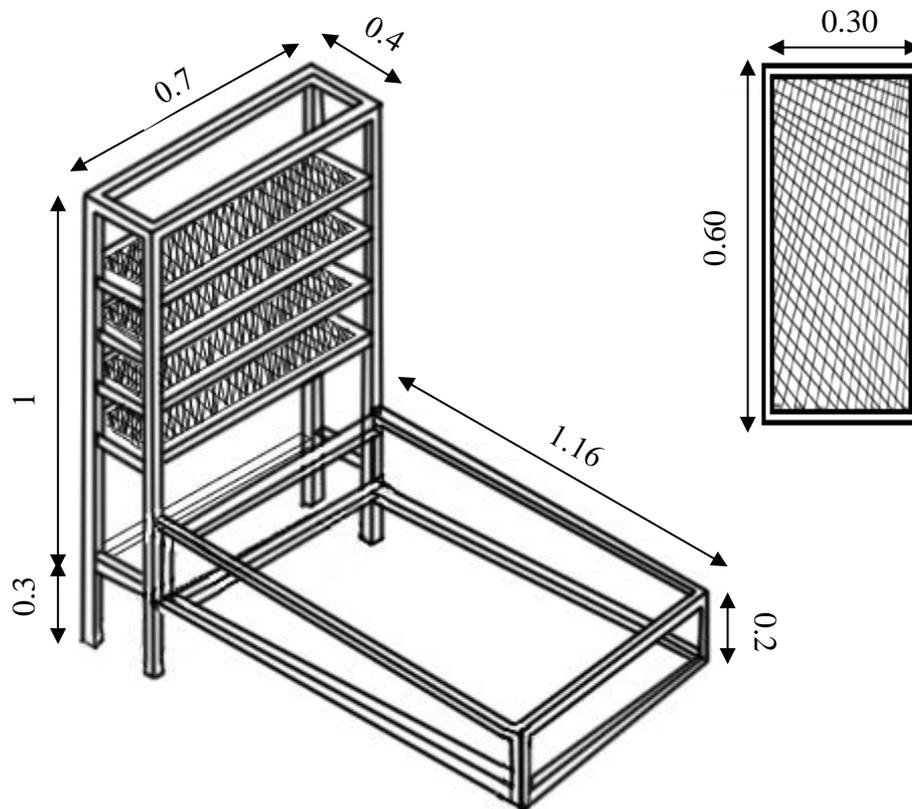


Fig. 50. Modelo de diseño del secadero.

En la figura 50 se presenta el diseño planteado para el secadero, junto con las dimensiones de la bandeja, donde puede apreciarse la rejilla donde será depositado el producto.

Desglosado los materiales y herramientas, junto con la cantidad necesaria de cada uno y su coste, en la tabla 7.1. Los costes son los que tendríamos si compráramos en España.

**Tabla 7.1. Desglose económico del secadero**

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Coste total (€)</b>
<b>Listones de abeto de 5x2,5 cm</b>	28,8 m (12 listones de 2,4 m)	35,4
<b>Malla mosquitera 1x3 m</b>	1 unidad	7,45
<b>Pasador 100mm</b>	2 unidades	10
<b>Tornillos 6x60 mm</b>	80 unidades	19,75
<b>Tornillos 4,2x25 mm</b>	20 unidades	1,84
<b>Bisagra cazoleta</b>	3 unidades	5,55
<b>Plástico negro 0,45x3 m</b>	2 unidades	25,9
<b>Plástico Transparente 2x10 m</b>	1 unidad	29,10
<b>Taladro (sin cable)</b>	1 unidad	24,95
<b>Grapadora</b>	1 unidad	11
<b>Caja de grapas</b>	1000 unidades	3,35
<b>Destornillador</b>	2 unidades	1,7
<b>Martillo</b>	1 unidad	3
<b>Arco de sierra de 30 cm</b>	1 unidad	4,95
<b>Lija</b>	1 unidad	1
<b>Tablero contrachapado 80x40x1,5 cm</b>	1 unidad	8,15
<b>Coste final</b>		<b>193,09€</b>

Datos sobre costes obtenidos de [29] y [30]. La planificación de construcción basada en [31]

## 7.2 Análisis económico

En los últimos años, es cada vez más común ver alimentos deshidratados en supermercados y grandes superficies, es por ello, que aunque la intención última de lo obtenido tras el secado, es destinarlo a autoconsumo de las personas que trabajen con el secadero, puede ser interesante utilizar la instalación del secadero para obtener beneficio de la venta de estos productos.

Destinar parte de los alimentos secos a su venta puede suponer un valor añadido a la propia función del secadero, sobre todo, en aquellos lugares en los que es más acusada la falta de ingresos. Pudiendo usar la fruta deshidratada principalmente para consumo, y si hubiera excedente, destinarlo a su venta, optimizando al máximo el secadero.

Centrándonos en los productos secados en este trabajo, los precios de mercado para dichos productos deshidratados son los siguientes:

Manzana.....	11,60€/kg
Plátano.....	6,36€/kg
Zanahoria.....	9,5€/kg

Estos precios pueden determinar con que producto merecerá más la pena utilizar el secadero. Vemos que la manzana es el producto que se vende más caro y el plátano el más barato, pero a la hora de decidir que producto es más interesante secar desde el punto de vista económico, hay que tener en cuenta más factores y no solo cuál puede venderse más caro.

Nuestro trabajo aquí presentado, puede servir de guía a la hora de elegir que productos interesa más secar. Los resultados presentados en el punto 5, pueden ser importantes a la hora de seleccionar el producto. Si observamos el *moisture ratio* para cada producto, vemos que tras 150 minutos la manzana tiene un *MR* superior al de plátano y zanahoria lo que significa que tendríamos que utilizar el secadero para el caso de la manzana, durante mayores tiempos para obtener el mismo resultado que en la zanahoria y el plátano, lo que implica, que aunque pueda llegar a venderse la manzana más cara, se necesitan mayores tiempos de uso de secadero, lo que hace que pierda rentabilidad a la hora de ser elegida la manzana, como producto idóneo para secar, frente a los otros dos. En cuanto a la comparación entre zanahoria y plátano, si observamos los precios, la zanahoria se vende 3 euros más caro el kilogramo y el *moisture ratio*, en 150 minutos se reduce a valores similares. Reduciéndose un poco más, en el caso de la zanahoria. Si además observamos los resultados del punto 5.4, la zanahoria se seca a mayor velocidad que el plátano, por tanto, podemos decir que por tiempos de secado y por precio, es más interesante utilizar el secadero para el secado mayoritario de zanahoria.

Finalmente, hay que considerar que la adquisición de estos alimentos supone un coste. Como hemos dicho al inicio de este trabajo, la instalación del secadero está pensada para regiones con menos recursos, los cuales, dependen en su mayoría de lo que ellos mismos producen y cultivan, por tanto, para el precio de compra de cada producto utilizaremos como referencia el coste de adquisición en origen, es decir, como si lo comprásemos directamente al agricultor y no a las grandes plataformas.

**Tabla 7.2. Coste y beneficio obtenido para cada producto**

<b>Producto</b>	<b>Coste adquisición</b>	<b>Precio de venta</b>	<b>Beneficio esperado</b>
<b>Manzana</b>	0,53 €/kg	11,60 €/kg	11,07 €/kg
<b>Plátano</b>	0,53 €/kg	6,36 €/kg	5,83 €/kg
<b>Zanahoria</b>	0,39 €/kg	9,5 €/kg	9,11 €/kg

A la vista de estos precios vemos que la adquisición del kilogramo de zanahoria es más barato que el de plátano y manzana. Desde el punto de vista de la velocidad de secado, tiempo de uso del secadero y beneficio esperado por cada kilogramo puede llegar a ser más interesante el secado de zanahoria, ya que aunque la manzana se pueda vender más cara, supone tiempo más elevados, lo que plantea un coste de oportunidad frente a la zanahoria. Descartamos el plátano frente a la zanahoria ya que el beneficio es inferior para un comportamiento similar ante el secado.

Los datos sobre el coste de la fruta deshidratada obtenido de [32], [33] y [34]. El coste de los productos en origen obtenido de [35].

## 8. CONCLUSIONES

El objetivo último del trabajo, es que nuestros resultados sirvan como punto partida o referencia, de cómo se comportan una serie de alimentos cuando son sometidos al secado dentro de un secadero solar. Se ha buscado trabajar con alimentos que sean de fácil acceso y cultivo en cualquier región del mundo, ya que el destino final de estos datos y de una instalación como el secadero, es que sirva de ayuda en aquellos lugares con menos recursos. Además, hemos aportado información sobre cómo se comporta un secadero solar monitorizado y controlado desde un laboratorio. Por tanto, en este trabajo hemos presentamos un estudio, sobre la cinética de secado de la zanahoria, la manzana y el plátano, así como la caracterización de una instalación real de un secadero solar.

En cuanto a la cinética de secado, hemos comprobado cómo, a medida que se producía un incremento de temperatura en el aire que entraba en la cámara donde se encontraban los productos, se producía una aceleración del proceso de secado, es decir, que a mayor temperatura, menor tiempo se necesita para reducir la cantidad de vapor de agua existente en el alimento. Podemos extrapolar este fenómeno a todos los productos, no solo a los que han sido objeto de estudio de este trabajo, por eso, cuando se trabaje con un secadero solar se tiene que optimizar y dar prioridad a la concentración de la radiación, para conseguir incrementar lo máximo posible la temperatura del aire.

El secadero solar, al depender exclusivamente del sol, se ve influido tanto por el momento del día, como por el momento del año en el que nos encontremos, así como, por las condiciones climáticas. La nubosidad es una de las causas por las que no llega a la superficie terrestre, toda la radiación que se concentra en la atmósfera como ya vimos en el punto 3.3.1, influyendo negativamente en el rendimiento del secadero. El secadero solar es un tipo de instalación, que presenta grandes diferencias de rendimiento según el mes del año en el que se utilice. En los meses de verano, es cuando se va aprovechar al máximo, ya que es aquí, cuando se registran los mayores valores de radiación y por tanto, se tienen las mayores temperaturas del año (ver anexo B). Es por eso, que el tiempo de secado de los productos va a ser menor en verano y mayor en invierno. Y lo mismo ocurre a lo largo de cualquier día, donde se tienen las mayores temperaturas en las horas centrales y es entonces, cuando se produce una mayor pérdida de masa en comparación con las temperaturas registradas en el amanecer y en el atardecer. Por tanto, el máximo rendimiento de un secadero solar o el momento en el que se producirá una mayor pérdida de humedad de los productos, será en los meses de verano, en las horas centrales del día.

En cuanto al comportamiento de los productos ante el secado, a medida que aumentamos la temperatura, aumenta la cantidad de agua extraída en el tiempo de duración del ensayo. Pero, aun produciéndose este fenómeno en los tres productos, no se da de la misma manera.

Hemos observado cómo, para los 150 minutos de las pruebas, para zanahoria y plátano, había un comportamiento similar, mientras que para la manzana, el comportamiento ante el secado era distinto. El *moisture ratio* para la zanahoria y el plátano, tras 150 minutos, llega a valores inferiores a 0,2 (para la temperatura de trabajo más alta), estando próximo al valor de 0,1 buscado. Pero, aun comportándose de forma similar, observando el *drying rate* para las cuatro pruebas, vemos que la zanahoria es la que se seca siempre a mayor velocidad y viendo la evolución del *moisture ratio*, es la zanahoria la que más reducción de humedad consigue en 150 minutos. Concluyendo por tanto, que es la zanahoria la que mejor comportamiento presenta frente al secado.

En la zanahoria y el plátano, conseguimos acercarnos al valor de *moisture ratio* buscado, para una temperatura de 35 °C. Observando la tendencia de las curvas cuando aumenta la temperatura, si consiguiéramos aumentar la concentración de radiación, se podría llegar a tener un  $MR=0,1$  en menos de 150 minutos. El caso de la manzana es distinto, a la temperatura de 35 °C, el *moisture ratio* apenas se reduce a un valor inferior de 0,5, valor muy alejado del  $MR=0,1$ . Esto supone un inconveniente, ya que para conseguir reducir el *moisture ratio* hasta valores cercanos a 0,1, tendremos dos opciones; una es, mantener durante más tiempo la manzana dentro de la cámara, lo que supone utilizar el secadero durante mucho tiempo, únicamente secando un solo producto. Esto supone un coste de oportunidad, ya que se podría utilizar ese tiempo, para secar otros productos. La otra opción sería, incrementar la temperatura del aire, lo que implica, buscar secar la manzana en las horas centrales del día (que es cuando mayor temperatura tenemos).

A la vista de este trabajo y sus resultados, hemos comprobado cómo, para la realización de estudios experimentales, es complicado que los resultados coincidan completamente con los cálculos realizados teóricamente (como hemos visto en el punto 5.1), ya que en la realidad, existen infinidad de factores que, o bien no se tienen en cuenta a la hora de realizar los cálculos o bien son imposibles de controlar, influyendo en la desviación de los resultados obtenidos con lo esperado teóricamente. Para trabajos como el presentado en este proyecto, en los que existe una dependencia muy alta de factores totalmente impredecibles como son las condiciones climáticas, las estimaciones teóricas pueden ayudar de forma orientativa, pero habrá que realizar siempre el procedimiento experimental.

Finalmente, hemos podido observar que el incremento de temperatura es un factor determinante en la reducción de los tiempos de secado. Como ya hemos comentado, el secadero es una instalación que tiene una alta dependencia de la climatología. Sabiendo que hay épocas del año, en las que el rendimiento del secadero es peor, puede ser interesante, plantearse modificar ciertos aspectos del diseño que consigan concentrar la radiación para poder incrementar la temperatura a la que el aire entra en la cámara de secado. Una modificación de diseño, podría ser instalar materiales que funcionen a modo de espejo (con una superficie suficientemente pulida y brillante), reflejando la radiación sobre el colector [36]. Esto espejos podrían ser instalados en los bordes laterales igual que en algunos diseños de cocinas solares.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Alothman, R. Bhat y A. Karim, “Antioxidant capacity and phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with different solvents”, *Food Chemistry*, vol. 115, nº 3, pp. 785-788, Agosto 2009.
- [2] G. İZLİ, “Total phenolics, antioxidant capacity, colour and drying characteristics of date fruit dried with different methods”, *Food Science and Technology*, vol. 37, nº 1, Ene.-Mar. 2017.
- [3] T. Seerangurayar, A. M. Al-Ismaili, J. Jeewantha y A. Al-Nabhani, “Experimental investigation of shrinkage and microstructural properties of date fruits at three solar drying methods” , *Solar Energy*, vol. 180, pp. 445-455, Enero 2019.
- [4] E. Guija-Poma, M. Á. Inocente-Camones, J. Ponce-Pardo y E. Zarzosa-Norabuena, “Evaluación de la técnica 2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo (DPPH) para determinar capacidad antioxidante”, *Horiz Med*, pp. 57-60, Ene.-Mar. 2015.
- [5] P.Guanca. ”Agujero negro”. Wordpress.  
<https://paolaguanca.wordpress.com/tag/montanas/> (acceso: 28 Marzo 2019).
- [6] A. Bhardwaj, R. Kumar y R. Chauhan, “Experimental investigation of the performance of a novel solar dryer for drying medicinal plants in Western Himalayan region”, *Solar Energy*, vol. 177, pp. 395-407, Noviembre 2018.
- [7] Farmersdotter2. “Go Deep”. farmersdotter. <https://farmersdotter.ca/2012/08/05/go-deep/> (acceso: 28 de marzo de 2019).
- [8] C. A. Vallejos,” MODELACIÓN, SIMULACIÓN, CONTROL PID Y CONTROL PREDICTIVO DE UN SECADOR ROTA DISCO EN LA INDUSTRIA PESQUERA”, Tesis doctoral, Dpto. de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura, Piura, Perú. [En línea]. Disponible en:  
[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1757/IME\\_167.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1757/IME_167.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [9] J. Besora, “Secador Solar de Café”, Ingeniería Sin Fronteras, España, Informe técnico, 2017.
- [10] “Los deshidratadores solares”. Sitio solar .<http://www.sitiosolar.com/los-deshidratadores-solares/> (acceso: 28 Marzo 2019).
- [11] Soluciones Prácticas. “Implementan secador de cacao en Palos Blancos”. Solucionespracticas.[http://www.solucionespracticas.org.bo/secador\\_de\\_cafe\\_en\\_Palos\\_Blancos](http://www.solucionespracticas.org.bo/secador_de_cafe_en_Palos_Blancos) (acceso: 28 marzo 2019).
- [12] A. Soria y N. García, *Energía solar térmica de baja temperatura*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [13] “Energía solar térmica”. Renov-arte. <http://renov-arte.es/energias-renovables/energia-solar-termica> (acceso:30 de marzo de 2019)

- [14] “Secador Solar de Frutas”. Terra. <http://www.terra.org/categorias/articulos/secador-solar-de-frutas> (acceso: 30 de marzo 2019)
- [15] L. Blanco Cano, “Modelling and experimental investigation on the processes involved”, Tesis doctoral, Dpto. Ingeniería Térmica y Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://e-archivo.uc3m.es>
- [16] Dpto. Ingeniería Térmica y Fluidos. *Psicrometría*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [17] Aemet. <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/radiacion/radiacion?l=madrid> (acceso: 9 mayo 2019).
- [18] Aemet. <http://www.aemet.es/es/eltiempo/prediccion/municipios/horas/madrid-id28079> (acceso: 9 mayo 2019).
- [19] A. Soria y N. García, *Radiación solar*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2018.
- [20] I. Rahmanzadeh, M. Asghari, H. Shirzad, A. Alirezalu y G. Ghasemi, “Lemon verbena (*Lippia citrodora*) essential oil effects on antioxidant capacity and phytochemical content of raspberry (*Rubus ulmifolius* subsp. *sanctus*)”, *Scientia Horticulturae*, Vol. 248, pp. 297-304, Enero 2019.
- [21] E. Sanz. ” ¿Por qué se añade limón a la manzana para evitar que se oscurezca?”. Muy interesante. <https://www.muyinteresante.es/curiosidades/preguntas-respuestas/porque-se-anade-limon-a-la-manzana-para-evitar-que-se-oscorezca-141372849617> (acceso: 9 Junio 2019).
- [22] L. F. G. Mosquera, S. A. Giraldoa, D. G. Jiménez, D. M. L. Velasco y A. O. Alturo, “Transición vítrea en alimentos”, *Vector*, Vol.9, pp. 21-28, 2014.
- [23] G. Moraga, P. Talens, M. J. Moraga y N. Martínez-Navarrete, “Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices”, *Journal of Food Engineering*, Vol.106, pp. 212-219, Octubre 2011.
- [24] E. K. Akpınar, “Determination of suitable thin layer drying curve model”, *Journal of Food Engineering*, vol. 73, pp. 75-84, 2006.
- [25] D. J. Nicolin, D. F. Rossoni y L. M. M. Jorge, “Study of uncertainty in the fitting of diffusivity of Fick's Second Law of Diffusion with the use of Bootstrap Method”, *Journal of Food Engineering*, Vol.184, pp. 63-68, Septiembre 2016.
- [26] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*, Oxford: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1975.
- [27] İ. Doymaz, “An Experimental Study on Drying of Green Apples”, *Drying Technology: An International Journal*, vol. 27, n° 3, pp. 478-485, 2009.

[28] I. Priego Peña, “Estudio sobre la cinética de secado de microalgas”, Trabajo fin de grado, Dpto. Ingeniería Térmica y Fluidos, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://e-archivo.uc3m.es>

[29] Leroymerlin. <http://www.leroymerlin.es> (acceso: 8 Junio 2019).

[30] Bricomart. <https://www.bricomart.es/liston-abeto-sin-cepillar-2400-x-25-x-25-mm.html> ( acceso: 8 Junio 2019).

[31] B. Moragues Martinez, “Rediseño de un deshidratador de alimentos DIY de bajo”, Trabajo fin de grado. Dpto. de Expresión Gráfica Arquitectónica, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/>

[32] Frutos secos frescos. <https://frutossecosfrescos.com/producto/manzana/> (acceso: 7 Junio 2019).

[33] Todo frutos secos. <https://todofrutossecos.es/Platano-deshidratado-Bolsa-1-Kg> (acceso: 7 Junio 2019).

[34] Amazon . <https://www.amazon.es/alesframa-ZANAHORIA-DESHIDRATADA-bolsa/dp/B079VS9DQ2?th=1> (acceso: 7 Junio 2019).

[35] J.Yébenes.” Diferencia entre los precios de los alimentos en origen y en venta, ¿qué ocurre en el mercado?”. Lanzadigital. <https://www.lanzadigital.com/campo-2/tanta-diferencia-los-precios-los-alimentos-origen-venta/> (acceso: 7 junio 2019).

[36] ”¿Cómo se puede concentrar la luz del Sol?”. Fenercom. <https://www.fenercom.com/pdf/aula/recorrido-de-la-energia-experiencia-06.pdf> (acceso: 10 Junio 2019).

[37] Dpto. Ingeniería Térmica y Fluido. *Transferencia de Calor*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2018.

[38] Aemet. [http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/analisis\\_estacional?w=0&l=3195&datos=temp](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/analisis_estacional?w=0&l=3195&datos=temp) (acceso: 9 Mayo 2019).



# ANEXOS

## ANEXO A. PROPIEDADES DEL AIRE

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica<sup>a</sup>

$T$ (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m <sup>2</sup> )	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)	$Pr$
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

Fig. A.1 Propiedades del aire. De [37]

## ANEXO B.TEMPERATURA EN VERANO EN MADRID

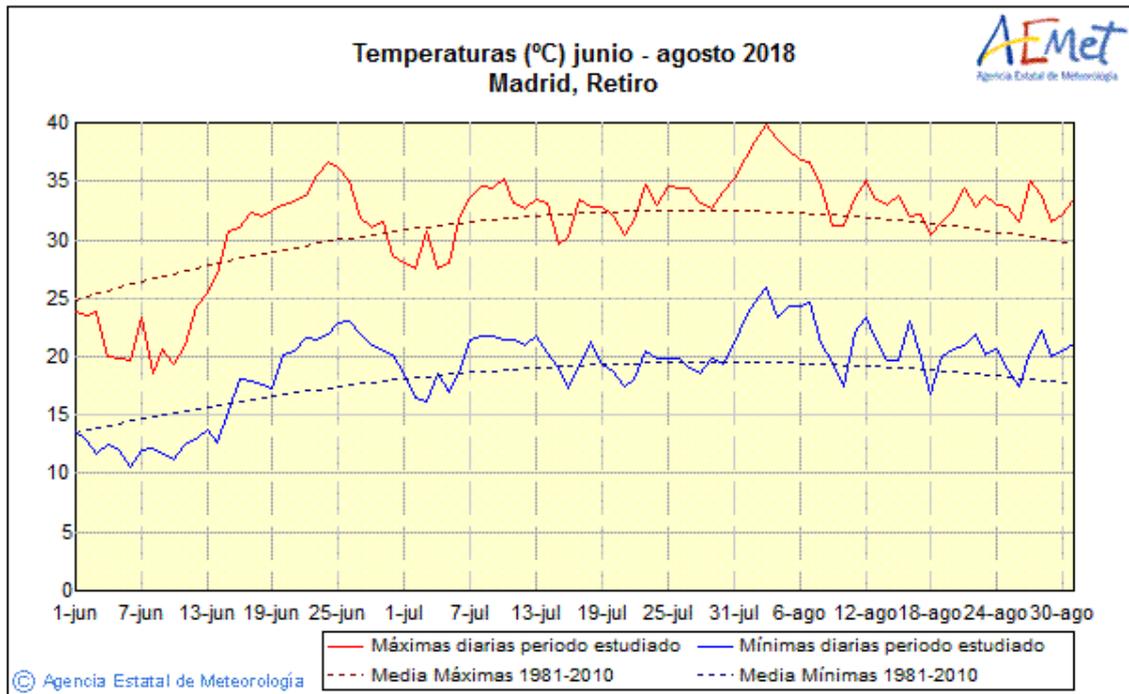


Fig. A.2. Temperaturas alcanzadas en verano en Madrid. De [38]