

# **INTRODUCCIÓN**

## ANTECEDENTES

*Solanum lycopersicum*, conocido comúnmente como tomate, jitomate o tomatara, es una especie de la familia de las solanáceas originaria de México y cultivada en todo el mundo para su consumo tanto fresco como procesado de diferentes modos (salsa, puré, zumo, deshidratado, enlatado) (Wikipedia, 2014).

El tomate viajó a Europa desde Tenochtitlan, capital del Imperio azteca, después de la conquista de los españoles, donde se le conocía como *xītomatl*, fruto con ombligo. Si bien ambos centros de origen del tomate cultivado, Perú y México, han sido postulados y se ha proporcionado evidencia en uno u otro sentido, no existen pruebas concluyentes que apoyen de manera incontrovertida uno de tales sitios como el lugar donde el tomate ha sido domesticado a partir de su ancestro silvestre. Más aún, puede ser que este cultivo haya sido domesticado independientemente por las culturas precolombinas que habitaban lo que actualmente es México y Perú (Wikipedia, 2014).

En la actualidad la importancia de los cultivos de tomates aumenta continuamente, abarcando nuevas extensiones de terreno e industrializando cada vez más la producción no solo para el consumo fresco y la obtención del jugo, sino para suministrar de materia prima a la gran cantidad de fábricas de conserva que cada día se implantan (Hernansaez P. y Pastor J., 2009).

El cultivo de tomate corresponde a una de las especies hortícolas más difundidas a nivel mundial. La superficie total, de acuerdo a la FAO (La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), alcanza a unas 3,6 millones de hectáreas, la cual ha aumentado sostenidamente en los últimos años (HORTO Info., 2013).

Como ocurre con la mayor parte de las hortalizas, China ocupa el primer puesto en cuanto a la producción de tomate, con 48.576.853 toneladas producidas en 2011 (último año del que se dispone de datos a nivel mundial). El segundo lugar en el listado de los países del mundo mayores productores de tomate, está ocupado por

India, con 16,83 millones de toneladas; en el tercer puesto figura Estados Unidos con 12,62 millones de toneladas, en el cuarto lugar aparece Turquía con 11 millones de toneladas y en el quinto puesto Egipto, con 8,10 millones de toneladas (HORTO Info., 2013).

En la tabla I.1 se puede observar la producción de los 10 principales países en cuanto a producción (HORTO Info., 2013), en los años de 2007 a 2011:

**Tabla I.1**

**Principales países productores de tomate a nivel mundial (toneladas por año)**

<b>Países</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
China	36.096.890	39.938.708	45.365.543	46.876.088	48.576.853
India	10.055.000	10.303.000	11.148.800	12.433.200	16.826.000
Estados Unidos	14.185.200	12.735.100	14.181.300	12.858.700	12.624.700
Turquía	12.624.700	10.985.400	10.745.600	10.052.000	11.003.400
Egipto	8.639.020	9.204.100	10.278.500	8.544.990	8.105.260
Irán	5.534.270	4.826.400	5.887.710	5.256.110	6.824.300
Italia	6.530.160	5.976.910	6.878.160	6.024.800	5.950.220
Brasil	3.431.230	3.867.660	4.310.480	4.106.850	4.416.650
España	4.081.480	4.049.750	4.603.600	4.312.700	3.821.490
Uzbekistán	1.680.000	1.930.000	2.110.000	2.347.000	2.585.000

Fuente: HORTO Info., 2013. Disponible en:

<http://www.hortoinfo.es/index.php/noticias/1543-tomate-mundo-15-07>

En la tabla I.2 se muestra los principales países sudamericanos productores de tomate.

**Tabla I.2**

**Principales países productores de tomate en Sudamérica (toneladas por año)**

<b>Países</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
Brasil	3.431.406	3.867.660	4.310.480	4.106.850	4.416.650
Chile	1.270.000	977.000	850.000	900.000	872.485
Argentina	680.000	701.311	713.492	720.733	698.699
Colombia	474.317	490.929	514.587	546.322	595.299

Fuente: HORTO Info., 2013. Disponible en:

<http://www.hortoinfo.es/index.php/noticias/1543-tomate-mundo-15-07>

El tomate es la hortaliza más difundida y de mayor valor económico en todo el mundo. En Bolivia, el cultivo de tomate es de gran importancia, tanto por su amplia adaptabilidad a distintos pisos ecológicos, como por su rendimiento, generando por lo tanto importantes ingresos económicos a los agricultores que la cultivan (Coca M., 2012).

Bolivia tiene varias zonas y épocas de producción de tomate en diferentes pisos altitudinales que van desde los 250 hasta los 2.500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Sin embargo, las zonas más adecuadas para obtener un producto de calidad se encuentran desde los 1000 hasta los 2500 m.s.n.m. A estas altitudes se logra un balance adecuado de temperaturas frescas y luminosidad siendo estas las condiciones necesarias para el color intenso y alto contenido de azúcares y otros sólidos en el fruto (Centro de Investigación Agrícola Tropical, CIAT, 2012).

En la tabla I.3 se muestra la producción agrícola de tomate en Bolivia, según cultivo (tonelada métrica) (INE, 2012), desde el año 2007 a 2012:

**Tabla I.3**

**Producción de tomate en Bolivia (toneladas por año)**

<b>Descripción</b>	<b>2007 - 2008</b>	<b>2008 - 2009</b>	<b>2009 - 2010</b>	<b>2010 - 2011</b>	<b>2011 - 2012</b>
Producción de tomate	52.324	53.070	53.062	49.476	51.748

Fuente: INE, 2014. Disponible en:

<http://www.ine.gob.bo/indice/general.aspx?codigo=40104>

Tarija, ubicada a 1874 m.s.n.m, además de ser un departamento cuya economía gira en torno a los hidrocarburos, también hay espacio para la producción de tubérculos, granos, verduras y frutas, productos que se venden en el departamento y en los mercados de Cochabamba y Santa Cruz (El Deber, 2013).

En la tabla I.4 se muestra la producción de tomate en Tarija, según cultivo (tonelada métrica) (INE, 2012), desde el año 1996 a 2000:

**Tabla I.4**

**Producción de tomate en Tarija (toneladas por año)**

<b>Descripción</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>
Producción de tomate	2.090	2.222	1.542	1.816	2.017

Fuente: INE, 2014. Disponible en:

<http://www.ine.gob.bo/indice/general.aspx?codigo=40104>

Según datos de la CAT (Cámara Agropecuaria Tarija) la producción de tomate para el año 2013 se resume en la tabla I.5:

**Tabla I.5**  
**Producción de tomate en Tarija año 2013 (toneladas por año)**

<b>Provincia</b>	<b>Superficie Cultivada (ha)</b>	<b>Rendimiento por ha.</b>	<b>Producción total (Tn)</b>
<b>Cercado</b>	68	20	1360
<b>Avilés</b>	151	20	3020
<b>Arce</b>	62	20	1240
<b>O'Connor</b>	18	20	360
<b>Gran Chaco</b>	74	20	1480
<b>Méndez</b>	5	20	100
<b>Total</b>	378		7560 Tn

Fuente: Cámara Agropecuaria de Tarija, CAT, 2014.

El tomate es una de las hortalizas más demandadas por los consumidores, quienes la usan como ingrediente en sopas, ensaladas y como condimento, convirtiéndose en uno de los principales rubros que más se consumen en estado fresco, así como también es usado en la industria para su transformación, hecho que se atribuye a una creciente demanda del producto (Monsalve J. et al., 2007).

El secado o deshidratado es una de las tecnologías más frecuentes en la agroindustria y consiste en la eliminación de gran parte del agua del producto procesado. Lo que se busca es disminuir al máximo la cantidad bioquímica interna y la acción de

microorganismos que permitan mantener por mucho más tiempo el producto en condiciones de almacenaje. (Monsalve J. et al., 2007).

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general.**

“Elaborar tomate deshidratado a partir de la variedad “perita”, garantizando su calidad para su comercialización”.

### **Objetivos específicos.**

- Realizar la caracterización de la materia prima y del producto obtenido.
- Diseñar el proceso de secado y fijar las variables.
- Realizar el secado experimental en laboratorio bajo condiciones controladas.
- Determinar la cinética del proceso de secado.
- Realizar un análisis final, físico/químico y microbiológico del producto.

## **JUSTIFICACIÓN**

1. La vida útil del tomate es muy corta lo que lleva a buscar alternativas para su conservación. La deshidratación permite preservar alimentos altamente perecederos, especialmente frutas y hortalizas, cuyo contenido de agua es típicamente superior al 90%, el objetivo principal es disminuir la actividad enzimática y la capacidad de los microorganismos para desarrollarse sobre los alimentos.
2. Los factores climáticos de Tarija y la fertilidad de su tierra hacen de la misma un lugar óptimo para el cultivo de tomate, siendo este producto cultivado casi todo el año en las distintas regiones del departamento. Debido a esto la

producción de tomate tiene gran importancia comercial en el departamento, además de contar con su presencia en el mercado todo el año.

3. El tomate tiene un alto valor nutricional, su peso contiene en mayor proporción agua y en segundo lugar, de mucha importancia, hidratos de carbono. Además de esto el tomate es una fuente importante de ciertos minerales tales como potasio y magnesio, y contiene las vitaminas B1, B2, B5 y C. Mediante técnicas adecuadas de deshidratación las propiedades nutricionales del tomate se conservaran en el mismo.
4. La disminución del contenido de agua en el tomate deshidratado, mediante el proceso de deshidratación hace que el sabor del tomate se intensifique en el mismo. Por su exquisito sabor el tomate deshidratado es usado en las preparaciones culinarias, realzando de esta forma el sabor de las comidas, o encontrarse en otras formas tales como zumos, al mezclarlo con agua, para elaborar pan, para la decoración de algunos platos, como salsas para untar y hasta para la elaboración de helados. Uno de los principales usos del tomate deshidratado en la industria culinaria es la elaboración de tomates deshidratados en aceite, el cual tiene una gran demanda en la actualidad por realzar el sabor de algunos platillos al ser usado como guarnición.

**CAPÍTULO I**  
**MARCO TEÓRICO**

## 1.1 Generalidades

Las frutas y hortalizas juegan un papel muy importante para el hombre ya que contienen vitaminas, minerales, antioxidantes, fibra y carbohidratos esenciales para su alimentación. Sin embargo no se encuentran disponibles durante todo el año, ni en todas las regiones. Por lo que se han buscado métodos que permitan conservar sus nutrientes, así como sus propiedades, para poder tenerlos disponibles permanentemente. Uno de los métodos que se ha aplicado al tomate es el deshidratado (Gómez M., 2009).

La diversidad de usos y sus atributos sensoriales y protectores de la salud humana han posicionado al tomate como uno de los frutos más importantes en la dieta humana. Sin embargo, su corta vida postcosecha en estado fresco ha limitado su distribución. La deshidratación de este fruto ha permitido extender su vida de anaquel, fortaleciendo su demanda. Hoy en día el tomate deshidratado es muy popular en ciertas regiones del mundo tales como Brasil y España entre otros (BIOTECNIA, 2012).

**Figura 1.1**

**Tomate fresco**



Fuente: El Huerto 2.0, 2010. Disponible en:

<https://elhuerto20.wordpress.com/2014/08/30/tomates-2014/>

## 1.2 Importaciones y consumo de tomate y sus derivados

En la tabla 1.1 se muestra los principales países importadores de tomate a nivel mundial:

**Tabla 1.1****Países importadores de tomate en el año 2011**

<b>País</b>	<b>Porcentaje de importación de tomate (%)</b>
Federación de Rusia	25
Reino Unido	21
Francia	16
Canadá	10
Holanda	10
Suecia	5
Italia	5
Polonia	4
Bélgica	4
Total	100

Fuente: CEI-RD, 2012. Disponible en:

[http://www.cei-rd.gov.do/ceird/estudios\\_economicos/estudios\\_productos/perfiles/tomate.pdf](http://www.cei-rd.gov.do/ceird/estudios_economicos/estudios_productos/perfiles/tomate.pdf)

En la tabla 1.2 se muestra los principales países importadores de tomate pelado a nivel mundial, para el año 2008.

**Tabla 1.2**  
**Principales países importadores de tomate pelado**

<b>País</b>	<b>Porcentaje de importación de tomate pelado (%)</b>
Reino Unido	30
Alemania	14
Francia	9
Japón	7
Bélgica	4
Canadá	4
Australia	4
Holanda	3
Resto	25
Total	100

Fuente: SAGARPA, 2010.

En la tabla 1.3 se muestra los principales países importadores de pasta de tomate en el año 2008:

Tabla 1.3

**Principales países importadores de pasta de tomate en el año 2008**

<b>País</b>	<b>Porcentaje de importación de pasta de tomate (%)</b>
Alemania	9
Italia	8
Rusia	7
Reino Unido	6
Francia	5
Japón	5
Ghana	4
Nigeria	3
Canadá	2
Libia	2
Resto	49
Total	100

Fuente: SAGARPA, 2010. Disponible en:

<http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/Monografias/Jitomate.pdf>

El MERCOSUR en general y Brasil en particular son los mercados más importantes para la exportación de tomate deshidratado (Santiago J., 2006).

En la tabla 1.4 se muestran los principales países importadores de tomate deshidratado en el año 2005.

**Tabla 1.4**

**Principales países importadores de tomate deshidratado en el año 2005**

<b>País</b>	<b>Toneladas de tomate deshidratado por año</b>
Brasil	4087,45
España	251,21
EE.UU.	156,65
Chile	62,82
Países Bajos	12,04

Fuente: Santiago J., 2006. Disponible en:

<http://www.minagri.gob.ar/site/areas/prodernea/50->

[Biblioteca%20Virtual/\\_archivos/000004-Estudios%20Sectoriales/060130-](http://www.minagri.gob.ar/site/areas/prodernea/50-Biblioteca%20Virtual/_archivos/000004-Estudios%20Sectoriales/060130-)

### **1.3 Importancia del tomate**

En los últimos años el interés por los productos derivados del tomate, ha cobrado importancia debido a su actividad antioxidante.

El tomate no solo contiene antioxidantes nutritivos como las vitaminas A, C y E; contiene también una gran cantidad de antioxidantes no nutritivos como betacarotenos, carotenoides (licopeno, principalmente), flavonoides, flavonas y ácidos fenólicos (Gómez M., 2009).

Los tomates proporcionan potasio, hierro, fósforo, algunas vitaminas del complejo B y contienen alrededor de un 90% de agua. La composición depende de la variedad, etapa de madurez, condiciones de cultivo: clima, luz, temperatura, tierra y fertilización, así como su manejo y almacenamiento (Gómez M., 2009).

En la tabla 1.5 se muestran las propiedades nutricionales del tomate perita:

**Tabla 1.5**  
**Propiedades nutricionales del tomate “perita”**

Componente	Valor nutricional en base a 100 g.
Proteínas	1.20 g.
Lípidos	0.15 g.
Glúcidos	6.50 g.
Valor energético	20 kcal.
Calcio	7.00 mg.
Hierro	0.60 mg.
Riboflavinas	0.05 mg.
Vitamina A	833.00 UI
Caroteno	0.05 mg.
Vitamina C	23.00 mg.
Fibra alimentaria	1.00 mg.

Fuente: Nature Choice, SAT, 2012. Disponible en:

<http://www.productonaturechoice.com/tomate/FichaTomatePera.pdf>

El licopeno constituye aproximadamente el 83% de todos los pigmentos presentes en el tomate, siendo el fruto que tiene los niveles más altos de dicho compuesto. Los tomates y sus productos son las principales fuentes de licopeno en la dieta de las personas. La degradación del licopeno no solo afecta el color del producto final, sino también su valor nutritivo. Estudios han demostrado que el licopeno protege contra cáncer de próstata, de mama, arteriosclerosis, reduce la oxidación de proteínas de alta densidad y ayuda a disminuir los niveles de colesterol en la sangre (Gómez M., 2009).

#### **1.4 Deshidratación**

La deshidratación consiste en eliminar agua que contienen los alimentos mediante evaporación por fuentes de calor solar, eléctrica u otra fuente. El objetivo principal de esta tecnología es reducir el contenido de humedad en los alimentos, lo cual disminuye su actividad enzimática y la capacidad de microorganismos para desarrollarse sobre el alimento. Las principales variables que modulan la velocidad del movimiento del agua en el alimento son el tiempo y la temperatura (Monsalve et al., 2007).

Este proceso permite preservar alimentos altamente perecederos, especialmente frutas y hortalizas, cuyo contenido de agua es típicamente superior al 90%. La deshidratación del tomate se lleva a cabo mediante diversos métodos, variando de artesanales a altamente sofisticados y a gran escala. La deshidratación permite reducir la actividad acuosa del fruto, reduciendo la susceptibilidad al deterioro, pero induciendo una serie de cambios físicos, químicos y de bioactividad que afectan su aceptabilidad por el consumidor final. La magnitud de estos cambios depende de las condiciones de deshidratación (Biotecnia, 2012).

Conforme se incrementa la temperatura la deshidratación se acelera, pero al realizar esto se corre el riesgo de que los atributos cualitativos iniciales del alimento se modifiquen. En el caso del tomate el uso de las altas temperaturas, 80 °C o más, de deshidratación daña la apariencia del tomate (pardeamiento), reduce el contenido de

nutrientes e induce a un sabor dulce a consecuencia de la caramelización de los azúcares. Por otro lado la disminución de la temperatura de deshidratación alargará el tiempo de este proceso, pero el tomate obtenido tendrá mejores atributos nutricionales, color, aroma, sabor y textura. Además de la temperatura y el tiempo de deshidratación, el incremento de la superficie de contacto del alimento con el fluido deshidratante también incrementará la velocidad de movimiento del agua desde el alimento hacia el exterior del mismo. Esto se logra rebanando y perforando el tomate (Biotecnia, 2012).

Algunos conceptos a considerarse dentro del proceso de deshidratación son:

#### **1.4.1 Actividad del agua**

Uno de los parámetros más importantes en la deshidratación de los alimentos es la condición de humedad de equilibrio que determina el límite del proceso. Aunque este valor es una parte importante del gradiente que provoca el movimiento del agua, la actividad de esta se ha convertido en un factor determinante en el estudio de la estabilidad de los alimentos secos. Según Potter N. y Hotchkiss J. en su Libro *Ciencias de los alimentos* (1999), el porcentaje de agua de un tomate grande es de 94% de agua.

#### **1.4.2 Pardeamiento**

El Pardeamiento es la aparición de pigmentos pardos o negros en frutas y vegetales, pudiendo realizarse en forma natural y/o transformación enzimática, la cual deberá ser controlada dentro del proceso de deshidratación. Se tiene los siguientes tipos de pardeamiento (Ramírez E., 1998).

#### **1.4.3 Pardeamiento no enzimático**

El Pardeamiento no enzimático también se llama “reacción de Maillard”, “caramelización” o “formación de melanoidinas”; es un conjunto de reacciones muy

complejas que conducen en diversos alimentos a la formación de pigmentos pardos o negros, así como a modificaciones favorables o no del color y sabor (Ramírez E., 1998).

El Pardeamiento no enzimático se presenta durante los procesos tecnológicos o el almacenamiento de diversos alimentos. Se acelera por el calor y por lo tanto, se aumenta especialmente durante las operaciones de cocción, pasteurización y deshidratación (Ramírez E., 1998).

Algunos elementos contienen en su estado natural compuestos carbonilo muy reactivos, también el ácido ascórbico es un reductor que constituye el principal sustrato del pardeamiento no enzimático de los jugos de fruta y sus concentrados que a causa de estas reacciones pierden parte de sus actividad en vitamina C (Ramírez E., 1998).

#### **1.4.3.1 Factores que influyen en el pardeamiento no enzimático**

Hay diversos factores físicos y químicos que afectan no solo a la velocidad, sino también a la naturaleza de las reacciones de pardeamiento (Ramírez E., 1998).

- a) Naturaleza de los azúcares reductores: las hexosas presentes en el tomate (glucosa y fructosa) son un poco reactivas ante el pardeamiento enzimático.
- b) Temperatura: a bajas temperaturas puede retardarse el pardeamiento no enzimático y por el contrario a temperaturas elevadas aumenta fuertemente.
- c) Actividad del agua: la velocidad de pardeamiento alcanza un máximo entre actividades acuosas de 0,55 y 0,75, pero sobrepasando estos valores decrece. El tomate posee una actividad del agua mayor a 0,98, lo cual indica que este factor no influye.
- d) pH: el pH óptimo se sitúa entre 5 y 7 y decrece su actividad si este disminuye. El pH del tomate está entre 4 y 5 lo cual indica que este factor no influye en el pardeamiento del mismo.

#### **1.4.3.2 Evaluación en el pardeamiento no enzimático**

La intensidad del pardeamiento no enzimático puede medirse por reflectancia (alimentos sólidos), o también por absorbancia después de la extracción de los pigmentos, son solventes a temperatura ordinaria, eventualmente con la ayuda de una enzima proteolítica.

#### **1.4.3.3 Prevención del pardeamiento no enzimático**

En la práctica, los medios para prevenir el pardeamiento no enzimático son poco numerosos, como ser:

- a) Eliminación de sustratos: esto se controla evitando adicionar azúcares reductores.
- b) Descenso del pH: en algunos casos se puede retardar el pardeamiento no enzimático con un descenso del pH.
- c) Vigilancia de la temperatura y humedad: El realizar la operación a una temperatura más baja presenta el inconveniente de alargar el proceso de deshidratación y por consiguiente tener el alimento más tiempo con un contenido crítico de agua.
- d) Adición de agentes inhibidores: por el momento, el único inhibidor no enzimático es el ácido sulfuroso, utilizado bajo la forma de gas o sales.

#### **1.4.4 Pardeamiento enzimático**

Se denomina “pardeamiento enzimático” la transformación enzimática en sus primeras etapas de compuestos fenólicos en polímeros coloreados, frecuentemente pardos o negros. El pardeamiento enzimático se observa en vegetales ricos en compuestos fenólicos, siendo estos (mono, di o polifenoles); planteando problemas de coloraciones en algunas frutas y legumbres; en particular cuando se alteran los tejidos de estos vegetales o se dañan por golpes durante los procesos de: pelado, corte, triturado, para la elaboración de jugos, congelación, deshidratación (Ramírez E., 1998).

#### **1.4.4.1 Prevención del pardeamiento enzimático**

La prevención puede ser:

- Evitar contusiones que dañen los tejidos.
- Inactivación de enzimas por el calor (precalentamiento, pasteurizado, esterilización).
- Adición de compuestos reductores que transforman las quinonas en fenoles; permitiendo retardar o impedir el pardeamiento enzimático, el compuesto más frecuente es el ácido ascórbico.
- La inmersión de la fruta y de los vegetales del pelado y corte en agua ligeramente salada o en solución de sacarosa o de glucosa.
- Descenso del pH (menor a 5) retarda el pardeamiento enzimático, por lo general se emplean baños en ácido cítrico.

Es eficaz el empleo contra el pardeamiento enzimático y no enzimático el anhídrido sulfuro y los bisulfitos (Ramírez E., 1998).

En el caso del pardeamiento enzimático su modo de acción no está totalmente aclarado para el anhídrido sulfuroso, del que una gran parte se fija sobre los enlaces carbonilo de los azúcares presentes y otra reacciona con las quinonas, que así quedan bloqueadas, además posee una acción antiséptica (Ramírez E., 1998).

#### **1.4.5 Factores que interviene en el proceso de deshidratación**

Se han realizado varios estudios en el tomate para encontrar las condiciones de operación apropiadas que permitan obtener productos deshidratados. Así como, la conservación de los componentes que le dan al tomate su valor comercial. Por lo tanto, resulta importante describir los factores que intervienen en el proceso de deshidratado del tomate (Gómez M., 2009).

**1.4.5.1 Temperatura del Aire:** La temperatura desempeña un papel importante en los procesos de secado. Conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. La elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en consideración la especie que se vaya a someter al proceso. Andritsos et al., (2003) afirman que las temperaturas de secado de tomate ideales están entre 45 y 60 °C. Esto permite al producto retener sus nutrientes, incluyendo vitaminas y licopeno. Krokida et al., en el 2003 encontraron que la temperatura es la variable más importante en el secado de tomate (Gómez M., 2009).

**1.4.5.2 Humedad relativa del aire:** La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Generalmente, este valor se expresa como porcentaje (%). A medida que aumenta la temperatura del aire, también aumenta su capacidad de absorción de humedad; cuando la temperatura disminuye sucede lo contrario (Gómez M., 2009).

**1.4.5.3 Velocidad del aire:** La velocidad del aire dentro del secador tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el alimento facilitando su evaporación. En segundo lugar, ayuda a transportar la humedad saliente del material (Gómez M., 2009).

La velocidad de secado aumenta a medida que incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento (Foust, 1990). A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado (Gómez M., 2009).

El deshidratado a nivel industrial se lleva a cabo empleando velocidades de aire entre 1.5 y 2.5 m/s.

**1.4.5.4 El agua en los alimentos:** La cantidad de agua en un alimento define sus propiedades reológicas, sensoriales y susceptibilidad a las alteraciones por reacciones. El contenido de humedad en un alimento se refiere a toda el agua que este tiene. Un alimento puede expresarse en base húmeda o base seca. La humedad de un alimento

es retenida en dos formas, como agua libre o agua “ligada”. El agua ligada ejerce una presión de vapor de equilibrio menor que la del agua libre a la misma temperatura.

La humedad en forma de agua libre podría ser retenida por los capilares finos, o adsorbida dentro de una célula o paredes fibrosas o por combinación física/química con el sólido. El agua libre ejerce una presión de vapor de equilibrio igual a la del agua pura a la misma temperatura. La humedad en forma de agua libre está retenida en los espacios vacíos de los alimentos sólidos (Gómez M., 2009).

Algunos autores han reportado valores del contenido de agua de alrededor del 94% en diversas variedades de tomate (Doymaz, 2005; Giovanelli et al., 2002; Zanoni et al., 1999; Rajkumar et al., 2007) (Gómez M., 2009).

**1.4.5.5 Pretratamientos:** En el secado de tomate los tiempos prolongados y las temperaturas altas ocasionan cambios adversos en la calidad final del producto, como son el oscurecimiento, pérdida de licopeno y ácido ascórbico, entre otros constituyentes. Para reducir estos efectos, se utilizan pretratamientos que consisten en soluciones de  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ , (Lewicki et al., 2001). En la industria del secado de tomate al sol, se emplea sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) como aditivo debido a sus múltiples funciones (Latapi et al., 2006):

1. Inhibir el oscurecimiento enzimático y no enzimático
2. Prevenir el deterioro oxidativo
3. Inhibir algunas enzimas como las proteasas, oxidasas y peroxidasas
4. Inhibir el oscurecimiento de bacterias y hongos.

El metabisulfito de sodio tiene propiedades análogas al sulfito de sodio, mientras que el  $\text{NaCl}$  y el  $\text{CaCl}_2$  solo ayudan a disminuir el oscurecimiento de las rebanadas de tomate deshidratado (Gómez M., 2009).

**1.4.5.6 Espesor del material a secar en la bandeja:** Es fundamental el espesor de capa del material. Conviene también separar partes gruesas (raíces o tallos) de finas

(flores) si es posible. Experimentalmente se ha determinado que para materiales pequeños, se debe esparcir el material en capas delgadas a razón de 3 o 4 Kg de material vegetal fresco por metro cuadrado (Gómez M., 2009).

**1.4.5.7 Humedad final exigida:** Depende de cada material e incluso del destino del mismo. Para los materiales comercializados secos el valor promedio es de 8 a 10% de humedad residual. Este factor es importante porque determina el tiempo del proceso de secado.

## 1.5 Métodos utilizados para la deshidratación de tomate

**1.5.1 Deshidratación solar:** La variante más común y económica de este método consiste en colocar el alimento sobre la tierra (acondicionada o alfombrada) o piso de concreto, quedando expuesto directamente al sol. Las ventajas de la deshidratación solar radican en los bajos costos de operación y en ser ecológicos y las desventajas de esta variante radican en la vulnerabilidad del alimento a contaminación por polvo, infestación por insectos y hongos, pérdidas por animales y baja calidad de los productos obtenidos (Biotecnia, 2012).

**Figura 1.2**

**Deshidratador solar**



Fuente: Félix Maocho, 2009.

**1.5.2 Deshidratación osmótica:** Este método consiste en colocar el producto en contacto con una solución de azúcar y/o sal, a la cual se le denomina solución osmótica, durante el proceso el contenido de agua en el tomate disminuye continuamente mientras el agente osmótico penetra en él. Tsamoet *al.* (2006) compararon la deshidratación de rodajas de tomate mediante soluciones saturadas de sal, azúcar y sal-azúcar por 20 h, encontrando que los tomates tratados con sal-azúcar presentan el menor contenido de humedad, seguido por los que se trataron con sal y azúcar respectivamente. La deshidratación osmótica tiene la ventaja de mantener de mejor manera las características organolépticas y nutricionales y la desventaja es que este método no tiene un gran rendimiento (Biotecnia, 2012).

**1.5.3 Deshidratado con microondas:** La aplicación de microondas genera un calentamiento interno y una presión de vapor dentro del producto que suavemente “bombea” la humedad hacia la superficie, reduciendo la resistencia interna del alimento al movimiento de agua causando su deshidratación. Este método de deshidratación se ha vuelto común, ya que previene la disminución de la calidad y asegura una distribución rápida y eficiente del calor en el alimento. La potencia de salida del microondas desempeña un papel fundamental en la deshidratación del tomate, al aumentar la potencia se disminuye el tiempo de secado. Las principales ventajas de este método es que el tiempo de secado se reduce y la calidad del tomate deshidratado es considerablemente buena y la desventaja es que para que este método sea eficiente debe combinarse con un pre tratamiento de deshidratación osmótica (Biotecnia, 2012).

**1.5.4 Deshidratado por liofilización:** La liofilización es un proceso en el que se congela el producto y posteriormente se introduce en una cámara de vacío para realizar la separación del agua por sublimación. De esta manera se elimina el agua desde el estado sólido al gaseoso del ambiente sin pasar por el estado líquido. El proceso de liofilización consta de tres etapas: (I) congelación previa. (II) Sublimación

de estos cristales que elimina el agua. En esta etapa tiene lugar el liofilizador. (III) Evaporación o Desorción del agua (Biotecnia, 2012).

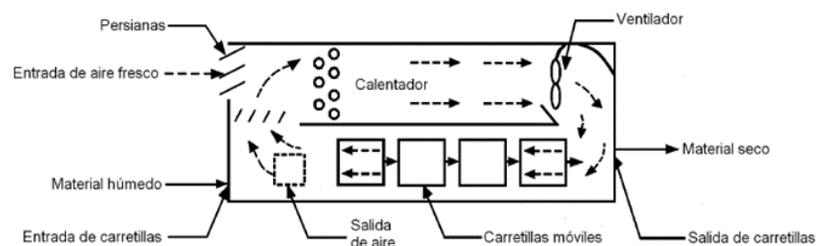
**1.5.5 Deshidratación en cámaras con aire caliente forzado:** El deshidratado con aire caliente es el método más común para secar productos alimenticios. En este método el aire caliente remueve el agua en estado libre de la superficie de los productos (Biotecnia, 2012).

El incremento en la velocidad del aire y la turbulencia generada alrededor del alimento provoca una reducción de la tensión en la capa de difusión, causando la deshidratación eficiente. La deshidratación mediante este método depende de la velocidad y temperatura del aire empleado, es común el uso de altas temperaturas, lo cual representa su principal desventaja, puesto que causa cambios drásticos en el sabor, color, contenido de nutrientes, componente aromáticos (Biotecnia, 2012).

El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente o en paralelo, pero generalmente la deshidratación con aire caliente a contracorriente es más eficiente que la que se logra con el flujo de aire en paralelo debido a que la transferencia de calor es más eficiente al existir un contacto más estrecho debido al movimiento en sentidos opuestos (Biotecnia, 2012).

**Figura 1.3**

**Representación esquemática de un secador de túnel de flujo de aire a contracorriente.**



Fuente: Gómez M., 2009.

### 1.5.5.1 Tipos de cámaras de secado con aire caliente forzado

En la siguiente tabla se muestra algunos tipos de secadores que se utilizan para el secado de alimentos a nivel industrial.

**Tabla 1.6**

**Tipos de secadores**

<b>Secadores</b>	<b>Productos</b>
Secador de Bandeja	Frutas, hortalizas.
Secador de Túnel	Frutas y legumbres.
Secador de Cinta Transportadora	Frutas.
Secadores Bajo Vacío	Frutas, concentrados y zumos.
Secador Continuo de tambor	Leche en polvo, legumbres, puré de batatas y plátano.
Secador por Pulverización	Leche en polvo.
Secador Neumático	Granos, harina, almidones.
Secador por Atomización	Café, huevo, zumo de fruta, té
Secadores de lecho Fluidizado	Legumbres, cereales, café, azúcar

Fuente: Cheftel, J.C. y Cheftel, H. (1983).

Dependiendo del proceso de secado existen diferentes tipos de secadores:

#### 1.5.5.1.1 Secadores continuos

- a) **Secador continuo de túnel:** Este tipo de secador está formado por un túnel por el cual pasan bandejas o carretillas con el material a secar, dentro del túnel, se

hace fluir aire caliente, el cual sirve para secar los sólidos. Este tipo de secador es típico de la industria alimenticia (Wikipedia - Secado de sólidos, 2014).

**Figura 1.4**

**Secador continuo de túnel**



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/elmetherm/tuneles-secado-58929-392415.html>, 2014.

- b) Secadores de cinta transportadora:** También llamados de cinta túnel, son secadores continuos con circulación de aire a través del material que se traslada por un transportador de cinta perforada. La cinta transportadora se desplaza a una velocidad fijada por el tiempo de secado; suele ser de malla metálica entrelazada o de lámina de acero perforada (Maupoey et al., 2001).

**Figura 1.5**

**Secador de cinta transportadora**



Fuente: <http://www.chinadrier.es/1-mesh-belt-dryer-5.html>, 2010.

### 1.5.5.1.2 Secadores discontinuos o por lotes

- a) **Secador de bandejas:** El secador de bandejas, consiste en un gabinete, de tamaño suficientemente grande para alojar los materiales a secar, en el cual se hace correr suficiente cantidad de aire caliente y seco. En general, el aire es calentado por vapor, pero no saturado, de modo que pueda arrastrar suficiente agua para un secado eficiente (Wikipedia - Secado de sólidos, 2014).

**Figura 1.6**

**Secador de bandejas**



Fuente:<http://spanish.alibaba.com/product-free/tray-driers-115675674.html>, 2014.

- b) **Secadores bajo vacío:** Los secadores al vacío permiten secar productos a muy baja temperatura, en ausencia de oxígeno y con posibilidad de recuperación del disolvente. Los secadores pueden ser estáticos, con el producto colocado dentro de bandejas sobre placas calientes.

Los secadores al vacío son adecuados para gran variedad de productos en las industrias de química fina, química farmacéutica, cosmética y agroalimentaria: extractos de plantas medicinales, antibióticos, enzimas, productos cristalinos, colorantes, granulados de plástico, aditivos alimentarios, especias y condimentos, zumos de frutas, secado de productos que requieran un bajo contenido de humedad residual (SCT Pharma, 2014).

**Figura 1.7**

**Secador bajo vacío**



Fuente: <http://www.sctpharma.com/index.php/es/productos/estufas/50-estufas-de-secado-por-vacio>, 2014.

### **1.6 Selección del proceso de deshidratación.**

En la siguiente tabla puede verse la elección del proceso seleccionado de acuerdo a los parámetros de calidad del producto y el equipamiento disponible:

Tabla 1.7

**Ventajas, desventajas y viabilidad de los distintos procesos de deshidratación.**

Proceso	Viabilidad	Ventajas	Desventajas
Deshidratación solar	Viable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajos costos de operación.</li> <li>- Ecológico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vulnerabilidad a contaminación, infestación por insectos y hongos.</li> <li>- Bajo rendimiento.</li> <li>- Sujeto a los fenómenos climatológicos y los rayos UV.</li> </ul>
Deshidratación en cámaras con aire caliente forzado	Viable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Buena calidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios drásticos en las propiedades organolépticas y nutricionales.</li> </ul>
Deshidratación osmótica	Viable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No causa grandes cambios en las propiedades organolépticas y nutricionales.</li> <li>-Costo de inversión bajo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No tiene gran rendimiento.</li> </ul>
Deshidratado con microondas	No es viable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Previene la disminución de la calidad del producto.</li> <li>- Distribución rápida y eficiente del calor en el alimento.</li> <li>- Tiempo de secado corto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajo rendimiento.</li> <li>- Costo de inversión alto.</li> </ul>
Deshidratado por liofilización	No es viable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No causa grandes cambios en las propiedades organolépticas y dietéticas.</li> <li>- No necesita aditivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La energía térmica facilita las reacciones químicas en el alimento.</li> <li>- Costo de inversión alto.</li> </ul>

Fuente: Biotecnia, 2012.

Mediante el cuadro de selección y tomando en cuenta las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de deshidratación se ve conveniente el uso de la deshidratación con aire caliente forzado para la elaboración de tomate deshidratado. Sin embargo se debe tomar en cuenta que las propiedades del tomate no se vean afectadas.

### **1.7 Selección del secador para el proceso.**

Debido a su fácil uso, su utilización para el secado de frutas y verduras y su disponibilidad se ha seleccionado el secador de bandejas para la elaboración de tomate deshidratado.

### **1.8 Secador de bandejas.**

Este tipo de secador se caracteriza por tener una o más cámaras o compartimientos donde se ubican las bandejas que contienen el material a secar. Interiormente pueden estar provistos de un ventilador para circular aire a través de un calentador; el aire caliente sale por una rejilla de láminas ajustables.

Generalmente las bandejas se colocan sobre bastidores que pueden moverse como unidades para colocarlos en la cámara o ser retirados de ella. Estos secadores pueden disponer de reguladores para controlar la velocidad de aire nuevo y la cantidad de aire de recirculación. Los calentadores del aire pueden ser directos como los quemadores de gas, o indirectos como serpentines a vapor, intercambiadores o resistencias eléctricas (Herbotecnia, 2011).

El alimento que se va a secar se coloca en capas delgadas de 1 a 6cm de espesor por bandeja. El aire se calienta y circula entre las bandejas en flujo transversal o en flujo a través de bandejas perforadas, es decir, perpendicular al plano de ellas; parte del aire se recircula para un mejor aprovechamiento a costa de algo de la eficiencia de secado.

Cada bastidor, lugar donde se colocan las bandejas, lleva un número de bandejas poco profundas, por ejemplo 75 cm de lado y de 10 a 15 cm de profundidad, que se carga con el material que ha de secarse. Se hace circular aire caliente con velocidad de 2 a 5

m/s entre las bandejas. En ellos se puede secar prácticamente cualquier material, pero a causa del trabajo requerido para la carga y descarga de las bandejas, su operación resulta costosa (McCabe, Smith, Harriott, 1990).

La principal ventaja del uso de secadores de bandejas, es que el grado de eliminación de la humedad puede llegar a ser muy alto, frente al secado mecánico por compresión, que frecuentemente necesita de un posterior secado térmico.

La limpieza es fácil, reduciéndose a veces a lavar las bandejas fuera del secador, y en casos de necesidad, es fácil construirlas de materiales resistentes a la corrosión (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

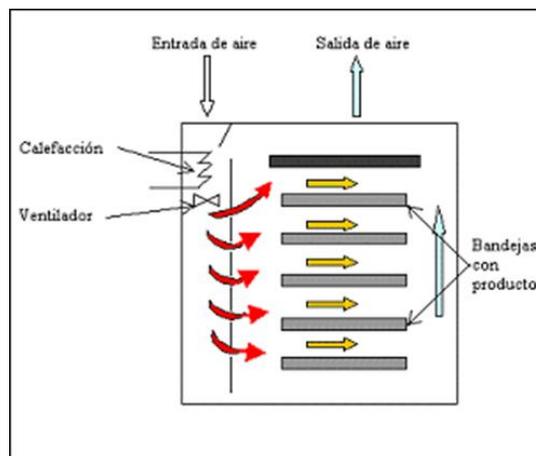
### 1.8.1 Partes de un secador

Los sistemas de secado están constituidos por las siguientes secciones:

- Cámara de acondicionamiento de aire.
- Cámara de secado.
- Ventilador.

**Figura 1.8**

#### **Partes de un secador de bandejas**



Fuente: Reinoso B., Edgar S., 2006.

### **1.8.1.1 Cámara de acondicionamiento de aire**

Es la sección en la cual se provee al aire de las características necesarias e idóneas para el secado. La cámara de acondicionamiento del aire está formada principalmente por:

- **Intercambiador de calor;** este elemento está encargado de proporcionar la variación de temperatura que debe sufrir el aire para ser considerado en el secado.
- **Fuente de energía;** es la que proporciona la energía necesaria para que el secado pueda obtenerse por varios métodos, la selección de ésta es importante cuando se habla de los costos de operaciones. Se diferencia tres tipos de fuentes de energía para la obtención del calor necesario para el secado, que son: solar, combustión y resistencias eléctricas (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

### **1.8.1.2 Cámara de Secado**

Es donde se realiza el secado, en esta área es extraída la cantidad suficiente de agua del producto para su posterior almacenamiento. En este espacio físico se debe mantener una temperatura, humedad relativa y velocidad de aire constante, adecuadas para el secado (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

### **1.8.1.3 Ventilador**

Este dispositivo es el encargado de proveer el aire con velocidad suficiente para disminuir el porcentaje de humedad en la materia presente en la cámara de secado (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

## **1.9 Fundamentos del proceso de secado**

La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido por conversión en vapor, que se separa del sólido en la práctica, la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor (Nonhebel G. y Moss A., 1991).

El proceso de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación a la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor ejercida por la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa (Contreras Velásquez, L. M., 2012).

Cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos, que son:

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

### 1.9.1 Transferencia de calor

La transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas, ésta se produce predominantemente por conducción (en secadores indirectos en los cuales el material se seca a través de una pared) y por convección (en secadores directos donde el material es secado por una corriente que pasa a través del material) (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

#### 1.9.1.1 Transferencia de calor por convección

En este caso el sólido húmedo se seca al pasar sobre o través del mismo una corriente de gas caliente. El gas caliente sirve para transferir calor al sólido y para eliminar el vapor formado.

El modelo para este fenómeno está dado por:

$$Q = h_c (T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec.: 1.1})$$

$Q$ : flujo de calor por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$h_c$ : coeficiente de transferencia de calor por convección ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$T_s$ : temperatura de la superficie (K)

$T_{\infty}$ : temperatura de la corriente libre (K)

### 1.9.1.2 Transferencia de calor por conducción

En este caso el sólido húmedo se sitúa en un recipiente calentado externamente, que tiene una salida para eliminar vapor; frecuentemente se mantiene el recipiente a presión reducida con el objeto de aumentar la fuerza impulsora térmica.

Según Guachamín Velásquez, C. D. (2012), la ecuación que obedece a este modo de transferencia está dada por:

$$Q = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec.:1.2})$$

$k$ : coeficiente de transferencia de calor por conducción (W/m·K)

$dT/dx$ : gradiente de temperatura en la dirección  $x$

## 1.9.2 Transferencia de masa

La transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado durante el proceso de secado depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a externas.

**1.9.2.1 Condiciones externas:** Están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas, y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del gas, tales como la temperatura, humedad, flujo de aire, área de la superficie expuesta y presión, y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido. Estas condiciones son importantes durante las etapas iniciales de secado cuando la humedad de la superficie está siendo removida (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

**1.9.2.2 Condiciones internas:** Se refiere a la transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido. El movimiento de humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física dentro del sólido, de la temperatura y del contenido de humedad siendo cualquiera de éstos el factor que puede determinar la velocidad de secado. La migración de humedad desde adentro hacia la superficie ocurre a través de uno o más mecanismos, normalmente: difusión, flujo capilar y presión interna causada por el encogimiento durante el secado (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del gas, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido (Contreras Velásquez, L. M., 2012).

Para expresar la cantidad de agua que contiene el sólido a secar, es conveniente definir ciertos parámetros como: el contenido de humedad en base seca y el contenido de humedad en base húmeda. Para ello se considera, que el sólido está formado por una parte completamente seca llamada masa seca más una cierta cantidad de agua (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

**1.9.2.3 Contenido de humedad en base seca o base húmeda:** El contenido de humedad en un alimento puede representarse a base de masa húmeda o masa seca de producto. El contenido de humedad en base húmeda:

$$X_{húmeda} = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa inicial del producto húmedo}}$$

$$= (\text{kg de agua/kg de alimento})$$

Contenido de humedad en base seca:

$$X_{seca} = \frac{\text{masa de humedad}}{\text{masa de materia seca}}$$

$$= (\text{kg de agua/kg de materia seca})$$

**1.9.2.4 Humedad de equilibrio:** Cuando un sólido húmedo se pone en contacto, durante tiempo suficiente, con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes (suponiendo que la cantidad de aire es lo suficientemente grande para que sus condiciones no varíen con el tiempo de contacto) se alcanzarán con las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo.

Se alcanzan las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire (Ocon J. y Tojo G., 1980).

**1.9.2.5 Humedad libre:** se denomina humedad libre de un sólido con respecto al aire en condiciones determinadas, a la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio con el aire en las condiciones dadas. Por consiguiente, es la humedad que puede perder el sólido después de un contacto suficientemente prolongado con aire en condiciones dadas y constantes, y depende tanto de la humedad del sólido como de la humedad relativa del aire (Ocon J. y Tojo G., 1980).

### 1.9.3 Cinética del secado

Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial  $(-dX/d\theta)$  operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo (Ocon J. y Tojo G., 1980).

Analíticamente, la velocidad de secado se refiere a la unidad de área de superficie de secado, de acuerdo con la ecuación:

$$W = \frac{SS}{A} - \frac{dX}{d\theta} \quad (\text{Ec.: 1.3})$$

Siendo: SS = masa de sólido seco

A = Área de la superficie expuesta.

$W$  = Velocidad de secado.

$dX$  = Variación de la humedad.

$d\Theta$  = diferencial de tiempo.

### 1.9.3.1 Periodos de secado

En las experiencias de secado, al representar la humedad del sólido frente al tiempo, operando en condiciones constantes de secado y circulando el aire sobre el objeto a secar, se obtienen curvas de secado en las que puede observarse que al principio la humedad del sólido disminuye linealmente con el tiempo de secado, o lo que es lo mismo durante este periodo la velocidad de secado ( $-dX/d\Theta$ ) permanece constante. Se efectúa el secado a esta velocidad hasta que la humedad del sólido alcanza un valor crítico, a partir del cual la velocidad de secado disminuye, anulándose cuando la humedad del sólido alcanza el valor de equilibrio con el aire en las condiciones constantes de operación, es decir cuando la humedad libre es cero.

El periodo de velocidad constante va desde la humedad inicial  $X_0$  ( $H_i$ ) hasta la humedad crítica  $X_c$ . El valor de la humedad crítica depende de las condiciones del aire de secado del espesor del material a secar.

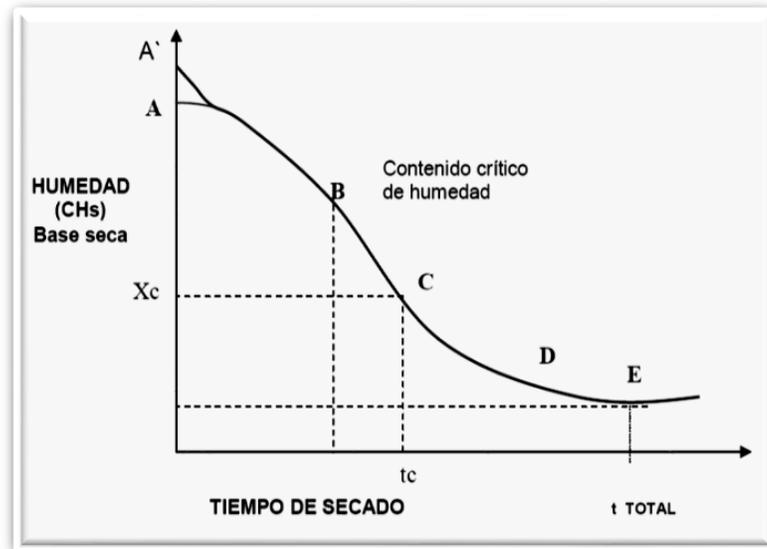
El periodo de velocidad decreciente se extiende desde la humedad crítica  $X_c$  hasta la humedad final del sólido  $X_f$  ( $H_f$ ) cuyo valor límite es  $X^*$  (Humedad límite).

### 1.9.3.2 Curvas de secado

La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso, es decir, que la eliminación de agua se realiza en una serie de etapas en la que la velocidad de secado es diferente. Generalmente la forma de las curvas es complicada y deben obtenerse experimentalmente a nivel de laboratorio (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

En la figura 1.9 se muestran las distintas fases dentro de una curva de régimen de secado:

**Figura 1.9**  
**Curva de régimen de secado**



Fuente: Reinoso B., Edgar S., 2006.

A partir de las curvas de secado se puede tener una idea del tiempo de secado, del consumo de energía, del mecanismo de migración o extracción de humedad, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa, y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables del proceso tales como: temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc.

La curva de secado mostrada anteriormente presenta los siguientes períodos:

- **Período de inducción inicial (etapa A-B):** Es una etapa de calentamiento (o enfriamiento) inicial del sólido normalmente de poca duración. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo del gas (Contreras Velásquez, L. M., 2012).
- **Período de Velocidad Constante (etapa B-C):** Durante este periodo la velocidad con que se elimina agua de la superficie del producto es igual a la velocidad con que llega desde el interior del mismo; de esta manera la

velocidad de secado permanece constante. La transferencia de calor se da por el mecanismo de convección, por lo que en la interface la temperatura de la superficie del sólido es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire ( $T_{sup.} = T_{bh}$ ).

Este periodo está comprendido desde el contenido de humedad inicial hasta que el producto alcanza el contenido de humedad crítica, punto en el cual la velocidad de secado comienza a disminuir debido a que el agua se evapora desde el interior del alimento. En realidad, la velocidad de secado es la evaporación del agua, que representa la transferencia de materia y además es proporcional a la transferencia de calor (flujo de calor) (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

- **Período de Velocidad decreciente (etapa C-E):** En este periodo, la velocidad de secado depende del contenido de humedad del sólido; abarca desde el punto de la humedad crítica hasta el punto final de secado, es decir, hasta alcanzar la humedad de equilibrio del producto para las condiciones del aire de secado (Guachamín Velásquez, C. D., 2012).

#### 1.9.4 Tiempo de secado

Es la duración del secado en condiciones constantes. Puede calcularse la duración del secado por integración entre las humedades inicial y final. A partir de la ecuación 1.3 se obtiene:

$$\theta = \frac{SS}{A} \int_{X_i}^{X_f} \frac{dX}{W} \quad (\text{Ec.: 1.4})$$

Para calcular esta integral es necesario conocer  $W = f(X)$ , donde  $W$  representa la velocidad de secado y, en general, hemos de distinguir dos periodos:

- a) Periodo antecrítico: Como durante este periodo  $W$  permanece constante, la integración de la ecuación desde la humedad inicial  $X_i$  hasta la humedad  $X_c$  nos lleva a:

$$\theta_a = \frac{SS}{A} \frac{X_i - X_c}{W_a} \quad (\text{Ec.: 1.5})$$

Donde  $W_a$  es la velocidad de secado en el periodo anticrítico.

Naturalmente que si la humedad final  $X_f$  es mayor que la humedad crítica ha de sustituirse  $X_c$  por  $X_f$  en la ecuación.

- b) Periodo Postcrítico: Si la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, desde la humedad crítica hasta la final, la integración de la ecuación conduce a la expresión:

$$\theta_p = \frac{SS}{A} \frac{X_c - X_f}{W_p} \quad (\text{Ec.: 1.6})$$

Donde  $W_p$  es la velocidad de secado en el periodo postcrítico.

Si no se conoce la forma en que varía la velocidad de secado en este periodo se puede obtener una expresión aproximada suponiendo que la variación es lineal desde la humedad crítica hasta la de equilibrio. Admitiendo esta hipótesis se llega a la expresión siguiente:

$$\theta_p = \frac{SS}{A} \frac{X_c - X^*}{W_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_f - X^*} \quad (\text{Ec.: 1.7})$$

Donde  $W_c$  es la velocidad en el punto crítico.

En las ecuaciones se supone que la humedad inicial es mayor que la crítica; en caso contrario, ha de sustituirse  $X_c$  por  $X_f$ .

### 1.10 Requerimientos del tomate como materia prima

Se usará el fruto fresco, sano, limpio, con un grado de madurez apropiado, entero o fraccionado, con o sin escarpio o semilla. Según el Art 879, del código alimentario argentino, la fruta a desecar debe ser cosechada cuando haya llegado al máximo de su

tamaño, de su contenido sacarino y cuando estén bien desarrollados el color y aroma de la variedad (Mujica M. F., 2004)

Queda prohibido desecar frutas de descarte, de tamaño muy pequeño, enfermas, golpeadas, dañadas por cualquier otro motivo o insuficientemente maduras. Los frutos deberán ser libres de sales arsenicales o de cualquier producto empleado como insecticida o fungicida, exceptuando los tratamientos permitidos (Mujica M. F., 2004).

Características organolépticas de la materia prima:

- Color: rojo anaranjado en su punto óptimo de recolección.
- Apariencia: fruto con forma oblongada de unos 50-80 mm de longitud y 40-55 mm de diámetro, con piel fina de superficie lisa.
- Aroma: intenso, característico de la variedad.
- Sabor: intenso, dulce y ligeramente ácido.

### **1.11 Proceso de deshidratación de tomate**

La figura 1.10, mostrada a continuación, será usada como base para el proceso de elaboración de tomate deshidratado; cabe mencionar que de acuerdo a las condiciones externas y el factor económico se realizarán los cambios pertinentes para el presente trabajo.

A continuación se muestra el diagrama de bloques para el proceso de deshidratación del tomate según Mujica María Fernanda en su trabajo *Elaboración de tomate seco en la provincia San Juan, Argentina*:

**Figura 1.10**

**Diagrama de flujo para la elaboración de tomate deshidratado (Elaboración de tomate seco en la provincia San Juan, Argentina)**



Fuente: Mujica M. F., 2014

## 1.12 Requerimientos de calidad para el tomate deshidratado

Son parámetros de buena calidad:

### 1.12.1 Características organolépticas

Color: rojo intenso, debe ser similar al del fruto fresco.

Forma: regular, sin roturas o deformaciones.

Aroma: típico, sin olor a pasado.

Sabor: típico a tomate.

Materias extrañas: libre en la medida que lo permiten los medios técnicos existentes hoy día.

### 1.12.2 Características químicas

Humedad: 6,5 – 10 %

Aditivos: ninguno

### 1.12.3 Características microbiológicas (en u.f.c./g)

**Tabla 1.8**

**Características microbiológicas del tomate deshidratado**

Recuento total en placa	≤ 100.000
Coliformes	≤ 200
E. Coli (1g)	≤ 10
Levaduras	≤ 500
Mohos	≤ 500

Fuente: Vegenat, 2009.

La actividad microbiana en los productos deshidratados tiene directa relación con la actividad del agua en dichos productos.

Las frutas desecadas a 25% de humedad tienen una actividad de agua aproximado a 0,79 donde solo pueden proliferar mohos y más dificultosamente levaduras.

Las hortalizas deshidratadas a 7% de humedad tienen una actividad aproximada de 0,35 donde no hay actividad de microorganismo y casi todas las reacciones de deterioro están minimizadas.

A continuación se muestra una tabla mostrando el crecimiento microbiano con la actividad del agua.

**Tabla 1.9**  
**Actividad del agua y crecimiento microbiano**

<b>Aw</b>	<b>Crecimiento de microorganismos</b>
0.95	Salmonella sp.
0.95	Clostridium botulinum
0.96	Escherichia coli
0.86	Staphylococcus aureus
0.95	Bacillus subtilis

Fuente: Vegenat, 2009.

A continuación se muestra una tabla agrupando la mayoría de los alimentos por su actividad de agua.

Tabla 1.10

## Crecimiento microbiano en diferentes alimentos por su actividad de agua

Valor de Aw	Alimento comprometido	Población observada y vida útil
Aw mayor de 0,98	Frutas y Hortalizas frescos. Conservas de Frutas y Hortalizas. Carnes y Pescado fresco. Leche fluida.	Sin impedimento crecen todo tipo de microorganismos que causan alteraciones o toxoinfecciones.  MUY PERECEDEROS.
Aw entre 0,98 y 0,93	Concentrado de tomate. Frutas en almibar. Ciruelas en fresco. Embutido no secos. Embutidos cocidos. Quesos poco madurados. Leche evaporada. Pan.	Todos los microorganismos que causan toxo-infecciones, se restringe la multiplicación a levaduras y mohos. PERECEDEROS.
Aw entre 0,93 y 0,85	Embutidos - Cecinas. Jamón tipo serrano. Leche condensada.	Mohos patógenos que secretan micotoxinas. Se cita Staphylococcus aureus.  PERECEDEROS.
Aw entre 0,85 y 0,60	Frutas secas. Cereales. Nueces. Confituras y Mermeladas. Pescado salado. Extracto de carne. Quesos madurados.	No hay bacterias patógenas.  La alteración, si ocurre, es por microorganismos xerófilos, halófilos y osmófilos. POCO PERECEDEROS SEGUN CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO.
Aw inferior a 0,60	Hortalizas deshidratadas. Dulces. Chocolate. Miel. Fideos. Galletas. Leche en polvo.	No hay multiplicación de microorganismos pero pueden mantenerse vivos largos periodos de tiempo  POCO PERECEDEROS, SEGUN LAS CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO.

Fuente: Vegemat, 2009.

#### 1.12.4 Características de empaque y embalaje

Envase: Bolsa de polietileno de uso alimentario de 80 micrones de grosor o más.

Embalaje: Caja de cartón / Saco de papel multicapa

El lote es etiquetado con el nombre, peso neto, lote y fecha de consumo preferente.

**CAPÍTULO II**  
**PARTE EXPERIMENTAL**

## **2.1 Materia prima**

La materia prima utilizada en la presente investigación es tomate, el cual es ampliamente producido en el departamento de Tarija por su demanda e importancia comercial. Según la CAT (Cámara Agropecuaria de Tarija) la producción de tomate en Tarija el año 2013 superó las 7 toneladas.

### **2.1.1 Variedades de tomate**

Más de 60 variedades diferentes de tomate se comercializan actualmente a lo largo y ancho del planeta. De ese más de medio centenar de variedades comerciales en el presente trabajo se estudiará dos variedades, las cuales son cultivadas en la ciudad de Tarija, y serán descritas para la seleccionar la variedad más apropiada para el proceso de deshidratación.

**2.1.1.1 Tomate Río Grande:** Más conocido en la ciudad de Tarija como tomate “perita”, presenta una forma ovalada y con un intenso color rojo, y de piel fina y lisa y pulpa consistente. Es un tomate con menor cantidad de humedad interna, lo que los hacen una variedad que tiene gran aceptación en la industria conservera, siendo así ideales para hacer con ellos tomates secos (El Huerto 2.0, 2011).

**Figura 2.1**

**Tomate Río grande (Perita)**



Fuente: El huerto 2.0, 2011.

**2.1.1.2 Tomate Bella Rosa:** Conocido en la ciudad de Tarija como tomate manzano, es de un color rojo brillante, casi esféricos y muy resistente a plagas y enfermedades. Es un tomate jugoso, muy productivo, quizá de sabor medio, pero el problema que presenta es su piel muy fina, con lo que los tomates se lesionan fácilmente al retirarlos de las plantas, por lo que la podredumbre actúa pronto sobre ellos (El huerto 2.0, 2010).

**Figura 2.2**

**Tomate Bella Rosa (Manzano)**



Fuente: El huerto 2.0, 2010

## **2.2 Selección de la materia prima**

La variedad seleccionada para la presente investigación es el tomate “perita” por constituir el 70% de la producción de tomate en el departamento de Tarija, según datos de la CAT.

### **2.2.1 Madurez**

Para la selección de la materia prima se debe tener en cuenta la madurez del tomate, siendo esto primordial para que el tomate deshidratado tenga buenas propiedades organolépticas, entre ellas: sabor, color y aroma.

Para identificar el estado de madurez del tomate destinado a la deshidratación se tomara en cuenta el color del mismo. Según la USDA (United States Department of Agriculture) la madurez del tomate se mide mediante una carta de color.

**Figura 2.3**

**Carta de color de la USDA para la madurez del tomate**

	<b>VERDE</b> Significa que la superficie del tomate es completamente verde en color. El tono verde puede variar de claro a oscuro.
	<b>ROMPIENTE</b> Significa que hay un cambio de color del verde a amarillo tenue, rosa o rojo, en no más del 10% de superficie.
	<b>CAMBIANTE</b> Significa que más del 10% pero no más del 30% de la superficie total, muestra un cambio definitivo en color de verde a Amarillo tenue, rosa o rojo o una combinación de estos.
	<b>ROSA</b> Significa que más del 30%, pero no más del 60% del total de la superficie, muestra un color rosa o rojo.
	<b>ROJO CLARO (Naranja)</b> Significa que más del 60%, pero menos del 90% de la superficie del tomate, muestra un color rosa o rojo.
	<b>ROJO</b> Significa que el tomate es rojo en más del 90% del total de su superficie.

Fuente: Gómez Gómez M., 2009

Es así que para el presente trabajo se tomará en cuenta el tomate “perita”, seleccionado manualmente, de un color rojo, con el fin de obtener un producto de mejor calidad.

### 2.2.2 Análisis fisicoquímico de la materia prima

Para determinar los parámetros fisicoquímicos del tomate “perita”, destinado a la deshidratación, se mandaron muestras al CEANID (Centro de Análisis de Investigación y Desarrollo), cuyos resultados mostraron lo siguiente:

**Tabla 2.1**

#### Propiedades fisicoquímicas del tomate “perita” fresco

<b>Análisis</b>	<b>Resultado</b>
Densidad	0,9525 g/ml
pH	4,48

Fuente: CEANID, 2014.

**Tabla 2.2**

#### Análisis fisicoquímico de tomate “perita” fresco

<b>Componente</b>	<b>Composición (%)</b>
Humedad	94,77
Proteína total	0,56
Materia grasa	0,20
Fibra	0,76
Cenizas	0,36
Hidratos de carbono	4,47

Fuente: CEANID, 2014.

Los resultados mostrados en las tablas anteriores fueron producto de un muestreo que se realizó en el mercado Campesino del departamento de Tarija, el cual fue llevado al CEANID para su análisis (ver Anexo A).

Además de los análisis mencionados se realizaron pruebas a la materia prima en el LOU (Laboratorio de Operaciones Unitarias), como:

### **2.2.3 Porcentaje de descarte para la deshidratación**

La metodología seguida para analizar las partes componentes a ser utilizadas y las que corresponden al porcentaje de descarte en el proceso, corresponde a la masa del tomate y la masa de semillas que será retirada del tomate, ya que la misma se considera un subproducto en el proceso. La masa de tomate sin semilla se denomina pulpa y los pesajes se realizaron en una balanza analítica (0,001 g de precisión).

Cuyas características son:

**Figura 2.4**

#### **Porcentaje de descarte en la elaboración de tomate deshidratado**



Fuente: Elaboración propia, 2015

Se realizaron dos análisis a la variedad “perita” considerando su nivel de madurez, los cuales se detallan en la tabla 2.3:

**Tabla 2.3**  
**Materia sólida en tomate “perita”**

<b>Variedad</b>	<b>Madurez</b>	<b>Masa con semilla (g)</b>	<b>Masa sin semilla (g)</b>	<b>Masa de la semilla (g)</b>	<b>Porcentaje de materia sólida (%)</b>
“Perita”	Rojo claro	142,457	124,041	18,416	87,07
	Rojo	155,160	129,232	25,928	83,29

Fuente: Elaboración propia, 2014

#### **2.2.4 Sólidos solubles totales**

Los sólidos solubles totales nos ayudan a determinar la concentración de azúcares totales de una solución; los sólidos solubles totales se determinan con el índice de refracción, el cual se expresa con los grados Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ).

Para el análisis de los grados Brix en el tomate perita, se utilizó el refractómetro digital; los resultados fueron:

**Tabla 2.4**  
**Sólidos solubles en tomate “perita”**

<b>Variedad</b>	<b>Madurez</b>	<b>Grados Brix</b>
“perita”	Rojo	4,7
	Rojo claro	3,9
	Cambiante	2,8

Fuente: Elaboración propia, 2014.

**Figura 2.5****Evaluación de sólidos solubles en tomate de diferente madurez**

Fuente: Elaboración propia, 2015.

**2.3 Diseño factorial**

El diseño factorial, como estructura de investigación, es la combinación de dos o más diseños simples (o unifactoriales); es decir, el diseño factorial requiere la manipulación simultánea de dos o más variables independientes (llamados factores), en un mismo experimento.

El diseño factorial para el secado de tomate, es de tres factores, a tres niveles cada uno de los factores, con dos repeticiones. Por lo tanto, se tendrá un número de experimentos de:

$$N^F = 3^2 = 9 * 2 \text{ repeticiones} = 18 \text{ experimentos}$$

Donde:

N: son los niveles

F: son los factores o variables

Las variables identificadas son las siguientes: la temperatura de secado dentro del secador, expresada en °C y la concentración de metabisulfito de sodio ( $\text{NaO}_5\text{S}_2$ ) para el pretratamiento, expresado en % de metabisulfito de sodio en la solución.

Los niveles de dichas variables se muestran en la tabla 2.5:

**Tabla 2.5**

**Niveles de las variables para la deshidratación de tomate**

<b>Nivel</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Concentración de metabisulfito de sodio (% de metabisulfito de sodio en la solución)</b>
<b>Inferior</b>	40	0,1
		1
		5
<b>Medio</b>	50	0,1
		1
		5
<b>Superior</b>	60	0,1
		1
		5

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 2.6 se muestran las combinaciones de las variables en sus dos niveles a realizar para cada una de las muestras:

Tabla 2.6

## Combinaciones de las variables de la deshidratación

N° Muestra	P <sub>ij</sub>	R <sub>ij</sub>	Respuesta I (t)	Respuesta II (t)	Respuesta III (Hf)	Respuesta IV (Hf)
1	1	-1	T <sub>11</sub> C <sub>11</sub>	T <sub>12</sub> C <sub>12</sub>	T' <sub>11</sub> C' <sub>11</sub>	T' <sub>12</sub> C' <sub>12</sub>
2	0	-1	T <sub>21</sub> C <sub>11</sub>	T <sub>22</sub> C <sub>12</sub>	T' <sub>21</sub> C' <sub>11</sub>	T' <sub>22</sub> C' <sub>12</sub>
3	-1	-1	T <sub>31</sub> C <sub>11</sub>	T <sub>32</sub> C <sub>12</sub>	T' <sub>31</sub> C' <sub>11</sub>	T' <sub>32</sub> C' <sub>12</sub>
4	1	0	T <sub>11</sub> C <sub>21</sub>	T <sub>12</sub> C <sub>22</sub>	T' <sub>11</sub> C' <sub>21</sub>	T' <sub>12</sub> C' <sub>22</sub>
5	0	0	T <sub>21</sub> C <sub>21</sub>	T <sub>22</sub> C <sub>22</sub>	T' <sub>21</sub> C' <sub>21</sub>	T' <sub>22</sub> C' <sub>22</sub>
6	-1	0	T <sub>31</sub> C <sub>21</sub>	T <sub>32</sub> C <sub>22</sub>	T' <sub>31</sub> C' <sub>21</sub>	T' <sub>32</sub> C' <sub>22</sub>
7	1	1	T <sub>11</sub> C <sub>31</sub>	T <sub>12</sub> C <sub>32</sub>	T' <sub>11</sub> C' <sub>31</sub>	T' <sub>12</sub> C' <sub>32</sub>
8	0	1	T <sub>21</sub> C <sub>31</sub>	T <sub>22</sub> C <sub>32</sub>	T' <sub>21</sub> C' <sub>31</sub>	T' <sub>22</sub> C' <sub>32</sub>
9	-1	1	T <sub>31</sub> C <sub>31</sub>	T <sub>32</sub> C <sub>32</sub>	T' <sub>31</sub> C' <sub>31</sub>	T' <sub>32</sub> C' <sub>32</sub>

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Donde:

i = Nivel

j = Repetición

T = Temperatura (°C)

C = Concentración (% de Metabisulfito de sodio en la solución)

t = tiempo de deshidratación (h), primer variable respuesta

Hf = Humedad final del producto (% de humedad), segunda variable respuesta

### Hipótesis Nula

$$H_0 = T_{11} = T_{21} = T_{31} = T_{12} = T_{22} = T_{32} = 0$$

$$H_0 = C_{11} = C_{21} = C_{31} = C_{12} = C_{22} = C_{32} = 0$$

$$H_0 = T_{11}C_{11} = T_{11}C_{21} = T_{11}C_{31} = T_{11}C_{12} = T_{11}C_{22} = T_{11}C_{32} = 0$$

$$T_{21}C_{11} = T_{21}C_{21} = T_{21}C_{31} = T_{21}C_{12} = T_{21}C_{22} = T_{21}C_{32} = 0$$

$$T_{31}C_{11} = T_{31}C_{21} = T_{31}C_{31} = T_{31}C_{12} = T_{31}C_{22} = T_{31}C_{32} = 0$$

$$T_{12}C_{11} = T_{12}C_{21} = T_{12}C_{31} = T_{12}C_{12} = T_{12}C_{22} = T_{12}C_{32} = 0$$

$$T_{22}C_{11} = T_{22}C_{21} = T_{22}C_{31} = T_{22}C_{12} = T_{22}C_{22} = T_{22}C_{32} = 0$$

$$T_{32}C_{11} = T_{32}C_{21} = T_{32}C_{31} = T_{32}C_{12} = T_{32}C_{22} = T_{32}C_{32} = 0$$

$$H'_0 = T'_{11} = T'_{21} = T'_{31} = T'_{12} = T'_{22} = T'_{32} = 0$$

$$H'_0 = C'_{11} = C'_{21} = C'_{31} = C'_{12} = C'_{22} = C'_{32} = 0$$

$$H'_0 = T'_{11}C'_{11} = T'_{11}C'_{21} = T'_{11}C'_{31} = T'_{11}C'_{12} = T'_{11}C'_{22} = T'_{11}C'_{32} = 0$$

$$T'_{21}C'_{11} = T'_{21}C'_{21} = T'_{21}C'_{31} = T'_{21}C'_{12} = T'_{21}C'_{22} = T'_{21}C'_{32} = 0$$

$$T'_{31}C'_{11} = T'_{31}C'_{21} = T'_{31}C'_{31} = T'_{31}C'_{12} = T'_{31}C'_{22} = T'_{31}C'_{32} = 0$$

$$T'_{12}C'_{11} = T'_{12}C'_{21} = T'_{12}C'_{31} = T'_{12}C'_{12} = T'_{12}C'_{22} = T'_{12}C'_{32} = 0$$

$$T'_{22}C'_{11} = T'_{22}C'_{21} = T'_{22}C'_{31} = T'_{22}C'_{12} = T'_{22}C'_{22} = T'_{22}C'_{32} = 0$$

$$T'_{32}C'_{11} = T'_{32}C'_{21} = T'_{32}C'_{31} = T'_{32}C'_{12} = T'_{32}C'_{22} = T'_{32}C'_{32} = 0$$

### Hipótesis Experimental

$H_1 = T_{11} \neq T_{21} \neq T_{31} \neq T_{12} \neq T_{22} \neq T_{32}$ , no todas las  $T_{ij}$  son 0.

$H_1 = C_{11} \neq C_{21} \neq C_{31} \neq C_{12} \neq C_{22} \neq C_{32}$ , no todas las  $C_{ij}$  son 0.

$H_1 = T_{11}C_{11} \neq T_{11}C_{21} \neq T_{11}C_{31} \neq T_{11}C_{12} \neq T_{11}C_{22} \neq T_{11}C_{32}$

$T_{21}C_{11} \neq T_{21}C_{21} \neq T_{21}C_{31} \neq T_{21}C_{12} \neq T_{21}C_{22} \neq T_{21}C_{32}$

$T_{31}C_{11} \neq T_{31}C_{21} \neq T_{31}C_{31} \neq T_{31}C_{12} \neq T_{31}C_{22} \neq T_{31}C_{32}$

$T_{12}C_{11} \neq T_{12}C_{21} \neq T_{12}C_{31} \neq T_{12}C_{12} \neq T_{12}C_{22} \neq T_{12}C_{32}$

$T_{22}C_{11} \neq T_{22}C_{21} \neq T_{22}C_{31} \neq T_{22}C_{12} \neq T_{22}C_{22} \neq T_{22}C_{32}$

$T_{32}C_{11} \neq T_{32}C_{21} \neq T_{32}C_{31} \neq T_{32}C_{12} \neq T_{32}C_{22} \neq T_{32}C_{32}$

No todas las interacciones  $T_{ij}C_{ij}$  son 0.

$H'_1 = T'_{11} \neq T'_{21} \neq T'_{31} \neq T'_{12} \neq T'_{22} \neq T'_{32}$ , no todas las  $T'_{ij}$  son 0.

$H'_1 = C'_{11} \neq C'_{21} \neq C'_{31} \neq C'_{12} \neq C'_{22} \neq C'_{32}$ , no todas las  $C'_{ij}$  son 0.

$H'_1 = T'_{11}C'_{11} \neq T'_{11}C'_{21} \neq T'_{11}C'_{31} \neq T'_{11}C'_{12} \neq T'_{11}C'_{22} \neq T'_{11}C'_{32}$

$T'_{21}C'_{11} \neq T'_{21}C'_{21} \neq T'_{21}C'_{31} \neq T'_{21}C'_{12} \neq T'_{21}C'_{22} \neq T'_{21}C'_{32}$

$T'_{31}C'_{11} \neq T'_{31}C'_{21} \neq T'_{31}C'_{31} \neq T'_{31}C'_{12} \neq T'_{31}C'_{22} \neq T'_{31}C'_{32}$

$T'_{12}C'_{11} \neq T'_{12}C'_{21} \neq T'_{12}C'_{31} \neq T'_{12}C'_{12} \neq T'_{12}C'_{22} \neq T'_{12}C'_{32}$

$T'_{22}C'_{11} \neq T'_{22}C'_{21} \neq T'_{22}C'_{31} \neq T'_{22}C'_{12} \neq T'_{22}C'_{22} \neq T'_{22}C'_{32}$

$T'_{32}C'_{11} \neq T'_{32}C'_{21} \neq T'_{32}C'_{31} \neq T'_{32}C'_{12} \neq T'_{32}C'_{22} \neq T'_{32}C'_{32}$

No todas las interacciones  $T'_{ij}C'_{ij}$  son 0.

**Hipótesis:** La temperatura y la concentración de metabisulfito de sodio en la solución influyen positivamente en el tiempo de deshidratación y humedad final del producto.

## **2.4 Equipos usados en la deshidratación de tomate**

Los equipos necesarios para el proceso de deshidratación de tomate son:

- Estufa Binder
- Balanza analítica
- Balanza de determinación de humedad
- Desecador
- Refractómetro
- Anemómetro digital

Las características e imágenes de los equipos mencionados se muestran en el anexo B.

## **2.5 Proceso de deshidratación del tomate a escala de laboratorio**

Como se mencionó en el capítulo I el proceso de deshidratación del presente trabajo se elaboró en base al diagrama de Mujica María Fernanda en su trabajo *Elaboración de tomate seco en la provincia San Juan, Argentina* (2014)

### **2.5.1 Selección de la materia prima**

La selección de la materia prima se realizó manualmente considerando que el tomate posea un color rojo en el 90% de su superficie total, lo que indica un grado de madurez óptimo, el cual además deberá tener un valor mayor a 4 °Brix para corroborar la madurez del mismo, físicamente el tomate no debe presentar indicios de golpes o cortaduras.

**Figura 2.6**  
**Materia prima**



Fuente: Elaboración propia, 2014

### **2.5.2 Lavado**

El lavado del tomate perita seleccionado para la deshidratación se lavó, mediante inmersión, con abundante agua potable para la eliminación de cualquier impureza que este presentara.

### **2.5.3 Ecurrirido del agua**

Tras el lavado se escurre el agua de la materia prima por unos dos minutos.

### **2.5.4 Rebanado**

El rebanado del tomate se realizó de manera manual procurando que cada rebanada de tomate tenga un espesor de más o menos 0,5 centímetros.

El corte de las rodajas se realizó de manera axial con la finalidad de favorecer la eliminación de semillas del mismo.

En el rebanado existe una pérdida de alrededor del 5% de la materia prima.

**Figura 2.7**

### Tomate rebanado de 0,5 cm.



Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se muestra en la figura, con la ayuda de una regla se puede constatar el espesor mencionado.

#### 2.5.5 Eliminación de semillas

Se eliminan las semillas de forma manual para proporcionar un mejor aspecto al producto final.

**Tabla 2.7**

#### Materia utilizable y descarte en la elaboración de tomate deshidratado

<b>Materia prima</b>	<b>Masa con semilla (g)</b>	<b>Masa sin semilla (g)</b>	<b>Masa de la semilla (g)</b>	<b>Porcentaje de masa de la semilla (%)</b>	<b>Porcentaje de materia prima utilizable (%)</b>
Tomate "perita"	155,160	129,232	25,928	16,710	83,29

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Estas semillas pueden ser utilizadas en la elaboración de abono orgánico para evitar su completo descarte, el cual se convierte en un tema abierto para posteriores trabajos de investigación.

### 2.5.6 Sulfitación

El tomate ya rebanado y sin semillas se sumerge en soluciones de agua y metabisulfito de sodio, variando las concentraciones del mismo y el tiempo de inmersión, con la finalidad de evitar el pardeamiento y eliminar posible contaminación del tomate en las anteriores etapas del proceso.

Las concentraciones y el tiempo de inmersión fueron escogidos en base a distintos trabajos relacionados con la elaboración de tomate deshidratado, dichos trabajos se mencionan en la bibliografía.

Las concentraciones y el tiempo de inmersión, para el proceso de elaboración de tomate deshidratado, se indican a continuación:

**Tabla 2.8**  
**Sulfitado de la materia prima**

<b>Concentración de la solución de metabisulfito de sodio (%)</b>	<b>Tiempo de inmersión (min)</b>	<b>Consumo de metabisulfito de sodio (g/kg de tomate fresco)</b>
5	5	0,2166
1	10	0,2832
0,1	15	0,06

Fuente: CEANID, 2014.

Para la valoración del consumo de metabisulfito de sodio, por kilogramo de tomate fresco, se procedió al análisis de anhídrido sulfuroso total presente en 3 distintas muestras, las cuales fueron tratadas a las diferentes concentraciones de metabisulfito

de sodio en la solución de pretratamiento del tomate (5, 1 y 0,1%), y por estequiometría llevadas a un valor de metabisulfito de sodio.

Los análisis fueron llevados a cabo en el CEANID y los resultados y cálculos estequiométricos se muestran en el anexo C; así mismo se describe la preparación de las soluciones.

**Figura 2.9**  
**Sulfitado de la materia prima**



Fuente: Elaboración propia, 2014.

### **2.5.7 Ecurrido**

Después de la inmersión en Metabisulfito de sodio la materia prima se escurre para eliminar rastros de la solución presente en la materia prima, para lo cual es necesario el uso de un colador.

### **2.5.8 Deshidratación del tomate mediante aire caliente forzado en una cámara de secado de bandejas**

El proceso de deshidratación de la materia prima se efectúa en una estufa Binder FD la cual posee un sistema de convección forzada para la eliminación de la humedad dentro de la cámara.

Para el proceso de deshidratación se tomará en cuenta tres diferentes temperaturas, las cuales se escogieron con referencia a diferentes trabajos relacionados a la elaboración de tomate deshidratado, los cuales se mencionan en el apartado 1.4.5.1.

Las temperaturas de secado para el presente trabajo son: 40, 50, 60° C

La velocidad del aire caliente dentro de la cámara de secado permanecerá constante para las 3 temperaturas y tendrá un valor de 1,5 m/s (medido con un anemómetro digital).

### **2.5.9 Enfriado**

El enfriado del tomate deshidratado se realizó en un desecador, a temperatura ambiente, usando como desecante sílica gel por un tiempo de alrededor 15 h. con la finalidad de que el producto obtenido no absorba humedad el ambiente antes de su envasado.

### **2.5.10 Envasado**

El envasado se realizó a vacío (laboratorio de alimentos dentro de la universidad), en bolsas de polietileno de 80 micrómetros de espesor.

### **2.5.11 Almacenado**

El almacenado de las muestras ya envasadas se realizó en un lugar fresco y seco.

## **2.6 Análisis del tomate deshidratado**

Para la evaluación del control de calidad del tomate deshidratado se realizara la evaluación sensorial, referido a caracteres organolépticos de las diferentes muestras de tomate deshidratado con la finalidad de reconocer la muestra con mejores resultados.

### **2.6.1 Evaluación sensorial**

Para realizar esta evaluación, se utilizó la prueba sensorial con 10 jueces conocedores del tema, los cuales evaluaron cada una de las muestras de acuerdo al Código Alimentario Argentino (2006), los parámetros sensoriales más importantes:

- **Aspecto:** deberá ser atractivo con un efecto apetecible y para ello se considerarán defectos las manchas oscuras, moteados, claridades, fallas en la pulpa, presencia de sustancias extrañas o presencia de zonas caramelizadas.
- **Color:** deberá responder a las características que resulten de apropiados sistemas tecnológicos de secado. En las frutas y hortalizas, el criterio para definir buena calidad, es que estas deben recordar a la materia prima fresca
- **Aroma:** el olor que emane, para ser considerado normal, deberá recordar lo más aproximadamente a la materia prima correspondiente a su estado fresco.
- **Sabor:** como en el caso anterior, el sabor debe recordar lo más aproximadamente posible a la materia prima original, teniendo en cuenta que la desecación produce una intensa concentración de la composición química original y que por otra parte hay sustancias volátiles que se pierden y otras que alteran sus gustos por procesos de caramelización moderada.
- **Consistencia:** en el caso de las frutas, deberá ser blanda, pastosa, plástica, de conformidad con el tenor hídrico máximo permitido en cada caso.

### 2.6.2 Examen higiénico-sanitario

La determinación de materias extrañas en frutas y hortalizas deshidratadas, pone de manifiesto otro atributo del grado de calidad del producto final y que está estrechamente vinculado con la calidad de las materias primas, los procesos tecnológicos llevados a cabo y el grado de precauciones realizadas durante la conservación.

Los exámenes más importantes son: determinación de humedad, determinación de anhídrido sulfuroso total y rehidratación.

### 2.6.3 Análisis fisicoquímico

La muestra de mayor aceptación de acuerdo a la evaluación sensorial y tomando en cuenta aspectos técnicos y económicos deberá ser analizada física y químicamente para demostrar la calidad de la misma.

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3.1 Resultados obtenidos en la parte experimental de la investigación

#### 3.1.1 Variación de la humedad del sólido con el tiempo

Para el cálculo de la humedad del sólido en cada intervalo de tiempo se hace uso de la siguiente ecuación:

$$H = \frac{m_i - ss}{m_i} * 100\% \quad (\text{Ec.: 3.1})$$

Donde:

$m_i$  es la masa inicial

$ss$  es la masa del sólido seco.

Por ejemplo:

Para el ensayo 1, a una temperatura de 40 °C y una concentración de Metabisulfito de sodio de 5%, el valor de la humedad para el tiempo inicial o  $t_0$  es

$$H = \frac{72,0893 - 4,5218}{4,5218} * 100\% = 93,73\%$$

Realizando este mismo procedimiento para todos los intervalos de tiempo y para todos los ensayos, se puede conocer la humedad inicial y final de todos los ensayos:

Tabla 3.1

**Ensayos realizados en la elaboración de tomate deshidratado**

<b>Ensayo</b>	<b>Concentración (% de metabisulfito de sodio en la solución)</b>	<b>Temperatura (° C)</b>
1	5	40
2	1	40
3	0,1	40
4	5	50
5	1	50
6	0,1	50
7	5	60
8	1	60
9	0,1	60

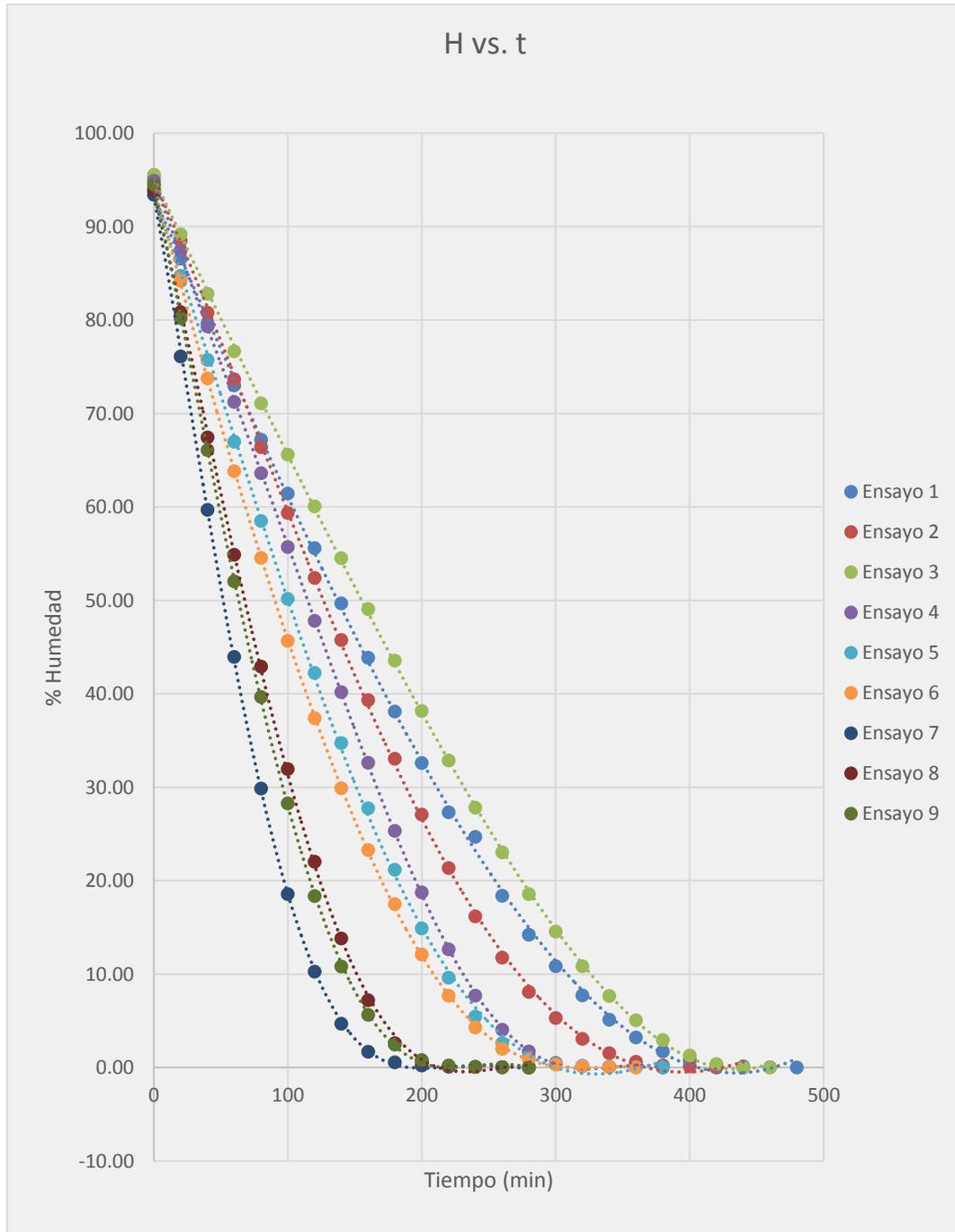
Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los resultados de los distintos ensayos se muestran en el anexo D.

Para un mejor análisis de la variación de la humedad con el tiempo, de las distintas muestras en la experimentación, se muestra a continuación la gráfica humedad versus tiempo (H vs. t) para todos los ensayos.

Figura 3.1

Variación de la humedad con el tiempo para los 9 ensayos



Fuente: Elaboración propia, 2015.

De la figura anterior se observa que cuando se sumergen las muestras en la solución de metabisulfito de sodio, las variables del tiempo y la concentración de la solución de inmersión no afectan en el incremento de la humedad inicial en las muestras, por tanto se puede afirmar que las muestras de tomate están saturadas y solo se produciría una impregnación del metabisulfito sobre la superficie de los mismos.

Se observa que a medida que la temperatura aumenta la pendiente de cada curva se incrementa, es decir que el tiempo de secado se hace menor. Para los ensayos realizados a una temperatura de 40 °C el tiempo total de secado se efectúa a los 480 minutos (8 h.), para los ensayos realizados a 50 °C el tiempo se reduce a 380 minutos (6,3 h.) y para los ensayos realizados a 60 °C el tiempo de secado es de 280 minutos (4,67 h.).

### 3.1.2 Contenido de humedad en base seca

El contenido de humedad de un sólido puede ser expresado en base seca o base húmeda; en los cálculos de secado es conveniente sugerir la humedad a base seca, debido a que la base de cálculo permanece constante a lo largo del fenómeno de secado.

Para el cálculo del contenido de la humedad en base seca se hace uso de la siguiente ecuación:

$$X = \frac{m_i - ss}{ss} \quad (\text{Ec.: 3.2})$$

Donde:

X es el contenido de humedad en base seca (Kg de agua / kg de sólido seco)

$m_i$  es la masa inicial

ss es la masa del sólido seco

Por ejemplo para el ensayo 1 para un tiempo 0 la masa inicial es de 0,0721 kg y la masa seca es de 0,0045 kg, por lo tanto el contenido de humedad es:

$$X = \frac{0,0721kg - 0,0045kg}{0,0045kg} = 15,0222 \text{ kg de agua kg de sólido seco}$$

Se realiza el mismo procedimiento para los demás ensayos en los distintos intervalos de tiempo.

**Tabla 3.2**

**Contenido de humedad en base seca para los distintos ensayos**

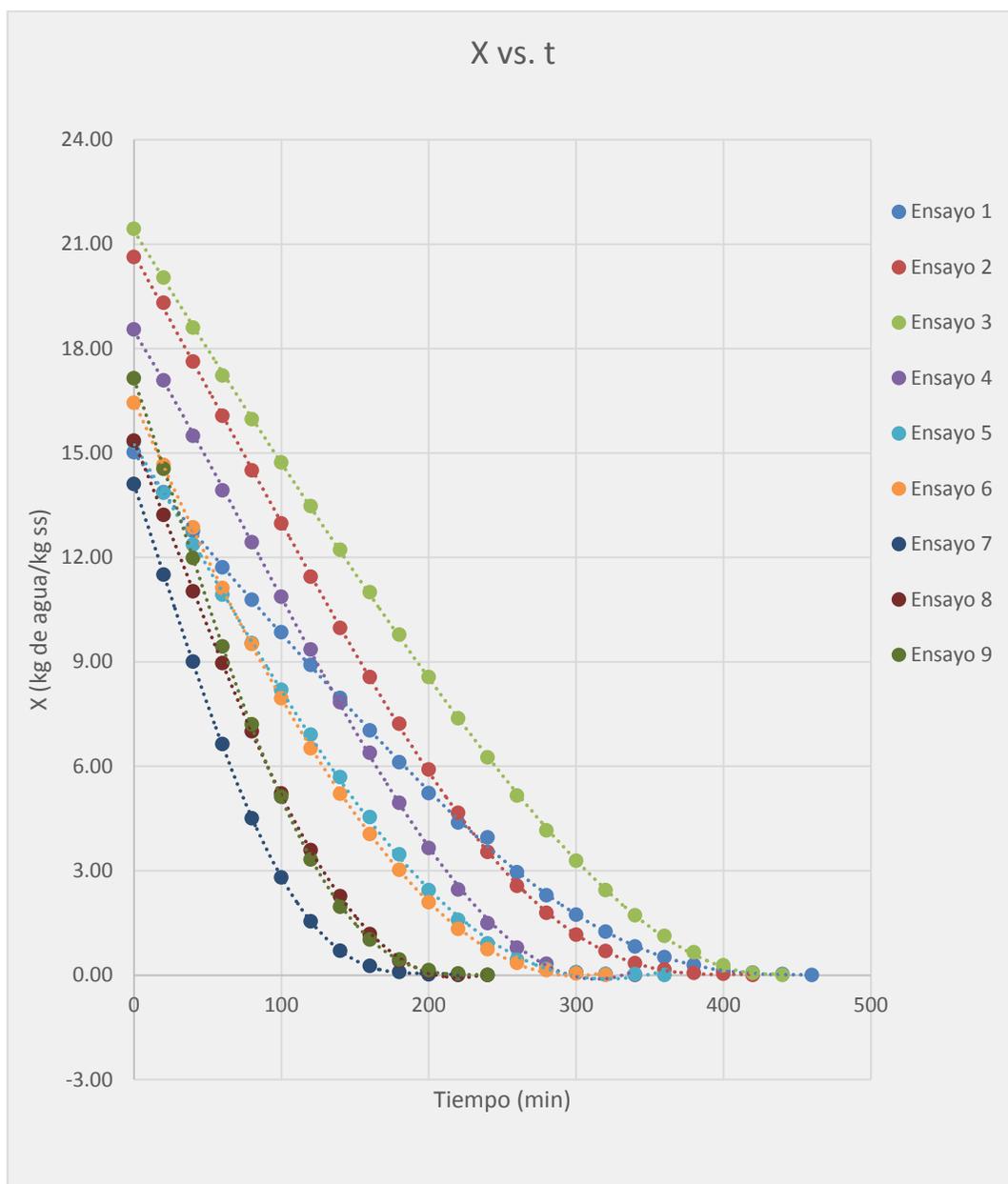
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6	Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9
<b>Tiempo (min)</b>	<b>X</b>								
0	15,0222	20,6250	21,4375	18,5405	15,3171	16,4419	14,1087	15,3478	17,1400
20	13,8667	19,3125	20,0313	17,0811	13,8537	14,6512	11,5000	13,2174	14,5400
40	12,7556	17,6250	18,5938	15,4865	12,3659	12,8605	9,0000	11,0217	11,9800
60	11,7111	16,0625	17,2188	13,9189	10,9268	11,1163	6,6304	8,9565	9,4400
80	10,7778	14,5000	15,9688	12,4324	9,5366	9,5116	4,5000	7,0000	7,2000
100	9,8444	12,9688	14,7188	10,8649	8,1951	7,9535	2,8043	5,2174	5,1200
120	8,9111	11,4375	13,4688	9,3514	6,9024	6,5116	1,5435	3,5870	3,3200
140	7,9556	9,9688	12,2187	7,8378	5,6829	5,2093	0,6956	2,2609	1,9600
160	7,0222	8,5625	11,0000	6,3784	4,5366	4,0465	0,2609	1,1739	1,0200
180	6,1111	7,2188	9,7813	4,9459	3,4634	3,0233	0,0870	0,4130	0,4400
200	5,2222	5,9063	8,5625	3,6486	2,4390	2,0930	0,0217	0,1087	0,1400
220	4,3778	4,6563	7,3750	2,4595	1,5854	1,3256	0,0000	0,0217	0,0400
240	3,9556	3,5313	6,2500	1,4865	0,9024	0,7442		0,0000	0,0000
260	2,9556	2,5625	5,1563	0,7838	0,4390	0,3488			
280	2,2889	1,7813	4,1563	0,3243	0,1707	0,1395			
300	1,7333	1,1563	3,2813	0,0811	0,0732	0,0465			
320	1,2444	0,6875	2,4375	0,0270	0,0244	0,0000			
340	0,8222	0,3438	1,7188	0,0000	0,0244				
360	0,5111	0,1563	1,1250		0,0000				
380	0,2889	0,0625	0,6563						
400	0,1333	0,0313	0,2813						
420	0,0667	0,0000	0,0625						
440	0,0222		0,0000						
460	0,0000								

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Para un mejor análisis del contenido de humedad en base seca a continuación se muestra la gráfica  $X$  vs.  $t$  para cada uno de los ensayos realizados:

**Figura 3.2**

**Contenido de humedad en base seca vs. tiempo ( $X$  vs.  $t$ )**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

De acuerdo a la gráfica anterior se puede concluir que el contenido de humedad en base seca es diferente en cada ensayo, lo cual indica que la misma es característica de cada muestra.

Las pendientes varían en cada uno de los ensayos de acuerdo a la temperatura de secado, a mayor temperatura menor será el tiempo de secado.

### **3.2 Cálculo de la cinética de secado**

Antes de entrar a los cálculos correspondientes en esta sección es necesario aclarar que diferentes autores recomiendan el uso del término “secado” en lugar del término “deshidratación”, ambos términos son sinónimos y hacen referencia a la operación unitaria mediante la cual se elimina la mayor parte de agua de los alimentos por evaporación, aplicando calor.

En el anexo E se ha calculado la cinética de secado para cada uno de los ensayos realizados, la misma que nos muestra que el ensayo N° 9, es el que presenta una mayor velocidad de secado en un tiempo menor, por cuanto la temperatura aplicada es también mayor y corresponde a 60°. Es importante también remarcar coincidentemente los resultados del análisis organoléptico y sensorial que se muestran más adelante, dan a este ensayo los mejores valores.

Por ello para el cálculo de la cinética de secado se mostrarán los datos del ensayo N° 9, ya que evaluando las condiciones económicas y de calidad (análisis sensorial) se ha optado este proceso como el de mejor aceptación.

Se define la velocidad de secado como la pérdida de humedad del sólido húmedo en una unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial ( $- dX/dt$ ) operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperaturas, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo (Ocon J. y Tojo G., 1980).

$$W = \frac{SS}{A} - \frac{dX}{dt} \quad (\text{Ec.: 3.3})$$

Donde:

SS = Masa de sólido seco, (kg)

A = Área de la superficie expuesta, (m<sup>2</sup>)

dX = Variación de la humedad.

dt = Diferencial de tiempo.

### 3.2.1 Método de los 3 puntos

Este es un método analítico empleado para encontrar la pendiente en los puntos de una curva, el cual basa su análisis en la agrupación de tres puntos equidistantes para determinar la pendiente en cada uno de ellos y así sucesivamente encontrar las pendientes en los distintos puntos equidistantes que se encuentran sobre una curva.

Para el calcular la cinética de secado por el método de los 3 puntos se hace uso de 3 ecuaciones fundamentales:

$$y'_0 = \frac{-3y_0 + 4y_1 - y_2}{2h} \quad (\text{Ec.: 3.4})$$

$$y'_1 = \frac{-y_0 + y_2}{2h} \quad (\text{Ec.: 3.5})$$

$$y'_2 = \frac{y_0 - 4y_1 + 3y_2}{2h} \quad (\text{Ec.: 3.6})$$

Donde:

$y_0$ ,  $y_1$  y  $y_2$  son datos obtenidos en el ensayo los cuales son representados por los distintos puntos de X para su cálculo.

h es la variación del tiempo expresado en minutos.

Para encontrar la función a través de la cual se encuentre una correlación de los datos que representa la variación de la humedad en función al tiempo se plantea un modelo potencial en el cual se relaciona la velocidad de secado con la humedad del sólido en una ecuación de la forma:

$$y = ax^n \quad (\text{Ec.: 3.7})$$

Para determinar la velocidad de secado en base a los datos de humedad vs. tiempo se toma como base que la pendiente del cambio de humedad es:

$$y = -\frac{dX}{dt} \quad (\text{Ec.: 3.8})$$

Obtenidos en las experiencias de laboratorio, se utilizó el método de los tres puntos, el mismo que sirve para encontrar la pendiente en cada uno de los puntos observados, por lo que para determinar la cinética de secado se plantea la ecuación:

$$y = -\frac{dX}{dt} = kX^n \quad (\text{Ec.: 3.9})$$

Donde:

k = Constante para la cinética

n = orden de la cinética

Antes de realizar los cálculos por el método de los tres puntos se debe aclarar que, de acuerdo a la figura 3.1, el ensayo N° 9 no se realizará en el tiempo indicado, ya que no es económicamente factible secar el tomate después del minuto 180, puesto que a partir de este tiempo y en una hora adicional solo se elimina el 2% de humedad de la muestra; por ello, se recomienda que el proceso de secado finalice en el minuto 180 (3 h), cuando la muestra tiene una humedad en base seca de 0,44 kg de agua/kg de ss.

Reemplazando datos en las ecuaciones (3.4, 3.5 y 3.6) con los datos del ensayo N° 9 ya mencionados anteriormente (tabla 3.2) se tiene:

Tabla 3.3

## Método de los 3 puntos

Tiempo (min)	X	Y' = dX/dt	y' media = -dX/dt	ln X	ln (y' media)
0	17,14	-7,861	7,861	2,841	2,062
20	14,54	-7,636	7,636	2,677	2,033
40	11,98	-7,781	7,781	2,483	2,052
60	9,44	-7,241	7,241	2,245	1,98
80	7,2	-6,571	6,571	1,974	1,883
100	5,12	-6,031	6,031	1,633	1,797
120	3,32	-4,845	4,845	1,2	1,578
140	1,96	-3,41	3,41	0,673	1,227
160	1,02	-2,175	2,175	0,02	0,777
180	0,44	-1,24	1,24	-0,821	0,215

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los demás cálculos correspondientes se encuentran en el anexo E.

Posteriormente, las pendientes deben correlacionarse con la variación de la humedad, linealizando la ecuación potencial planteada, de la siguiente forma:

$$\ln -\frac{dX}{dt} = \ln k + n \ln x$$

$$y = a + bx$$

Donde:

$$n = b$$

$$a = \ln k$$

$$\text{Donde } k = e^a$$

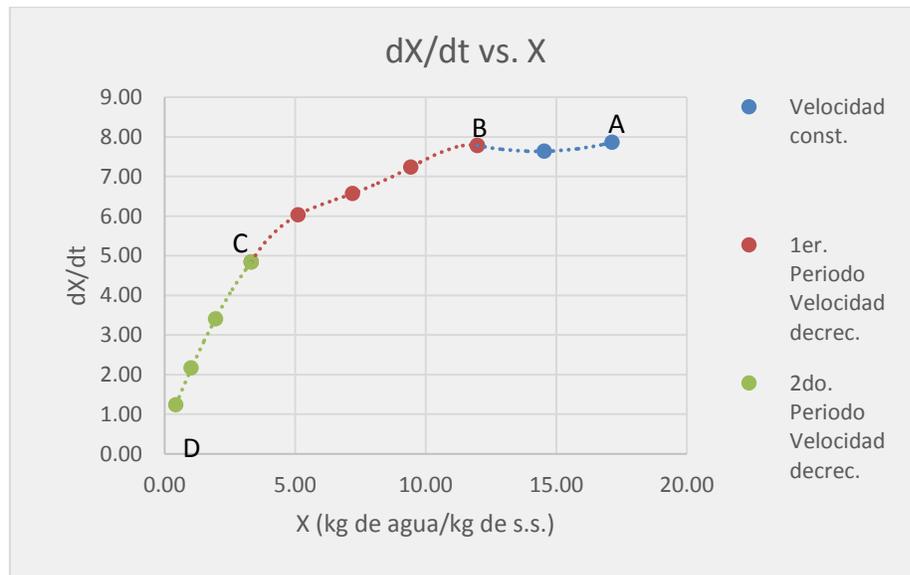
De donde se obtienen los datos de K y el orden n de la ecuación cinética.

$$-\frac{dX}{dt} = kX^n$$

Con los datos ya mencionados en la tabla 3.3 se procede a graficar la curva de secado con la iteración de datos,  $dX/dt$  vs.  $X$ , para identificar las distintas zonas dentro de la curva de secado.

**Figura 3.3**

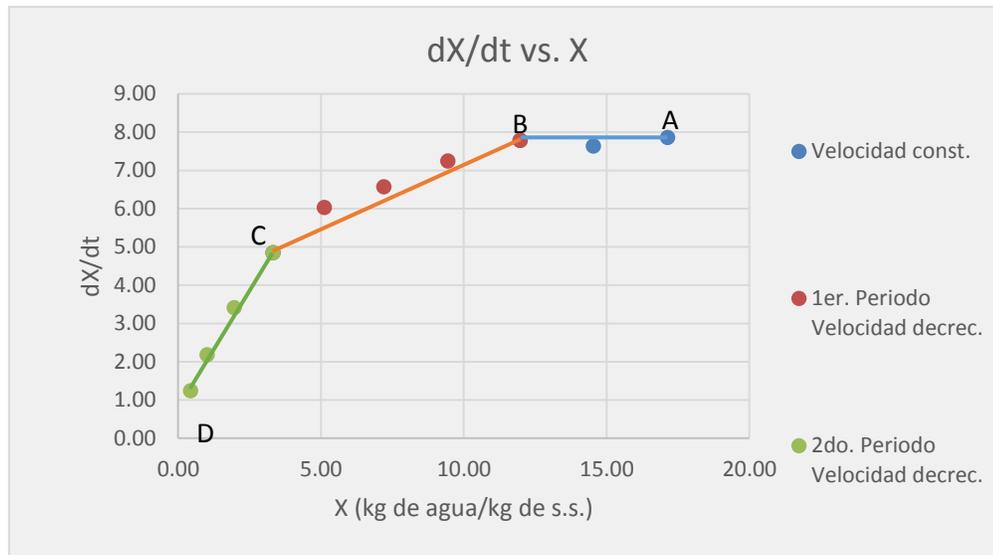
**Curva de secado con la iteración de datos  $dX/dt$  vs.  $X$**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

A continuación se muestra la misma gráfica  $dX/dt$  vs  $X$  con la curva ajustada al modelo.

Figura 3.4

Curva de secado con los datos ajustados al modelo  $dX/dt$  vs.  $X$ 

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la figura 3.4 se identifica las tres zonas de la cinética de secado, la recta A-B corresponde a la velocidad de secado constante, la recta B-C corresponde a primer periodo de velocidad de secado decreciente y la línea que conecta los puntos C-D corresponde al segundo periodo de velocidad decreciente.

Con la identificación de las zonas correspondientes se procede a calcular la cinética de secado para cada zona en específico, sabiendo que el punto crítico (B), separa a las zonas anticríticas y postcríticas respectivamente.

### 3.2.2 Periodo anticrítico o de velocidad constante

Ya que el primer periodo corresponde a una velocidad constante se considera un valor ponderado entre los 3 puntos que corresponden al mismo.

### 3.2.3 Primer periodo postcrítico o de velocidad decreciente

Se evalúan los puntos correspondientes a la recta B-C.

$$a = 1,167$$

$$b = 0,357$$

Entonces:

$$n = 0,357$$

$$k = 3,212$$

$$-\frac{dX}{dt} = 3,212X^{0,357} \quad (\text{Ec.: 3.10})$$

### 3.2.4 Segundo periodo postcrítico o de velocidad decreciente

Se evalúan los puntos correspondientes a la recta C-D.

$$a = 0,768$$

$$b = 0,676$$

Entonces:

$$n = 0,676$$

$$k = 2,155$$

$$-\frac{dX}{dt} = 2,155X^{0,676} \quad (\text{Ec.: 3.11})$$

Reemplazando los valores de X de la tabla 3.2 en las ecuaciones (3.10 y 3.11), correspondientes a la primera zona postcrítica y segunda zona postcrítica, se calcula la velocidad de secado. Además se multiplicará a estos resultados los valores de

(SS/A) correspondiente al ensayo N° 9 para tener un valor de la cinética como se menciona en la bibliografía consultada:

**Tabla 3.4**

**Velocidad de secado para los tres periodos**

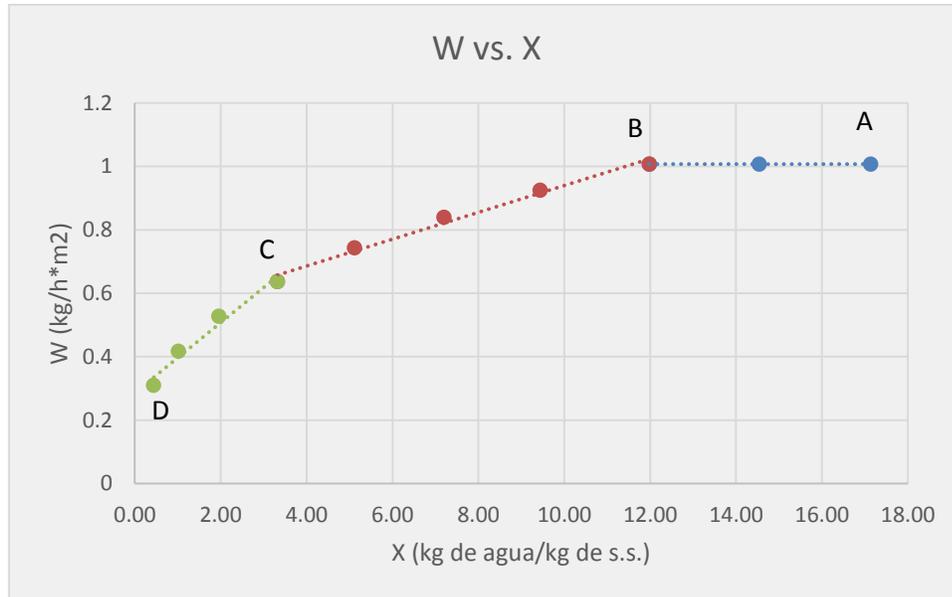
Tiempo (min)	X (kg de agua/kg de s.s.)	$\gamma$	SS/A (kg/m <sup>2</sup> )	W (kg/h*m2)
0	17,14	7,8	0,1292	1,007
20	14,54	7,8		1,007
40	11,98	7,8		1,007
60	9,44	7,16		0,925
80	7,2	6,50		0,839
100	5,12	5,75		0,743
120	3,32	4,93		0,637
140	1,96	4,08		0,527
160	1,02	3,23		0,417
180	0,44	2,40		0,31

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la tabla 3.4 se puede observar que en el periodo constante la velocidad de secado es mayor que en el resto de la curva y la velocidad permanece constante, a partir del punto crítico (B) la velocidad descende de manera lineal hasta el punto C, a partir de ese punto la velocidad descende aún más, ya que el agua presente en la materia prima es más difícil de eliminar, hasta llegar a su valor más bajo en el minuto 180 (3 h) en donde el proceso de secado finaliza.

En la siguiente figura 3.5 se muestra la variación de la velocidad en función del contenido de humedad en base seca.

**Figura 3.5**  
**Curva de velocidad de secado**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

### 3.3 Cálculo del tiempo de secado

#### 3.3.1 Tiempo anticrítico

Mediante la siguiente ecuación se calcula el tiempo en la etapa anticrítica:

$$\theta_a = \frac{SS}{A} \frac{X_i - X_c}{W_a}$$

$$S.S / A = 0,1292 \text{ kg/m}^2$$

$$X_i = 17,14 \text{ kg de agua/ kg de s.s.}$$

$$X_c = 11,98 \text{ kg de agua/ kg de s.s.}$$

$$W_a = 1,007 \text{ kh/h*m}^2$$

$$\theta_a = 0,1292 \frac{\text{kg de s.s.}}{\text{m}^2} \frac{17,14 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg de s.s.}} - 11,98 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg de s.s.}}}{1,007 \frac{\text{kg}}{\text{h} * \text{m}^2}}$$

$$\theta_a = 0,66 \text{ h} \approx 39,6 \text{ min}$$

Dado que este valor concuerda con lo expuesto en la tabla 3.4, en donde el tiempo desde el punto A ( $X = 17,14 \text{ kg agua/kg de s.s.}$ ) hasta el punto B ( $X = 11,98 \text{ kg agua/kg de s.s.}$ ) es igual a 40 minutos, y habiendo identificado los puntos iniciales y finales de ambos periodos postcríticos, primer periodo postcrítico (B – C) y segundo periodo postcrítico (C – D), se puede determinar los valores del primer y segundo tiempo postcrítico respectivamente mediante esta misma tabla.

### 3.3.2 Tiempo primer periodo postcrítico

El primer periodo postcrítico corresponde desde el punto B hasta el punto C.

El punto C ( $X = 3,32 \text{ kg agua/kg de s.s.}$ ) corresponde al minuto 120 y el valor del punto B ( $X = 11,98 \text{ kg agua/kg de s.s.}$ ) corresponde al minuto 40, es así que el tiempo correspondiente entre ambos puntos conforman el tiempo del primer periodo postcrítico:

$$\theta_{p1} = 120 - 40 \text{ min} = 80 \text{ min}$$

### 3.3.3 Tiempo segundo periodo postcrítico

Haciendo el mismo análisis para el segundo periodo postcrítico y mediante el uso de la tabla 3.4, se identifica el punto D ( $0,44 \text{ kg agua/kg de s.s.}$ ) en el minuto 180 y el punto C ( $X = 3,32 \text{ kg agua/kg de s.s.}$ ) en el minuto 120:

$$\theta_{p2} = 180 - 120 \text{ min} = 60 \text{ min}$$

### 3.3.4 Tiempo total de secado

$$\theta_{total} = \theta_a + \theta_{p1} + \theta_{p2}$$

$$\theta_{total} = 40 + 80 + 60 \text{ min}$$

$$\theta_{total} = 180$$

Con el anterior cálculo se comprueba que el tiempo de secado para el proceso de deshidratación de tomate es de 180 min = 3 h. Se debe aclarar que el proceso termina en el minuto 180 ya que la masa de agua eliminada posterior a este punto es muy baja, y no es económicamente factible teniendo en cuenta el gasto energético que se requiere, además al ser un producto altamente higroscópico, el tomate adquiere humedad del ambiente muy fácilmente por lo cual no es conveniente llevar la deshidratación hasta un valor humedad en base seca igual 0, en el cual la humedad del tomate tiende a 0.

### 3.4 Evaluación sensorial (caracteres organolépticos)

Las características organolépticas son parámetro, la mayoría de ellos sensoriales, que permiten juzgar o calificar la calidad del producto, consecuencia del empleo de materias primas adecuadas, técnicas de elaboración correctas y cuidados durante su conservación.

La evaluación sensorial del tomate deshidratado fue realizada por 10 jueces conocedores del tema, cuyas calificaciones, así también como los promedios de cada evaluación, se muestran en el anexo F.

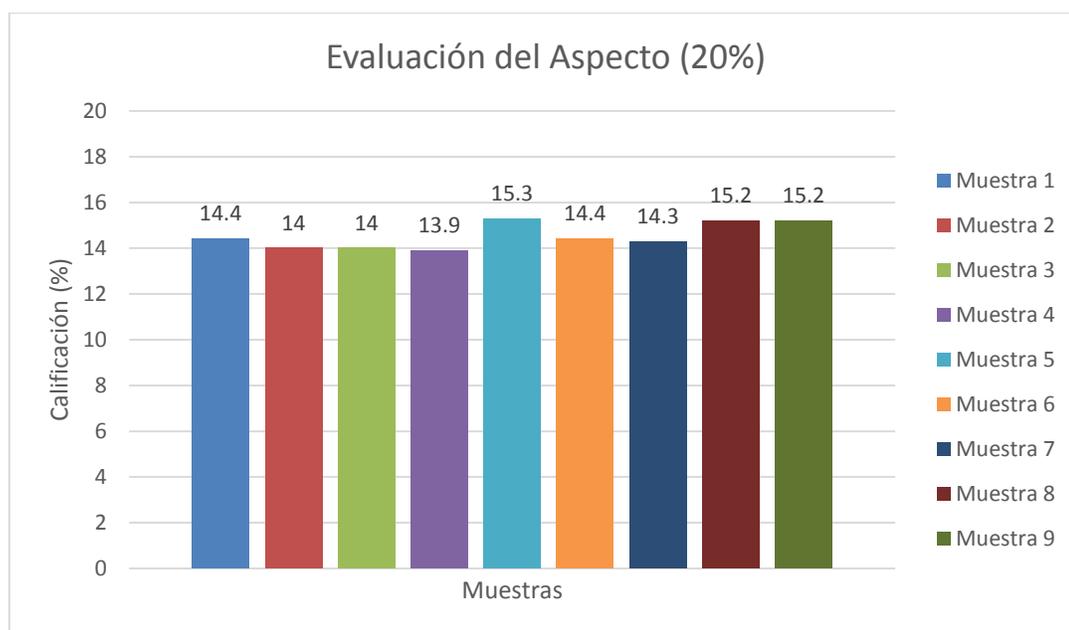
### 3.4.1 Evaluación del aspecto

La propiedad del aspecto tiene un porcentaje de 20% en la importancia dentro de las propiedades características del tomate deshidratado.

En la figura 3.6 se muestra los promedios obtenidos del aspecto de las distintas muestras de tomate deshidratado.

**Figura 3.6**

#### **Evaluación del aspecto del tomate deshidratado**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

Según los resultados obtenidos se concluye que la muestra más aceptada, en cuanto al aspecto, es la muestra 5 la cual tiene un promedio de 15,3 sobre el 20%, así también se puede apreciar que todas las muestras tienen un promedio alto de aceptación, siendo el menor promedio el de las muestras 2 y 3, con 14, ambas sobre el 20%.

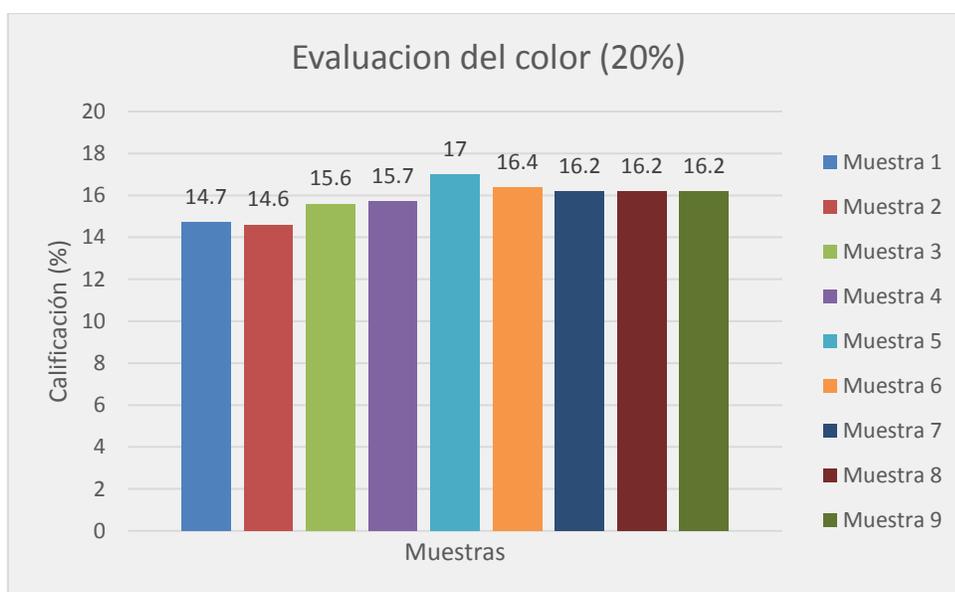
### 3.4.2 Evaluación de color

La propiedad del color tiene un porcentaje de 20% en la importancia dentro de las propiedades características del tomate deshidratado.

En la figura 3.7 se muestra los promedios obtenidos del color de las distintas muestras de tomate deshidratado.

**Figura 3.7**

#### **Evaluación del color del tomate deshidratado**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

De acuerdo a la tabla anterior se concluye que la muestra más aceptada, en cuanto al color, es la muestra 5 la cual tiene un promedio de 17 sobre el 20%, seguidas por las muestras 7, 8 y 9, todas con un promedio de 16,2 sobre el 20%. Las muestras 1 y 2, son las que presenta menor aceptación, en cuanto al color, con 14,7 y 14,6% respectivamente, sobre el 20%.

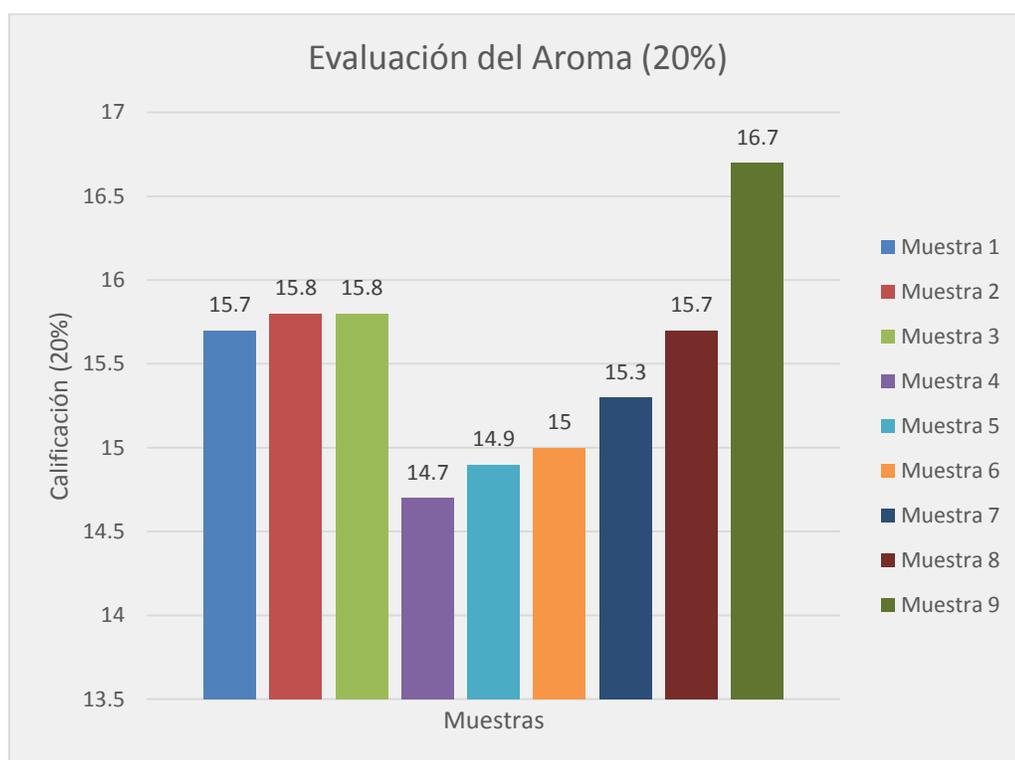
### 3.4.3 Evaluación del aroma

El atributo del aroma tiene un porcentaje de 20% en la importancia dentro de las propiedades características del tomate deshidratado.

En la figura 3.8 se muestra los promedios obtenidos del aroma de las distintas muestras de tomate deshidratado.

**Figura 3.8**

**Evaluación del Aroma del tomate deshidratado**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

Según los datos mencionados se concluye que la muestra más aceptada, en cuanto al aroma, es la muestra 9, la cual tiene un promedio de 16,7 sobre el 20%. Y las muestras 4 y 5, son las que presenta menor aceptación, en cuanto al aroma, con 14,7 y 14,9 % respectivamente, sobre el 20%.

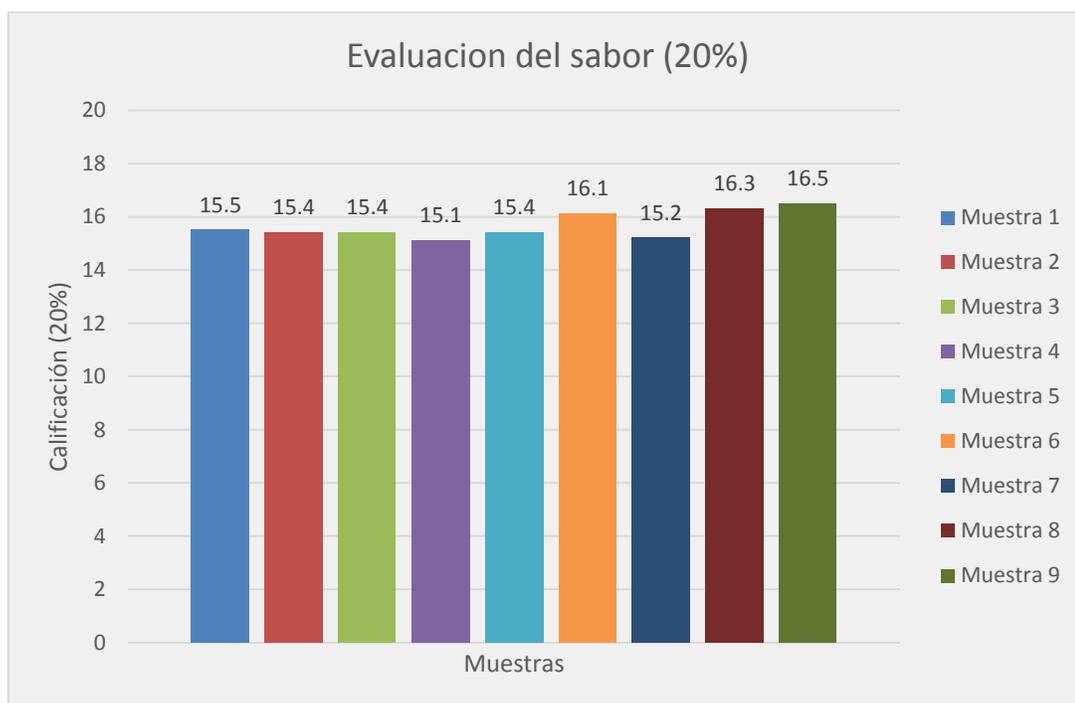
#### **3.4.4 Evaluación del sabor**

La característica del sabor tiene un porcentaje de 20% en la importancia dentro de las propiedades características del tomate deshidratado.

En la figura 3.9 se muestra los promedios obtenidos del aroma de las distintas muestras de tomate deshidratado.

**Figura 3.9**

**Evaluación del sabor del tomate deshidratado**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

Según los resultados obtenidos se concluye que la muestra más aceptada, en cuanto al sabor, es la muestra 9, la cual tiene un promedio de 16,5 sobre el 20%, seguidas por la muestra 8 con un 16.3 sobre el 20%. La muestra con menor aceptación en cuanto al aroma es la muestra 4, con un promedio de 15,1 sobre el 20%,

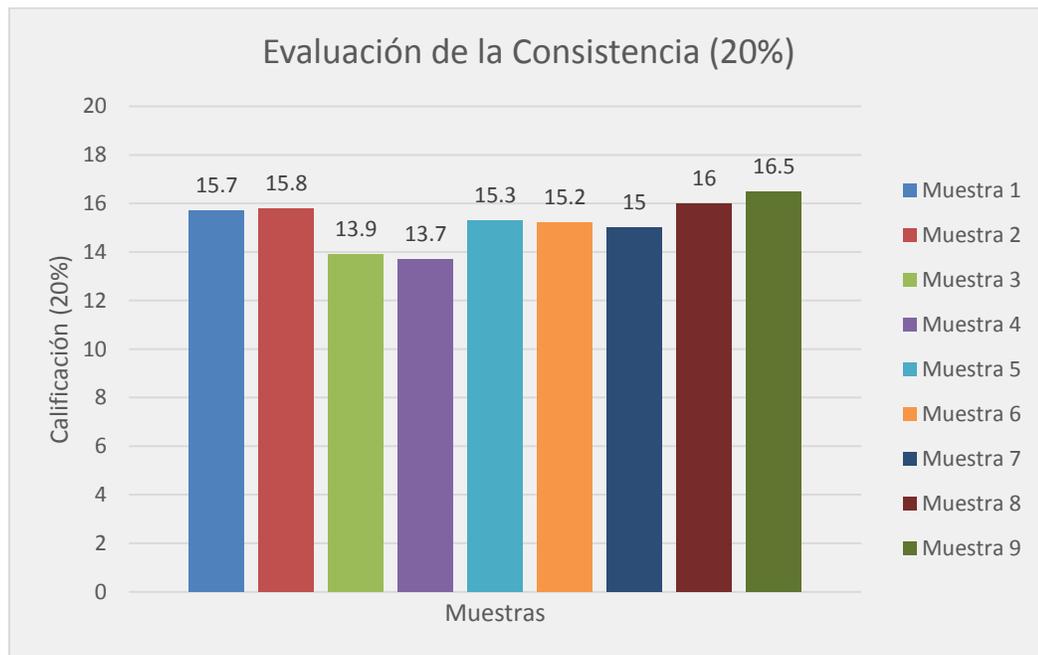
### 3.4.5 Evaluación de la consistencia

La característica del sabor tiene un porcentaje de 20% en la importancia dentro de las propiedades características del tomate deshidratado.

En la figura 3.10 se muestra los promedios obtenidos del aroma de las distintas muestras de tomate deshidratado.

**Figura 3.10**

**Evaluación de la consistencia del tomate deshidratado**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

De acuerdo a los datos mencionados anteriormente se concluye que la muestra más aceptada, en cuanto a la consistencia, es la muestra 9 la cual tiene un promedio de 16,5 sobre el 20%, seguidas por las muestras 8, con un promedio de 16 sobre el 20%. Las muestras 3 y 4, son las que presentan menor aceptación, en cuanto a la consistencia, con 13,9 y 13,7% respectivamente, sobre el 20%.

### 3.4.6 Impresión sensorial general

En la tabla 3.5, se muestran los promedios de la impresión sensorial general que tuvo cada uno de los jueces para cada muestra de tomate deshidratado, esta impresión sensorial general es la suma de los puntajes obtenidos en las diferentes características evaluadas en la evaluación organoléptica que son: aspecto, color, aroma, sabor y consistencia.

**Tabla 3.5**

**Evaluación sensorial general**

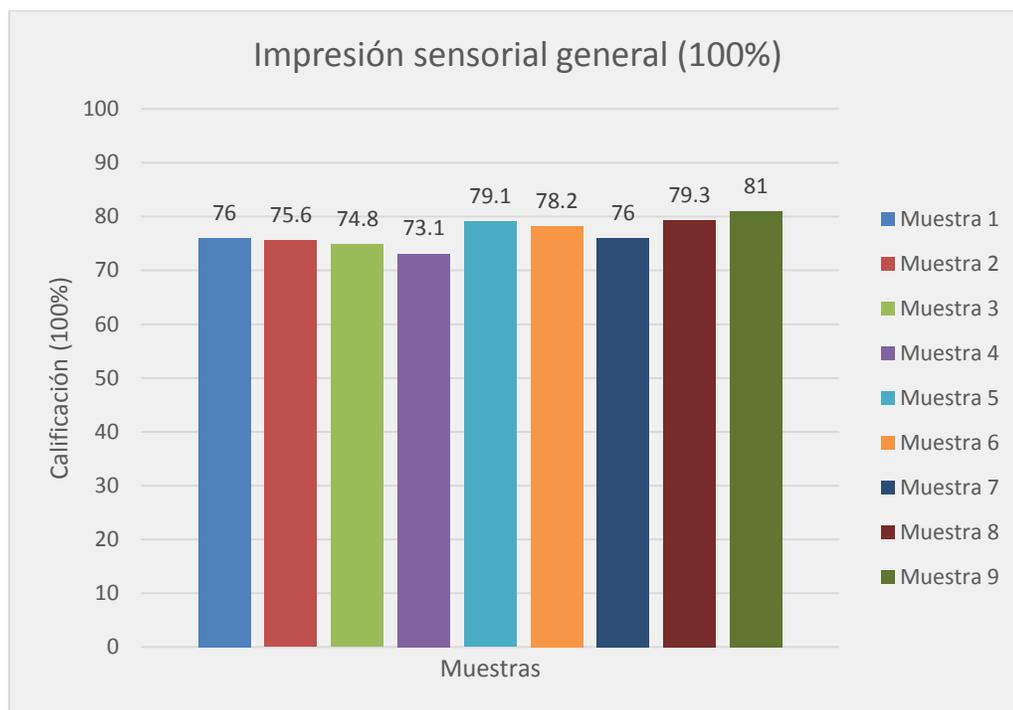
<b>Juez</b>	<b>(%)</b>								
	Mues. 1	Mues. 2	Mues. 3	Mues. 4	Mues. 5	Mues. 6	Mues. 7	Mues. 8	Mues. 9
<b>1</b>	73	69	66	60	65	59	56	54	56
<b>2</b>	96	90	94	96	98	96	99	98	98
<b>3</b>	55	57	58	48	63	65	52	64	67
<b>4</b>	66	66	70	71	77	79	79	79	80
<b>5</b>	73	72	69	69	73	71	84	89	78
<b>6</b>	61	68	74	76	88	91	84	93	96
<b>7</b>	78	79	90	87	96	89	83	81	87
<b>8</b>	89	88	76	73	65	75	80	75	81
<b>9</b>	85	84	71	75	84	77	65	78	88
<b>10</b>	84	83	80	76	82	80	78	82	79
<b>Prom.</b>	<b>76</b>	<b>75,6</b>	<b>74,8</b>	<b>73,1</b>	<b>79,1</b>	<b>78,2</b>	<b>76</b>	<b>79,3</b>	<b>81</b>

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la figura 3.11 se muestran los promedios obtenidos de los productos, en forma general, combinando los resultados de aspecto, color, aroma, sabor y consistencia de las distintas muestras de tomate deshidratado.

**Figura 3.11**

### Impresión sensorial general del tomate deshidratado



Fuente: Elaboración propia, 2015.

De acuerdo a los datos mencionados anteriormente se concluye que la muestra con mejor aceptación es la muestra 9, la cual tiene las características de secado de 60° C y una solución de metabisulfito de sodio al 0,1%, con un puntaje de 81 sobre el 100%.

La muestra de menor aceptación es la muestra 4, cuyas características son una temperatura de secado de 50° C y una solución de metabisulfito de sodio al 5%, con un puntaje de 73,1 sobre el 100%.

### 3.5 Balance de materia

Para el balance de materia se toma como punto de partida una masa de 5 kg (5000g) de tomate fresco (ensayo número 9) suponiendo que el secador admite esa capacidad de materia prima.

Para la preparación de la solución de inmersión con metabisulfito de sodio al 0,1% se hace uso de la ecuación:

$$\% \text{ peso en peso} = \frac{\text{masa de la sustancia}}{\text{masa total de la solución}} * 100$$

Para 5000 g de tomate fresco se requiere aproximadamente 7,5 l de solución de inmersión; sabiendo que la densidad del agua es igual a 1 g/ml asumimos que la densidad de la solución tiene este valor también, ya que la masa de la solución se compone en su mayor parte por agua.

Es así que mediante la ecuación se calcula la masa de metabisulfito de sodio requerido:

$$\text{masa de la sustancia} = \frac{\% \text{ peso en peso} * \text{masa de la solución}}{100}$$

Donde:

$$\% \text{ peso en peso} = 0,1$$

$$\text{Masa de la solución} = 7500 \text{ g (7,5 l)}$$

$$m_{Met} = \frac{0,1 * 7500 \text{ g}}{100} = 7,50 \text{ g de Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$$

Es así que para 7,5 l de solución al 0,1 % de Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub> se usa 7,50 g de metabisulfito de sodio y 7492,50 g de agua.

De acuerdo al análisis del producto llevado a cabo en el CEANID por cada kg de tomate fresco se consume 0,06 g de metabisulfito de sodio (Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>S<sub>2</sub>), ver anexo C.

Para evaluar cuánto de metabisulfito de sodio se consume por 5000 g (5 kg) de tomate fresco se calcula mediante la ecuación:

$$m_{Met (consumido)} = \frac{0,06g Na_2O_5S_2 * 5 kg \text{ tomate fresco}}{1 kg \text{ tomate fresco}}$$

$$m_{Met} = 0,30g Na_2O_5S_2$$

La masa de metabisulfito de sodio en la solución después del pretratamientos será igual a:

$$m_{Met \text{ final}} = m_{Met} - m_{Met \text{ consumido}}$$

$$m_{Met \text{ final}} = 7,50g Na_2O_5S_2 - 0,30g Na_2O_5S_2 = 7,20g Na_2O_5S_2$$

En la experimentación se observó que la pérdida de masa de la solución en el pretratamiento es despreciable, por lo tanto la masa de solución igual a 7,5 l se mantiene después de la inmersión de tomate.

A continuación se realizan los cálculos de balance de materia en los distintos bloques del diagrama de balance de materia, el diagrama de bloques se muestra después de dichos cálculos.

### 3.5.1 Balance en el bloque 1 (Eliminación de semillas)

$$A = B + C + D \quad (\text{Ec.: 3.11})$$

Donde:

A es la masa de materia prima, B es la masa de semillas eliminadas, C es la masa de tomate rebanado y desesemillado y D es la masa de descarte.

Calculando:

$$A = 5000 \text{ g}$$

$$C = 4027,50 \text{ g}$$

$$D = 214,50 \text{ g}$$

$$B = 5000g - 4027,50g - 214,50g = 758,00 \text{ g}$$

### 3.5.2 Balance en el bloque 2 (Sulfitación)

$$E = C + F \quad (\text{Ec.: 3.12})$$

Donde:

F es la masa de tomate Sulfitado, C es la masa de tomate rebanado y dessemillado, E es la masa de metabisulfito de sodio consumido en el tomate fresco.

Calculando:

$$C = 4027,50 \text{ g}$$

$$E = 0,3 \text{ g}$$

$$F = 4027,50g + 0,3g = 4027,80 \text{ g}$$

### 3.5.3 Balance en el bloque 3 (Deshidratación)

$$G = F - H \quad (\text{Ec.: 3.13})$$

Donde:

F es la masa de tomate Sulfitado, H es la masa de agua eliminada en el proceso y G es la masa de tomate deshidratado.

Calculando:

$$F = 4027,80 \text{ g}$$

$$G = 222,05 \text{ g}$$

$$H = 4027,80 \text{ g} - 222,05 \text{ g} = 3805,75 \text{ g}$$

En la tabla 3.6 se muestra los valores de las corrientes de materia dentro del proceso:

**Tabla 3.6**

**Corrientes dentro del balance de materia**

Corriente	Valor (g)
A	5000
B	758,00
C	4027,50
D	214,50
E	0,30
F	4027,80
G	222,05
H	3805,75

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Se debe aclarar que las pérdidas de masa de tomate deshidratado en las etapas de enfriado y envasado del producto, que se mencionan en el apartado 2.5, se consideran despreciables, por lo tanto no son incluidas en el balance de materia.

Por último se realiza el balance global de todo el proceso:

$$\textit{masa que entra} = \textit{masa que sale}$$

$$m_A + m_{H_2O} + m_{Met} = m_B + m_D + m_{Met \text{ final}} + m_{agua \text{ final}} + m_H + m_G$$

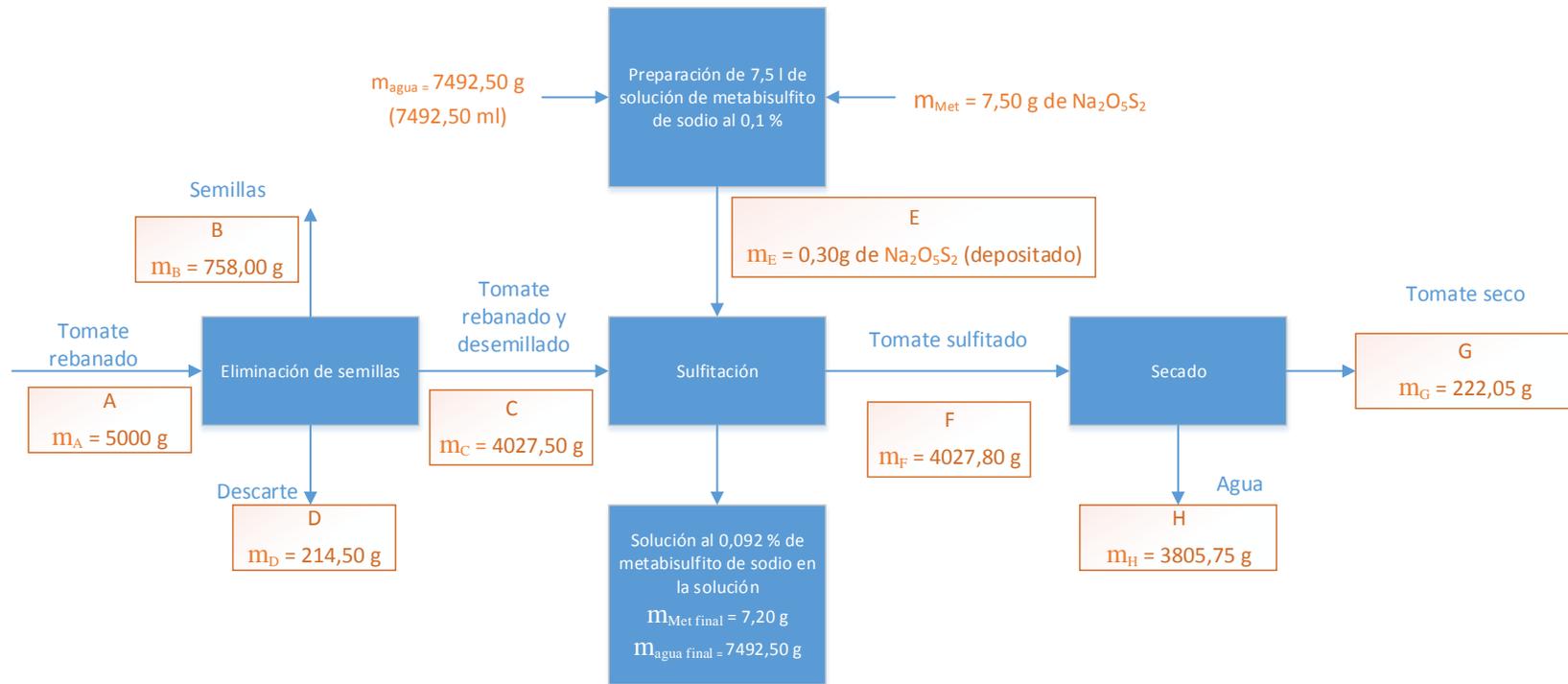
$$5000g + 7492,50g + 7,50g = 758,00g + 214,50g + 7,2g + 7492,50g + 3805,75g + 222,05g$$

$$12500g = 12500g$$

En la figura 3.12 se muestra el balance de materia para todo el proceso de deshidratación de tomate fresco.

Figura 3.12

## Balance de materia para la deshidratación de tomate mediante aire caliente forzado



Fuente: Elaboración propia, 2015.

### 3.6 Balance de energía

En este apartado también se usara el término “secado”.

El cálculo del calor necesario para el proceso de secado de tomate se hace en base al calor sensible y latente que se requiere para el secado de 4027,80 g o 4,0278 kg (tomate rebanado libre de semillas, y sulfitado, destinado a secar).

El calor sensible se calcula mediante la ecuación:

$$Q_s = m * c_p * T_{op} - T_{amb}$$

Donde:

m es la masa de tomate destinado a secar,  $c_p$  es el calor específico del tomate,  $T_{op}$  es la temperatura de secado y  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente

Calculando en  $Q_s$ :

$$m = 4,0278 \text{ kg}$$

$c_p$  = Según Hayes G. (1987) el calor especifico del tomate es 3,98 kJ/kg °C = 0,95 kcal/kg °C.

$$T_{op} = 60^\circ\text{C}$$

$$T_{amb} = 25^\circ$$

$$Q_s = 4,0278 \text{ kg} * 0,95 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 60 - 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_s = 133,9243 \text{ kcal}$$

Como en el proceso existe una transferencia de masa de agua que se evapora del sólido es necesario calcular el calor latente de vaporización mediante la siguiente ecuación:

$$Q_l = m_v * h_{fg}$$

Donde:

$m_v$  es la masa de agua que se evapora y  $h_{fg}$  es el calor latente de vaporización del agua a 100 °C.

Calculando en  $Q_l$

$$m_v = 3805,75g = 3,8058 \text{ kg}$$

$$h_{fg} = 538,7 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_l = 3,8058 \text{ kg} * 538,7 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_l = 2221,4455 \text{ kcal}$$

Finalmente el calor total necesario para secar 4,0278 kg de tomate fresco es:

$$Q = Q_s + Q_l$$

$$Q = 133,9243 \text{ kcal} + 2221,4455 \text{ kcal}$$

$$Q = 2355,3698 \text{ kcal}$$

### **3.7 Análisis estadístico del diseño experimental**

El análisis estadístico se realiza utilizando el paquete computacional SPSS 17.0 (Statistical Package for the Social Sciences), el mismo que permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos, obteniendo de esta manera resultados más representativos y confiables.

Con el análisis de varianza ANOVA se determina la influencia de los factores temperatura y concentración de metabisulfito de sodio en la solución de pretratamiento de la materia prima y sus interacciones sobre las variables respuestas tiempo de deshidratación y humedad final. Los datos introducidos al programa SPSS de acuerdo al diseño experimental planteado se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7

## Datos para el Análisis de Varianza

N° de Ensayos	Variables manipulables		Variable Respuesta		
	Temperatura (°C)	Concentración de metabisulfito de sodio (% de metabisulfito de sodio en la solución)	Tiempo de deshidratación (min)	Humedad final (% de humedad)	Conc*Temp
1	-1	1	440,0	5,16	-1
2	-1	0	460,0	5,52	0
3	-1	-1	480,0	5,85	1
4	0	1	360,0	1,65	0
5	0	0	380,0	1,58	0
6	0	-1	380,0	2,64	0
7	1	1	280,0	1,55	1
8	1	0	300,0	1,72	0
9	1	-1	280,0	2,76	-1
10	-1	1	480,0	5,45	-1
11	-1	0	440,0	5,68	0
12	-1	-1	460,0	5,86	1
13	0	1	380,0	1,78	0
14	0	0	380,0	1,61	0
15	0	-1	360,0	2,82	0
16	1	1	280,0	1,67	1
17	1	0	280,0	1,60	0
18	1	-1	280,0	2,53	-1

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se observa en la anterior, cada variable manipulable posee un nivel superior (1), un nivel medio 0 y un nivel inferior (-1).

A continuación se muestra el análisis de varianza ANOVA para la variable dependiente: tiempo.

Solo se realiza el análisis de varianza para la variable dependiente mencionada ya que el programa SPSS no responde a variaciones de variables manipulables no lineales, tal es el caso de la concentración de metabisulfito de sodio en la solución de pretratamiento, siendo estas: 0,1, 1 y 5%. Los datos anteriores fueron tomados de bibliografía y no así pensando en la linealidad de los mismos.

**Tabla 3.8**

**Análisis de Varianza ANOVA para la variable dependiente tiempo**

<b>Origen</b>	<b>Suma de cuadrados tipo III</b>	<b>gl</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Modelo corregido	94311,111 <sup>a</sup>	8	11788,889	58,944	0,000
Intersección	2493888,889	1	2493888,889	12469,444	0,000
Conc	44,444	2	22,222	0,111	0,896
Temp	93644,444	2	46822,222	234,111	0,000
Conc*Temp	622,222	4	115,556	0,778	0,567
Error	1800,0	9	200,000		
Total	2590000,000	18			
Total corregida	96111,111	17			

a.R cuadrado = 0,981 (R cuadrado corregida = 0,965)

Fuente: SPSS.17, 2015.

A partir de este análisis es posible señalar a las variables más significativas con una confianza del 95%, es decir, variables que poseen una significancia menor al 5% (0,05). Para el presente caso la variables significativa es la temperatura ( $0,000 < 0,05$ ).

### 3.7.1 Análisis de regresión Tiempo de deshidratación

El modelo de regresión establece el modelo matemático que relaciona la variable más significativa con la variable respuesta. Para el análisis de regresión, se introdujo al SPSS la variable temperatura:

**Tabla 3.9**  
**Variables Introducidas/Eliminadas<sup>b</sup>**

<b>Modelo</b>	<b>Variables introducidas</b>	<b>Variables eliminadas</b>	<b>Método</b>
1	Temp <sup>a</sup>	-	Introducir

a. todas las variables solicitadas introducidas.

b. variable dependiente tiempo.

Fuente: SPSS.17, 2015.

**Tabla 3.10**  
**Resumen del Modelo<sup>b</sup>**

<b>Modelo</b>	<b>R</b>	<b>R cuadrado</b>	<b>R cuadrado corregida</b>	<b>Error típ. de la estimación</b>
1	0,987 <sup>a</sup>	0,974	0,973	12,44432

a. Variables predictoras: (Constante), Temp.

b. Variable dependiente: tiempo

Fuente: SPSS.17, 2015.

Tabla 3.11

ANOVA<sup>b</sup>

Modelo		Suma de Cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	93633,333	1	93633,333	604,628	0,000 <sup>a</sup>
	Residual	2477,778	16	154,861		
	Total	96111,111	17			

a. Variables predictoras: (Constante), Temp.

b. Variable dependiente: tiempo

Fuente: SPSS.17, 2015.

Tabla 3.12

Coeficientes<sup>a</sup>

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig	Intervalo de confianza de 95,0% para B		
	B	Error. Típ.	Beta			Límite inferior	Límite Superior	
1	(Constante)	372,222	2,933		126,902	0,000	366,004	378,440
	Temp.	-88,333	3,592	-0,987	-24,589	0,000	-95,949	-80,718

b. Variable dependiente: tiempo

Fuente: SPSS.17, 2015.

Por lo tanto, a partir de los coeficientes proporcionados en la tabla 3.12, la ecuación matemática de la regresión es la siguiente:

$$tiempo = 372,222 - 88,333 * Temp$$

Con la ecuación anterior se establece que a mayor temperatura de operación menor será el tiempo de deshidratación.

### 3.8 Análisis del producto

Además de los parámetros de calidad mencionados en los análisis sensoriales, tales como aspecto, aroma, color, etc., se debe considerar otros requerimientos (pardeamiento, embalaje del producto, análisis fisicoquímicos y microbiológicos, anhídrido sulfurosos en el producto y rehidratación) para garantizar un producto de calidad.

**Figura 3.13**

#### **Tomate deshidratado**



Fuente: elaboración propia, 2014

En la imagen podemos notar que con la adición de metabisulfito de sodio se pudo evitar el pardeamiento del tomate deshidratado.

Como se menciona en el apartado 1.12 el tomate deshidratado debe ser envasado a vacío en bolsas de polietileno como se muestra en la figura:

**Figura 3.14****Tomate deshidratado envasado al vacío**

Fuente: elaboración propia, 2014.

El envasado al vacío se realizó en el laboratorio de alimentos perteneciente a la universidad Juan Misael Saracho.

**3.8.1 Análisis fisicoquímico del producto**

El análisis fisicoquímico del producto se efectuó en el CEANID (ver anexo A) y los resultados se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 3.13****Análisis fisicoquímico del tomate deshidratado**

<b>Componente</b>	<b>Composición (%)</b>
Humedad	6,98
Proteína total	12,52
Materia grasa	0,43
Fibra	15,18
Cenizas	9,45
Hidratos de carbono	55,44

Fuente: CEANID, 2015.

Los análisis mencionados anteriormente se realizó a la muestra después de 1 mes de envasada, la variación de la humedad mencionada en el apartado 3.1.2 y la proporcionada por el CEANID se debe a una deficiencia en el envasado, ya que la bolsa de polietileno es muy delgada y se produce fisuras en la misma en el proceso de envasado al vacío, lo cual provoca que el producto, siendo higroscópico, absorba humedad del ambiente.

### **3.8.2 Análisis microbiológico del producto**

El análisis microbiológico del producto se efectuó en el CEANID (ver anexo A) y los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.14

**Análisis microbiológico del tomate deshidratado**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor (U.F.C/ml)</b>
Coliformes totales	< 10
Coliformes fecales	< 10
Mohos y levaduras	3,0 x 10 <sup>1</sup>

Fuente: CEANID, 2015.

De acuerdo a lo mencionado no se observa desarrollo de colonias en los dos primeros parámetros y el valor de mohos y levaduras presentes son aceptables de acuerdo a lo estipulado en el apartado 1.13.3.

**3.8.3 Control de calidad del producto**

El código alimentario argentino en su *Manual de Desecados (2006)* establece valores máximos de impurezas en los productos deshidratados, tal es el caso del anhídrido sulfuroso permitido en un producto deshidratado terminado en el cual se ha procedido a la inactivación enzimática mediante inmersión de la materia prima en una solución de metabisulfito de sodio.

El tomate deshidratado fue enviado al CEANID para la determinación de anhídrido sulfuroso, cuya técnica se encuentra anexada en el anexo C, el cual muestra el siguiente resultado.

**Tabla 3.15****Anhídrido sulfuroso en el tomate seco**

<b>Muestra</b>	<b>Masa de muestra (g)</b>	<b>Anhídrido sulfuroso presente en la muestra (g de SO<sub>2</sub>/kg de materia seca)</b>
Tomate seco	20,15	0,32

Fuente: CEANID, 2015.

De acuerdo a lo establecido por el código alimentario argentino, el tomate deshidratado cumple con las especificaciones de anhídrido sulfuroso total en un producto deshidratado el cual es de 1g por kilogramo de producto deshidratado.

Otro factor importante dentro del control de calidad de los productos secos, establecido por el código alimentario argentino, es la rehidratación de los productos secos ya que esta información está directamente dirigida al consumidor para establecer el rendimiento del producto.

La técnica usada para la determinación de la rehidratación del tomate deshidratado se encuentra anexada en el anexo G.

**Tabla 3.16****Rehidratación del tomate deshidratado**

<b>Muestra</b>	<b>Masa de muestra</b>	<b>% de Rehidratación</b>
Tomate deshidratado	15,002 g	332,85

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Aun cuando no se encuentran valores de rehidratación establecidos en el código alimentario argentino, el valor mencionado puede ser considerado óptimo tratándose de un porcentaje de rehidratación de 332,85%.

### **3.9 Diseño del secador de bandejas**

En este apartado se hará uso del término secado para referirse a la deshidratación por cuestiones técnicas y bibliográficas.

Se propone el siguiente diseño de un secador de bandejas para el secado de tomate fresco, dicho secador debe calentar el aire hasta una temperatura de 60 °C partiendo de 25 °C (temperatura ambiente).

El diseño del secador se realizará a partir de las dimensiones del equipo de secado usado para la experimentación.

#### **3.9.1 Características del secador usado experimentalmente**

El secador usado para el proceso de secado de tomate tiene las siguientes características:

**Figura 3.15**

#### **Secador usado para la experimentación**



Fuente: Elaboración propia, 2015.

**Figura 3.16****Vista interna del secador de bandejas usado en la experimentación**

Fuente: Elaboración propia, 2015.

**Figura 3.17****Bandeja del secador usado en la experimentación**

Fuente: Elaboración propia, 2015

Tabla 3.17

## Características del secador usado para la experimentación

<b>Marca</b>	Binder (modelo FD 53)
<b>Rango de temperatura</b>	0°C – 300°C
<b>Tensión</b>	220 – 230 V
<b>Potencia total</b>	1,20 KV
<b>Capacidad</b>	5 bandejas
<b>Medidas externas:</b>	
<b>Alto (<math>L_{SE}</math>), m</b>	0,62
<b>Ancho (<math>A_{SE}</math>), m</b>	0,635
<b>Profundidad (<math>P_{SE}</math>), m</b>	0,575
<b>Medidas internas:</b>	
<b>Alto (<math>Li_{SE}</math>), m</b>	0,4
<b>Ancho (<math>Ai_{SE}</math>), m</b>	0,4
<b>Profundidad (<math>Pi_{SE}</math>), m</b>	0,33

Fuente: Manual Binder, 2015.

### 3.9.2 Datos del secado para el diseño

**Tabla 3.18**

**Datos del secado para el diseño del secador propuesto**

<b>Temperatura de secado</b>	60 °C
<b>Área de la bandeja</b>	0,115 m <sup>2</sup>
<b>Cantidad de materia prima por bandeja</b>	0,25 kg
<b>Relación de materia prima por bandeja (Mp/bandeja)</b>	2,17 kg/m <sup>2</sup>
<b>Humedad inicial de la materia prima</b>	94,77 %
<b>Humedad final de la materia prima</b>	5%
<b>Tiempo total de secado</b>	3,67 h.

Fuente: Elaboración propia, 2015.

### 3.9.3 Escalamiento del secador

Para realizar el diseño del secador de bandejas se aplica el concepto de similitud geométrica a partir de la siguiente ecuación lineal:

$$X_p = \lambda * X_m \quad (\text{Ec.: 3.13})$$

Donde  $X_p$  y  $X_m$  representan una misma variable en modelo (m) y prototipo (p) y  $\lambda$  es el factor de escala para dicha variable (Amador P., 2014)

El factor de escalamiento para el secador se determinará a partir de las dimensiones internas del secador experimental y de la cantidad de materia prima a secar por bandeja (Amador P., 2014).

Área del secador experimental:

$$P_i \text{ SE} = 0,33 \text{ m}$$

$$A_{iSE} = 0,4 \text{ m}$$

$$\text{Área}_{SE} = P_{iSE} * A_{iSE}$$

$$\text{Área}_{SE} = 0,33\text{m} * 0,4\text{m} = 0,132\text{m}^2$$

Se considera que el área del secador experimental deberá incrementarse en la misma proporción de la cantidad de materia prima a secarse (Amador P., 2014).

Ya que el diseño del secador propuesto se realizará a escala de laboratorio, la materia prima se incrementará de 0,25 a 0,5 kg por bandeja.

Estos valores se reemplazan en la ecuación (3.13), reemplazando la variable X por M, para calcular el valor de  $\lambda$ :

$$M_p = \lambda * M_m$$

$$\lambda = \frac{M_p}{M_m}$$

Donde:

$M_p$  = materia prima propuesta = 0,5 kg

$M_m$  = materia prima usada en la experimentación 0,25 kg

$$\lambda = \frac{0,5 \text{ kg}}{0,25 \text{ kg}} = 2$$

Ya que el valor de  $\lambda$  es aplicable para cualquier variable, esta se aplica para el cálculo del área del secador diseñado:

$$\text{Área}_{SD} = \lambda * \text{Área}_{SE}$$

Donde:

$\text{Área}_{SD}$  = área del secador diseñado

$\text{Área}_{SE} = \text{área del secador experimental} = 0,132 \text{ m}^2$

$\lambda = \text{factor de escala} = 2$

$$\text{Área}_{SD} = 2 * 0,132 \text{ m}^2$$

$$\text{Área}_{SD} = 0,264 \text{ m}^2 \approx 0,26 \text{ m}^2$$

### 3.9.4 Tamaño de las bandejas de secado

Con el cálculo del área se puede calcular los valores del ancho y largo de las nuevas bandejas, para el secador diseñado el largo (LSD) y ancho (ASD) tendrán una relación dimensional 1:1.

$$\text{Área}_{SD} = P_{SD} * A_{SD}$$

Ya que la relación dimensional es 1:1 entonces la profundidad y el ancho tendrán el mismo valor:

$$\text{Área}_{SD} = P_{SD} * P_{SD} = P_{SD}^2$$

$$P_{SD} = \sqrt{\text{Área}_{SD}} = \sqrt{0,26 \text{ m}^2} = 0,51 \text{ m} \approx 0,50 \text{ m}$$

Entonces las dimensiones de las bandejas del secador diseñado serán:

$$P_{SD} = 0,50 \text{ m}$$

$$A_{SD} = 0,50 \text{ m}$$

La altura de la bandeja tendrá el mismo valor en el secador diseñado que en el secador usado para la experimentación:

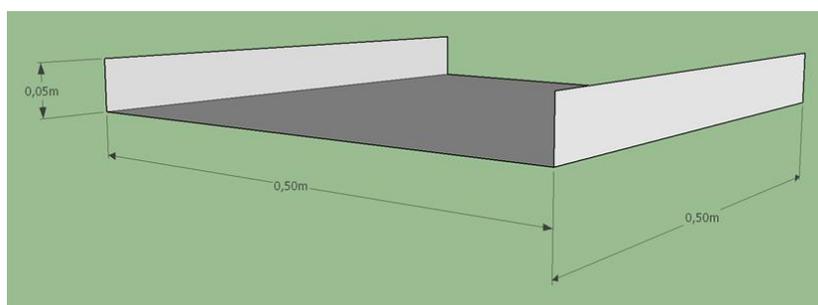
$$HB_{SD} = 0,05 \text{ m}$$

El espesor del material usado para la fabricación de la bandeja de secado será de 1 cm, además con el objetivo de evitar el pandeamiento de la materia prima en la bandeja se colocarán varillas a lo largo y ancho de la bandeja con el mismo espesor.

Para una mejor movilidad de las bandejas de secado dentro del secador se reducirá 0,005 m del ancho, la profundidad y la altura de la bandeja diseñada:

**Figura 3.18**

**Bandeja diseñada**



Fuente: Elaboración propia, 2105.

**Tabla 3.19**

**Dimensiones de la bandeja diseñada**

<b>Profundidad (largo) (<math>PB_{SD}</math>), m</b>	0,495
<b>Ancho (<math>AB_{SD}</math>), m</b>	0,495
<b>Alto (<math>HB_{SD}</math>), m</b>	0,045
<b>Área de la bandeja (<math>\text{Área}B_{SD}</math>), <math>m^2</math></b>	0,245
<b>Espesor (<math>EB_{SD}</math>), m</b>	0,01

Fuente: Elaboración propia, 2015.

### 3.9.5 Materia prima a secar

Tomando en cuenta que el diseño del secador propuesto será usado a escala de laboratorio, la cantidad de materia prima destinada al proceso de deshidratación será de 2,5 kg.

### 3.9.6 Número de bandejas

El número de bandejas depende de la cantidad de materia prima destinada al secado que puede ser cargada en cada bandeja (0,5 kg / bandeja):

$$N_B = \frac{\text{Cantidad de materia prima destinada al secado}}{\text{Cantidad de materia prima por bandeja}}$$

$$N_B = \frac{2,5 \text{ kg}}{0,5 \text{ kg}} = 5$$

Entonces el número total de bandejas necesarias para secar 2,5 kg de tomate fresco es de 5.

### 3.9.7 Dimensionamiento del secador

De acuerdo a los datos mencionados, la profundidad y el ancho del secador serán de 0,50 m.

Para la altura se toma en cuenta el factor de escala ( $\lambda=2$ ), por lo tanto la altura del secador diseñado será:

$$L_{SD} = \lambda * L_{SE} = 2 * 0,4 \text{ m}$$

$$L_{SD} = 0,80 \text{ m}$$

De acuerdo al cálculo el número de bandejas es igual a 5, la altura de cada bandeja es de 0,05 m y se propone una distancia de 10 cm entre bandejas; por lo tanto las medidas dentro del secador diseñado serán:

Tabla 3.20

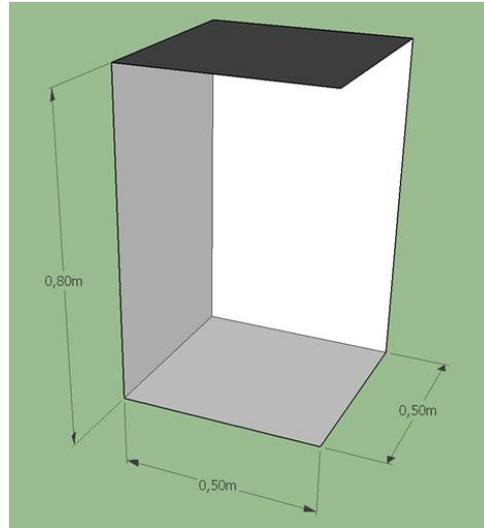
## Dimensionamiento interno del secador diseñado

	Valor, m	Número de unidades	Dimensión, m
<b>Altura de las bandejas</b>	0,05	5	0,25
<b>Distancia bandeja/bandeja</b>	0,09	4	0,36
<b>Altura desde la base del secador hasta la primera bandeja</b>	0,1	1	0,1
<b>Altura desde la última bandeja hasta el techo del secador</b>	0,1	1	0,09
<b>Total</b>			<b>0,8</b>

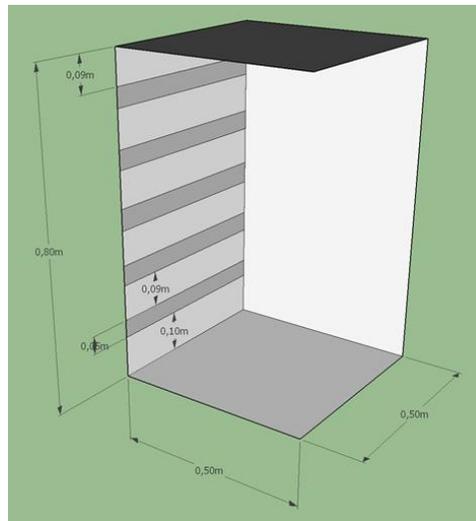
Fuente: Elaboración propia, 2015.

La altura desde la base del secador hasta la primera bandeja será usada para la entrada de aire caliente y la altura desde la última bandeja hasta el techo del secador será usado para evitar la condensación de vapor de agua eliminado en el proceso.

Entonces las medidas internas del secador diseñado serán:

**Figura 3.19****Medidas externas del secador diseñado**

Fuente: Elaboración propia, 2015.

**Figura 3.20****Medidas internas del secador diseñado**

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Para las medidas externas se añadirá 5 cm (por cara) a cada dimensión del secador, ya que se usará acero inoxidable como recubrimiento interno, poliestireno expandido para el aislamiento del secador y aluminio como recubrimiento externo.

Entonces las medidas del secador diseñado serán:

**Tabla 3.21**

**Medidas internas y externas del secador diseñado**

	<b>Medida interna</b>	<b>Medida externa</b>
<b>Alto (<math>L_{SD}</math>), m</b>	0,80	0,90
<b>Ancho (<math>A_{SD}</math>), m</b>	0,5	0,60
<b>Profundidad (<math>P_{SD}</math>), m</b>	0,5	0,60
<b>Área (<math>\text{Área}_{SD}</math>), m<sup>2</sup></b>	0,25	0,36

Fuente: Elaboración propia, 2015

### 3.9.8 Funcionamiento general del secador

El equipo de secado diseñado tendrá las siguientes características:

- Secador de contacto indirecto.
- Transferencia de calor por convección forzada.
- Secador discontinuo (por lotes).
- Fuente de energía eléctrica.

El secador utiliza aire proveniente del exterior (medio ambiente) y es alimentado mediante ventiladores que introducen el aire a la cámara de secado con la velocidad requerida para el proceso. Previamente el aire, a temperatura ambiente, es calentado hasta alcanzar la temperatura de operación adecuada (Amador P., 2014)

### **3.9.9 Selección de los equipos auxiliares**

Para seleccionar el calentador adecuado para el secador diseñado es necesario realizar un balance de materia y energía para la capacidad del equipo propuesto (Amador P., 2014).

#### **3.9.9.1 Balance de materia y energía en la cámara de secado**

La cámara de secado está diseñada para reducir el contenido de humedad de 2,5 kg de tomate fresco desde una humedad inicial de 94,77% hasta una humedad final de 5%.

#### **Condiciones de operación para el secador diseñado:**

Temperatura de secado ( $T_{op}$ ) = 60 °C

Área de la bandeja ( $\text{Área}_{SD}$ ) = 0,245 m<sup>2</sup>

Cantidad de materia prima por bandeja = 0,5 kg

Relación de materia prima por bandeja ( $Mp/\text{bandeja}$ ) = 2,041 kg/m<sup>2</sup>

Humedad inicial de la materia prima ( $H_i$ ) = 94,77 %

Humedad final del producto seco ( $H_f$ ) = 5 %

#### **Balance de materia y energía para una producción de 2,5 kg**

Masa materia prima destinada a secar ( $C$ ) = 2,5 kg

Masa tomate seco ( $G$ ) = 0,138 kg

Cantidad de agua evaporada ( $H$ ) = 2,362 kg

Calor necesario = 1360,071 kcal

Es necesario calcular el volumen de aire requerido para el proceso de secado para la selección del calentador de aire. El cálculo del mismo se realiza mediante la siguiente ecuación (Amador P., 2014):

$$Q_{necesario} = m_{aire} * Cp_{aire} * T_{op} - T_{amb}$$

$$m_{aire} = \frac{Q_{necesario}}{Cp_{aire} * (T_{op} - T_{amb})}$$

Donde:

$m_{aire}$  = masa de aire requerido

$Q_{necesario}$  = es el calor necesario = 1360,071 kcal = 5694,337 kJ

$Cp_{aire}$  = calor específico del aire = 1,0054 kJ/kg °C

$T_{op}$  = temperatura de salida del aire = 60 °C

$T_{amb}$  = temperatura del aire de entrada = 25 °C

Reemplazar y calcular:

$$m_{aire} = \frac{5694,337 \text{ kJ}}{1,0054 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 60 - 25 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$m_{aire} = 161,822 \text{ kg}$$

Mediante la ecuación de gases ideales se calcula el volumen de aire requerido:

$$V_{aire} = \frac{m_{aire} * R * T_{op}}{P}$$

Donde:

$m_{aire}$  = masa de aire requerido = 161,822 kg

$R = \text{constante de gases ideales} = 0,2869 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{°K}$

$P = \text{presión atmosférica de Tarija} = 610,05 \text{ mmHg} = 81,33 \text{ kPa}$

$T_{\text{op}} = 60 \text{ °C} = 333,15 \text{ °K}$

Reemplazar y calcular:

$$V_{\text{aire}} = \frac{161,822 \text{ kg} \cdot 0,2869 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3}{81,33 \text{ kPa} \cdot \text{kg} \cdot \text{°K} \cdot 333 \text{ °K}}$$

$$V_{\text{aire}} = 190,0904 \text{ m}^3$$

### 3.9.10 Selección del calentador de aire

Se seleccionará de acuerdo al calor o potencia requerida para calcular el flujo de aire a una temperatura de 60 °C.

De acuerdo al balance de energía para 2,5 kg de materia prima la potencia requerida del calentador de aire por hora es:

$$\frac{1360,071 \text{ kcal}}{3,67 \text{ h}} = 370,592 \text{ kcal}_h = 0,431 \text{ kW}_h$$

La potencia requerida por día es:

$$1 \frac{\text{kW}}{\text{h}} \cdot \frac{3,67 \text{ h}}{1 \text{ dia}} = 3,67 \text{ kW}_{\text{dia}} \approx 4 \text{ kW}_{\text{dia}}$$

Se elige la calefacción eléctrica como medio para proporcionar al aire la temperatura de secado necesaria (Amador P., 2014).

El uso de calentadores eléctricos de aire es muy común en secadores para laboratorio y plantas piloto. Estos equipos pequeños y menos pesados que los tradicionales

equipos de transferencia de calor tales como los de tubo-coraza o los de llama directa, ofrecen mayor resistencia a la erosión y fugas, aumentan la seguridad y control de temperatura, además de una baja inversión (Amador P., 2014).

Mediante cálculos anteriores se requiere una potencia de 0,431 kW pero asumiendo que la eficiencia del calentador es del 70 % se calcula la potencia final requerida del motor (Villarroel D., 2000).

$$\eta = \frac{Potencia_{requerida}}{Potencia_{final}}$$

Donde:

$Potencia_{requerida}$  = potencia necesaria para el proceso (0,431 kW)

$\eta$  = eficiencia del motor = 70 % = 0,7

$$Potencia_{final} = \frac{Potencia_{requerida}}{\eta} = \frac{0,431 \text{ kW}}{0,7}$$

$$Potencia_{final} = 0,616 \text{ kW} \approx 1 \text{ kW}$$

### 3.9.11 Selección del ventilador de aire

El caudal necesario para el proceso es:

$$Caudal_{aire} = \frac{V_{aire}}{tiempo} = \frac{190,0904 \text{ m}^3}{3,67 \text{ h}} = 51,796 \text{ m}^3 \text{ h} = 0,0144 \text{ m}^3 \text{ s}$$

Se propone una velocidad de flujo de aire de 2,5 m/s que es la más usada en este tipo de procesos.

A partir del caudal y la velocidad de aire se calcula el área transversal para la entrada de aire:

$$Caudal_{aire} = V_{aire} * A$$

$$A = \frac{Caudal_{aire}}{V_{aire}} = \frac{0,144 \text{ m}^3 \text{ s}}{2,5 \text{ m s}}$$

$$A = 0,0058 \text{ m}^2$$

Por lo tanto el diámetro de la entrada de aire se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

$$d = \frac{\sqrt{4 * A}}{\pi} = \frac{\sqrt{4 * 0,0058 \text{ m}^2}}{\pi}$$

$$d = 0,086 \text{ m} = 8,6 \text{ cm}$$

El diámetro es aceptable teniendo en cuenta el espacio destinado para la entrada de aire entre la primera bandeja y la base del secador.

### 3.9.12 Sugerencias sobre la construcción del secador

Cuando se hace referencia a la construcción del secador, se refiere al tipo de estructura y los materiales sugeridos para su construcción. Para establecer dichas sugerencias se parte del siguiente análisis (Villarrol D., 2000):

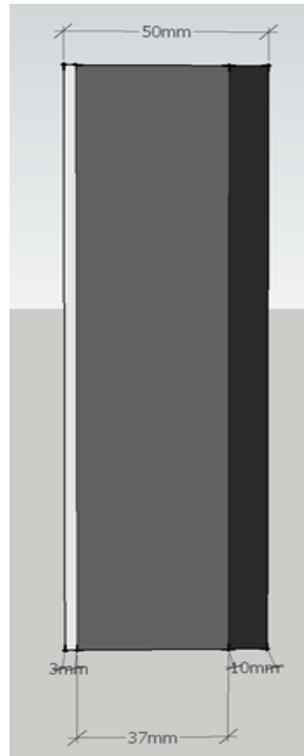
- La estructura del secador debe ser firme y segura, y proporcionarle al equipo facilidades para su manejo y transporte.

- Los materiales a recomendar para su construcción deben ser comunes y de fácil obtención en el mercado.
- Los materiales utilizados deben reducir las pérdidas de energía (calor) en el equipo.

Basados en estos criterios se recomienda:

- **Estructura:** Se recomienda la utilización de hierro angular de 2 1/8 pulgadas, el mismo que por ser angular ofrece una mayor resistencia a los esfuerzos de tracción, compresión y cortantes a los que puedan ser sometidos (Villarreal D., 2000).
- **Paredes:** Se recomienda el uso de poliestireno expandido para aislar el equipo y evitar las pérdidas de calor, como revestimiento interno se usará acero inoxidable para evitar la corrosión del equipo y evitar la contaminación de la materia prima; como revestimiento externo se usa aluminio por su resistencia a la corrosión y su bajo costo.

A continuación se muestran las láminas de diferentes materiales que conforman la pared del desecador:

**Figura 3.21****Estructura de la pared del desecador**

Fuente: Elaboración propia, 2015.

**3.9.13 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor “U”**

Se estimó desde el inicio 5 centímetros de espesor para el secador, este espesor estará compuesto por 3 láminas: la primera de acero inoxidable AISI 316 de 3 mm de espesor, usado como revestimiento interno; la segunda es de poliestireno expandido, usado como aislante, de 3,7 cm de espesor y la última lámina de aluminio de 1 cm de espesor, usada como recubrimiento externo.

Datos:

$$Q_{\text{operación}} = 1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$k_{\text{Acero}} = 13,4 \text{ W/m } ^\circ\text{K}$$

$$k_{\text{Poli}} = 0,036 \text{ W/m } ^\circ\text{K}$$

$$k_{\text{Al}} = 257 \text{ W/m } ^\circ\text{K}$$

$$\Delta X_{\text{Acero}} = 0,3 \text{ cm} = 0,003 \text{ m}$$

$$\Delta X_{\text{Poli}} = 3,7 \text{ cm} = 0,037 \text{ m}$$

$$\Delta X_{\text{Al}} = 1 \text{ cm} = 0,01 \text{ m}$$

$$T_{\text{int}} = 60 \text{ } ^\circ\text{C} = 333,15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_{\text{ext}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 298,15 \text{ } ^\circ\text{K}$$

### **3.9.13.1 Cálculo de los coeficientes de película**

#### **3.9.13.1.1 Coeficiente de película externa (25 °C)**

Datos del aire a 25 °C:

$$K = 25,51 \text{ e-3 W/m } ^\circ\text{K}$$

$$\nu = 15,61 \text{ e-6 m}^2/\text{s}$$

$$\alpha = 21,40 \text{ e-6 m}^2/\text{s}$$

Se calcula el Número de Reynolds

$$Re = \frac{v * D}{\nu}$$

Donde:

$$v = \text{Velocidad del flujo de aire} = 2,5 \text{ m/s}$$

$D = \text{diámetro de la entrada de aire} = 8,6 \text{ cm} = 0,086 \text{ m}$

$v = 15,61 \text{ m}^2/\text{s}$

$$Re = \frac{2,5 \text{ m}_s * 0,086 \text{ m}}{15,61 \text{ m}^2_s} = 13773,22$$

Mediante el Número de Reynolds asumimos régimen turbulento

Calcular el Número de Prandtl:

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{15,61e - 6 \text{ m}^2_s}{21,40e - 6 \text{ m}^2_s} = 0,7294$$

Se calcula el  $h$  a la entrada del ventilador:

$$\frac{h_{ext} * D}{K} = 0,023 * Re * Pr^n \quad (\text{Ec.: 3.14})$$

Donde:

$h_{ext}$  = coeficiente de película externa

$D$  = diámetro de la entrada de aire

$K$  = Conductividad térmica del aire a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

$Re$  = Número de Reynolds

$Pr$  = Número de Prandtl

$n$  = constante = 0,3

Despejar  $h_{ext}$  de la ecuación 3.9.13.1.1.1, reemplazar datos y calcular:

$$h_{ext} = \frac{0,023 * 13773,22^{0,8} * 0,7294^{0,3} * 25,61e - 3}{0,086} \frac{W}{m^2 * ^\circ K}$$

$$h_{ext} = 12,707 \frac{W}{m^2 * ^\circ K}$$

### 3.9.13.1.2 Coeficiente de película interna (60 °C)

Datos del aire a 60 °C:

$$K = 28,08 \text{ e-3 } \frac{W}{m \text{ } ^\circ K}$$

$$\nu = 18,95 \text{ e-6 } \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha = 26,31 \text{ e-6 } \frac{m^2}{s}$$

Se calcula el diámetro equivalente:

$$Deq = \frac{4 * A}{P_m}$$

Donde:

$$A = \text{área transversal} = 0,5 \text{ m} * 0,5 \text{ m} = 0,25 \text{ m}^2$$

$$P_m = \text{Perímetro mojado} = (2 * 0,5 \text{ m}) + (2 * 0,5 \text{ m}) = 2 \text{ m}$$

$$Deq = \frac{4 * 0,25 \text{ m}^2}{2 \text{ m}} = 0,5 \text{ m}$$

Calcular el Número de Reynolds:

$$Re = \frac{\nu * Deq}{\nu} = \frac{2,5 \text{ m}_s * 0,5 \text{ m}}{18,95 \text{ e-6 } \frac{m^2}{s}} = 65963,061$$

Se asume régimen turbulento.

Calcular el Número de Prandtl:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{18,95 e - 6 \text{ m}^2 \text{ s}}{26,31 e - 6 \text{ m}^2 \text{ s}} = 0,7202$$

Se calcula el coeficiente de película al interior del secador ( $h_{int}$ ):

$$\frac{h_{int} * D}{K} = 0,023 * Re * Pr^n \quad (\text{Ec.: 3.15})$$

Despejar  $h_{int}$  de la ecuación 3.9.13.1.2.1, reemplazar datos y calcular:

$$h_{int} = \frac{0,023 * 65063,061^{0,8} * 0,7202^{0,4} * 28,08 e - 3 \text{ W m} * \text{°K}}{0,5 \text{ m}}$$

$$h_{int} = 8,12 \text{ W m}^2 * \text{°K}$$

Con los cálculos anteriores se calcula el coeficiente global de transferencia de calor

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{\Delta X_{Acero}}{K_{Acero}} + \frac{\Delta X_{Poli}}{K_{Poli}} + \frac{\Delta X_{Al}}{K_{Al}} + \frac{1}{h_{ext}}}$$

Reemplazar datos y calcular:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{8,12 \text{ W m}^2 * \text{°K}} + \frac{0,003 \text{ m}}{13,4 \text{ W m} * \text{°K}} + \frac{0,037 \text{ m}}{0,036 \text{ W m} * \text{°K}} + \frac{0,01}{237 \text{ W m} * \text{°K}} + \frac{1}{12,707 \text{ W m}^2 * \text{°K}}}$$

$$U = 0,813 \text{ W m}^2 * \text{°K}$$

Con este valor se calcula el calor perdido a través de las paredes del secador

$$Qp = \text{Área} * U * T_c - T_f$$

Donde:

$Qp$  = calor perdido a través de las paredes

Área = Área total de las paredes expuestas =  $6 * 0,5 \text{ m} = 3 \text{ m}$

$U$  = coeficiente global de transferencia de calor =  $0,813 \text{ W/m}^2\text{°K}$

$T_c$  = Temperatura del aire caliente =  $60 \text{ °C} = 333,15 \text{ °K}$

$T_f$  = Temperatura del aire frío =  $25 \text{ °C} = 298,15 \text{ °K}$

Reemplazar y calcular:

$$Qp = 3\text{m} * 0,813 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{°K}} * 333,15 - 298,15 \text{ °K}$$

$$Qp = 85,365 \text{ W}$$

Las pérdidas de calor a través de las paredes no debe ser menor del 15% de la energía total invertida en el proceso (Villarroel D., 2000).

Mediante regla de 3 se calcula el porcentaje de calor perdido:

$$\% Qp = \frac{85,365 \text{ W}}{1000 \text{ W}} * 100\% = 8,54 \%$$

Ya que la pérdida de calor a través de las paredes es menor al 15% de la energía total invertida, se justifica el uso de materiales y espesores de las láminas de los mismos, propuestos.

**CAPÍTULO IV**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

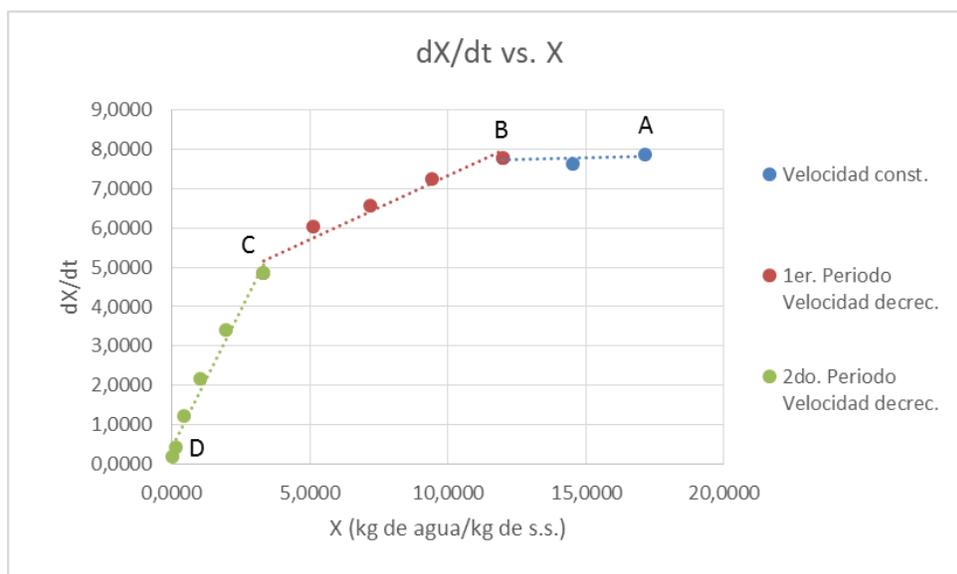
#### 4.1 Conclusiones

- La selección de la materia prima se realizó en base a la producción de las principales variedades de tomate producidas en Tarija. Según información de la Cámara Agropecuaria de Tarija (CAT) la variedad más producida en Tarija es la “perita” constituyendo alrededor del 70 % de la producción total de tomate.
- La materia prima fue caracterizada en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID) para analizar sus propiedades fisicoquímicas, asegurando con esto un producto de calidad; los resultados del análisis fueron:

<b>Componente</b>	<b>Composición (%)</b>
Humedad	94,77
Proteína total	0,56
Materia grasa	0,20
Fibra	0,76
Cenizas	0,36
Hidratos de carbono	4,47

- El diseño del secado para la deshidratación de tomate fresco se realizó en base a dos variables manipulables y dos variables de respuesta, las variables manipulables fueron: temperatura, efectuándose pruebas experimentales a tres temperaturas diferentes (40, 50 y 60 °C) y concentración de metabisulfito de sodio en la solución para el pretratamiento del tomate, las cuales fueron de 0,1, 1 y 5% de metabisulfito de sodio en la solución. Las variables de respuesta fueron: humedad y tiempo de secado.

- El proceso de secado fue realizado en el Laboratorio de Compuestos Bioactivos los cuales se encuentran en instalaciones del CEANID bajo condiciones controladas ya establecidas anteriormente, y en un ambiente seguro e higiénico.
- De acuerdo al proceso de experimentación se seleccionó como mejor respuesta el proceso de deshidratado a una temperatura de 60 °C ya que el deshidratado a esa temperatura se efectúa 1 hora por debajo del proceso a 50 °C y dos del proceso a 60 °C, lo cual deriva en ahorros de energía y menor inversión.
- De acuerdo a una valoración organoléptica del producto, realizada por 10 jueces conocedores del tema, el pretratamiento más apropiado para el deshidratado de tomate fresco es el de 0,1% de concentración de metabisulfito de sodio en la solución.
- Con lo mencionado anteriormente se concluye que el proceso más adecuado para la deshidratación de tomate de la variedad perita, consiste en una deshidratación a una temperatura de 60 °C y un pretratamiento con una solución de Metabisulfito de sodio al 0,1 % (Ensayo 9).
- La degustación realizada por 10 jueces muestra el ensayo 9 como el mejor proceso basándose en el aspecto, color, sabor, aroma y consistencia del tomate deshidratado, dando como resultado una aceptación con un valor de 81%. La muestra de menor aceptación fue la del ensayo 4 con un valor de 73,1%.
- La cinética del proceso de secado se realizó en base a los datos de la muestra 9, dando como resultado la siguiente curva de secado.



Donde se puede identificar las tres zonas de la cinética de secado, la recta A-B es la velocidad de secado constante, la recta B-C corresponde a primer periodo de velocidad de secado decreciente y la línea que conecta los puntos C-D corresponde al segundo periodo de velocidad decreciente.

- Mediante cálculos realizados se pudo determinar el tiempo promedio de deshidratación del tomate, el cual es de 3,7 h, que puede variar de acuerdo a la humedad de la materia prima, la madurez de la misma y las condiciones climáticas en las que se realice el proceso.
- El análisis fisicoquímico del producto fue realizado en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID) el cual mostró los siguientes resultados:

Componente	Composición (%)
------------	-----------------

Humedad	6,98
Proteína total	12,52
Materia grasa	0,43
Fibra	15,18
Cenizas	9,45
Hidratos de carbono	55,44

Dichos resultados muestran un producto de calidad y una humedad final aceptable la cual está por debajo de la exigida por el Código Alimentario Argentino.

- El análisis microbiológico del producto fue realizado en el CEANID, el cual mostró los siguiente resultados:

<b>Parámetro</b>	<b>Valor (U.F.C/ml)</b>
Coliformes totales	< 10
Coliformes fecales	< 10
Mohos y levaduras	$3,0 \times 10^1$

Lo cual indica un adecuado pretratamiento para la inactivación de enzimas y por lo tanto un producto de calidad.

- Se realizó el diseño de un secador de bandejas, para la deshidratación de tomate a escala de laboratorio, mediante un escalamiento del secador usado en la experimentación (Estufa Binder con convección forzada). El secador diseñado cuenta con 5 bandejas, con una capacidad de 2,5 kg de materia prima

y un área de 0,36 m<sup>2</sup>, construida con acero inoxidable y aluminio para los revestimientos internos y externos respectivamente y usando una capa aislante de poliestireno expandido.

Se debe aclarar que el diseño realizado, si bien por sus dimensiones y capacidad de materia prima a secar no puede ser usado a escala industrial, puede ser considerado como un prototipo para el diseño de un secador de bandejas de mayores dimensiones, si en el mismo se consideran otras variables que son atribuibles a secadores de bandejas a escala industrial, tales como: extracción de aire, rotación de bandejas, velocidad uniforme dentro de la cámara de secado, etc.

Por lo cual el diseño expuesto sirve como base para el diseño de un secador de bandejas a escala de laboratorio o industrial ya sea para frutas u otros alimentos, tomando en cuenta las condiciones de secado necesarias.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Realizar futuros proyectos de investigación con la variedad de tomate “manzano” para promover el consumo de tomate deshidratado en Tarija.
- Se recomienda el uso de bolsas de polietileno de mayor espesor para el envasado al vacío para evitar cortes en las mismas producidos por consistencia crocante del tomate deshidratado.
- Una forma de evitar que el tomate deshidratado se rehidrate con la humedad del ambiente, debido a los cortes que se producen en las bolsas de polietileno, es envasarlo y almacenarlo en envases de distintos materiales, vidrio por ejemplo, ya que investigaciones afirman que el consumo de tomate deshidratado en aceite de oliva se ha incrementado en los últimos años.

- Se recomienda la experimentación de deshidratación de tomate con diferentes cortes y espesores del mismo, para una evaluación de las propiedades del producto.
- Para evitar colores indeseables en el producto final se debe tratar al tomate con especial cuidado evitando golpes y magulladuras, lo cual derivaría en tomate deshidratado de mala calidad.
- Se recomienda futuras investigaciones de elaboración de tomate deshidratado con distintos conservantes, tales como el ácido cítrico, ácido ascórbico y metabisulfito de potasio, así como la variación de sus concentraciones para la evaluación del producto final.
- Como se mencionó anteriormente las semillas desechadas en el proceso de deshidratación pueden ser utilizadas para la elaboración de abono orgánico, es por ello que se recomienda futuros proyectos de investigación para reutilizar dichas semillas.
- Para evitar la degradación de algunos componentes del tomate es recomendable un pretratamiento osmótico para reducir la humedad del tomate y así reducir el tiempo y/o la temperatura de secado.
- El uso del diseño del secador de bandejas esta propuesto a escala de laboratorio cuyas características se han especificado de acuerdo a la experimentación realizada para la deshidratación de tomate, algunas de estas características deben ser analizadas, y si se requiere modificadas, para el diseño de un secador de bandejas destinado a secar otro tipo de alimento u

otro material o si se requiere una mayor producción de tomate deshidratado (escala industrial).

