UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUIMICA Y AMBIENTAL

VALPARAISO - CHILE

"CARACTERIZACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE HARINA DE LOMBRIZ (*EISENIA FOETIDA*) OBTENIDA POR SECADO EN TAMBOR ROTATORIO Y LIOFILIZADOR"

Memoria presentada por:

ANDREA PAULINA MALDONADO CÁRDENAS

Como requisito para optar al Título de:

INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESORA GUÍA: Dra. Alejandra Urtubia

PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Sergio Almonacid

Agosto 2019

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, a Dios, por ser el autor de la felicidad en mi vida y darme la fortaleza y contención en todo lo que emprendo.

Agradecer a mi familia, mis padres y hermano, por su amor incondicional y esfuerzo inquebrantable por ver cumplidos mis sueños. A mis tíos y primos, por acompañarme en todo y alegrar cada momento.

Por ser esa familia que escogí, que me hace reír, pero también me corrige, mis amigos: Gabriela, Jimena, Marión, Víctor, Aldo, Lorena, Blanca, Cynthia, Camilo, Angélica, Laertes, Mercedes, Nicole y Robert, gracias por tanto!.

A los profesores que me guiaron en esta investigación. Profesora Alejandra, gracias por confiar en mi, por cada consejo que me entregó y siempre recibirme amablemente. Profesor Sergio, gracias por su buena disposición a atender cada una de mis dudas y el trato afable de siempre.

Dar las gracias a mi familia CENTI Viña del Mar, por acompañarme en todo y enseñarme a correr la carrera eterna.

RESUMEN

En el presente estudio, se implementó un proceso de producción de harina de lombriz utilizando dos tecnologías de secado, liofilizador y doble tambor rotatorio. En cada uno de ellos, se busca conocer las condiciones de operación apropiadas, que permitan obtener un producto estable, es decir, que sea consumible. Posteriormente, se comparó la cantidad y calidad de la harina de lombriz adquirida mediante ambas tecnologías, para determinar cual de ellas genera un menor impacto nutricional en el producto. Finalmente, se verificó la factibilidad de considerar la harina de lombriz como una fuente de proteínas para el ser humano.

En el liofilizador, se determinó el tiempo de duración del secado primario y la humedad al terminar dicha etapa, mientras que, en el secador doble tambor rotatorio, se desarrolló una relación semiempírica que permite conocer el tiempo y temperatura de secado a utilizar para obtener una harina con una humedad específica. A continuación, muestras de pasta de lombriz sin secar y de harina producida utilizando ambas metodologías de secado, fueron enviadas a laboratorios externos para realizar pruebas de proteína total y perfil de aminoácidos, cuyos resultados fueron comparados. Por último, se verificó que la harina de lombriz cumple con los requerimientos proteicos establecidos por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) y, además, se comparó su contenido de aminoácidos esenciales con el de las fuentes convencionales de proteína.

Se obtuvo que el tiempo de duración del secado primario en la liofilización es de 9,82 ± 0,17 [h], y al finalizar esta etapa, la humedad es de 6,92 ± 0,37 [%] base húmeda, generándose un producto estable. En tanto, de acuerdo a la relación semiempírica desarrollada para el secado en doble tambor rotatorio, al operar a 120 [ºC] por 70 [s] en dicho equipo se alcanza una humedad del 7[%] base húmeda. A partir de la harina de lombriz producida bajo las condiciones mencionadas, se tiene que el contenido de proteína total y aminoácidos es considerablemente mayor en la harina liofilizada, sin embargo, al utilizar secador doble tambor rotatorio se obtuvo un producto que igualmente cumple con los requisitos de consumo humano mínimo que establece la FAO y supera el contenido de los alimentos proveedores de proteína convencionales, por lo que se determinó que el método de secado más adecuado para la producción de harina de lombriz, desde el punto de vista proteico, es el doble tambor rotatorio, ya que a pesar de que genera una mayor desnaturalización de la proteína de la harina, su contenido sigue siendo importante, su utilización es más simple e involucra un menor costo de operación.

ABSTRACT

In the present study, a worm flour production process was implemented using two drying technologies, freeze dryer and double rotary drum. In each of them, it is sought to know the appropriate operating conditions, which allow obtaining a stable product. Subsequently, the quantity and quality of earthworm meal acquired through both technologies was compared to determine which of them generates a lower nutritional impact on the product. Finally, the feasibility of considering earthworm flour as a source of proteins for humans was verified.

In the freeze dryer, the duration of the primary drying time and the humidity at the end of said stage were determined, while, in the double rotary drum dryer, a semi-empirical relationship was developed that allows to know the drying time and temperature to be used to obtain a flour with a specific humidity. Next, samples of uncooked earthworm paste and flour produced using both drying methodologies were sent to external laboratories for total protein and amino acid profile tests, the results of which were compared. Finally, it was verified that the earthworm meal meets the protein requirements established by the FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) and, in addition, its content of essential amino acids was compared with that of conventional sources of protein.

It was obtained that the duration of the primary drying in the lyophilization is of $9{,}82 \pm 0{,}17$ [h], and when finalizing this stage, the humidity is of $6{,}92 \pm 0{,}37$ [% humid base], being generated a stable product. In the meantime, according to the semi-empirical relation developed for drying in double rotary drum, when operating at 120 ºC for 70 [s] in said equipment a humidity of 7[%] wet base is reached. From the worm flour produced under the aforementioned conditions, the total protein and amino acid content is considerably higher in the lyophilized flour, however, when using a rotary drum double dryer, a product was obtained that also meets the requirements of minimum human consumption that FAO establishes and exceeds the content of conventional protein supplier foods, so it was determined that the most appropriate drying method for the production of worm flour, from a protein point of view, is twice Rotary drum, because although it generates a greater denaturation of the flour protein, its content is still important, its use is simpler and involves a lower operating cost.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS 2

RESUMEN 3

ABSTRACT 4

ÍNDICE FIGURAS 8

ÍNDICE TABLAS 10

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 11

1.1 INTRODUCCIÓN 11
1.2 OBJETIVOS 12
1.2.1 PRINCIPAL 12
1.2.2 ESPECÍFICOS 12

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES 13

2.1 LOMBRICULTURA 13
2.1.1 IMPORTANCIA Y BENEFICIOS 13
2.1.2 LOMBRICULTURA EN CHILE Y EL MUNDO 14
2.2 LOMBRIZ 15
2.2.1 GENERALIDADES 15
2.2.2 ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DE LA LOMBRIZ 16
2.2.3 FUENTE ALIMENTICIA 18
2.2.4 REPRODUCCIÓN 18
2.2.5 CONDICIONES AMBIENTALES 19
2.2.6 HUMUS 21
2.3 HARINA DE LOMBRIZ 21
2.3.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN 21
2.3.2 COMPOSICIÓN 22
2.4 CONSUMO DE PROTEINAS 24
2.4.1 IMPORTANCIA 25
2.4.2 REQUERIMIENTOS PARA EL SER HUMANO 27
2.4.3 FUENTES DE PROTEÍNA 29
2.5 SECADO DE ALIMENTOS 30
2.6 LIOFILIZACIÓN 31
2.6.1 DEFINICIÓN 32
2.6.2 CONGELACIÓN 33
2.6.3 SECADO PRIMARIO 34
2.6.4 SECADO SECUNDARIO 38
2.6.5 COMPONENTES DEL LIOFILIZADOR 39
2.6.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS 40
2.7 TAMBOR ROTATORIO 41
2.7.1 DESCRIPCIÓN 41
2.7.2 COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO 41
2.7.3 FUNDAMENTOS DEL SECADO POR TAMBOR ROTATORIO 42

2.7.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS....44
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS....45
3.1 METODOLOGÍA GENERAL....45
3.2 MATERIA PRIMA....47
3.3 MATERIALES Y EQUIPOS....48
3.3.1 LOMBRICOMPOSTERA....48
3.3.2 MINIPIMER....48
3.3.3 CONGELADOR....49
3.3.4 LIOFILIZADOR....49
3.3.5 SECADOR TAMBOR ROTATORIO....50
3.3.6 TERMOCUPLA Y LECTOR DE TEMPERATURA....50
3.3.7 ESTUFA....51
3.3.8 BALANZA....51
3.5 DISEÑO DE EXPERIMENTOS....52
3.6 RECOLECCIÓN, PRETRATAMIENTO Y MOLIENDA....53
3.7 DETERMINAR PARÁMETRO DE OPERACIÓN LIOFILIZADOR....54
3.7.1 CALCULAR TIEMPO DE SECADO PRIMARIO....55
3.7.2 MEDIR HUMEDAD AL FINALIZAR EL SECADO PRIMARIO....56
3.8 DETERMINAR PARÁMETROS DE OPERACIÓN SECADOR TAMBOR ROTATORIO....57
3.8.1 CONSTRUIR CURVAS DE SECADO....58
3.8.2 ELABORAR RELACIÓN EMPÍRICA....58
3.9 COMPARACIÓN SECADO POR TAMBOR ROTATORIO Y LIOFILIZADOR....60
3.9.1 ANÁLISIS DE PROTEÍNA TOTAL....60
3.9.2 ANÁLISIS DEL PERFIL DE AMINOÁCIDOS....61
3.9.3 COMPARACIÓN MÉTODOS DE SECADO....62
3.10 JUSTIFICACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE HARINA DE LOMBRIZ COMO FUENTE DE PROTEÍNAS.62
3.6.11 VERIFICAR CUMPLIMIENTO REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS.....62
3.6.12 COMPARAR CON OTRAS FUENTES DE PROTEÍNA. 63
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN....64
4.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN LIOFILIZADOR....64
4.1.1 TIEMPO DE SECADO PRIMARIO....64
4.1.2 HUMEDAD AL FINALIZAR EL SECADO PRIMARIO....65
4.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN SECADOR TAMBOR ROTATORIO....66
4.2.1 CURVAS DE SECADO....66
4.2.2 RELACIÓN SEMIEMPÍRICA....68
4.3 ELECCIÓN MÉTODO DE SECADO....70
4.3.1 ANÁLISIS DE PROTEÍNA TOTAL....70
4.3.2 ANÁLISIS DEL PERIFIL DE AMINOÁCIDOS....71
4.3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO....73
4.4 HARINA DE LOMBRIZ COMO FUENTE DE PROTEÍNA....75
4.4.1. CUMPLIMIENTO REQUISITOS DE LA FAO....75
4.4.2 VENTAJAS RESPECTO A UNA FUENTE CONVENCIONAL DE PROTEÍNA....77
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....79

CONCLUSIONES....79
RECOMENDACIONES....79
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS....81
CAPÍTULO 8: ANEXOS....85
8.1 RESULTADO ANÁLISIS PROTEÍNA TOTAL....85
8.2 RESULTADOS PERFIL DE AMINOÁCIDOS....85
8.2.1 HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR TAMBOR ROTATORIO....85
8.2.2 HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR LIOFILIZADOR....86
8.2.3 PASTA DE LOMBRIZ SIN SECAR....87
8.3 COMPARATIVO PERFIL DE AMINOÁCIDOS....88
8.3.1 RESPECTO A LOS REQUISITOS DE LA FAO....88
8.3.2 RESPECTO A FUENTES CONVENCIONALES DE PROTEÍNA....88

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 CORTE TRANSVERSAL EISENIA FOETIDA. FUENTE: (Díaz, 2002) 16
Figura 2 APARATO DIGESTIVO. FUENTE: (Díaz, 2002)....17
Figura 3 CICLO REPRODUCTIVO DE LAS LOMBRICES EISENIA FOETIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....19
Figura 4 LOMBRICOMPOSTERA QUE OPERA EN CONTINUO. FUENTE: (Chaoui, 2010).....20
Figura 5 COMPARACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA HARINA DE LOMBRIZ RESPECTO A OTROS PRODUCTOS ANIMALES. FUENTE: (Oonincx y De Boer, 2012). 25
Figura 6 DIAGRAMA DE FASES DE AGUA. FUENTE: (Ratti, 2013). 32
Figura 7 ESQUEMA ETAPAS PROCESO LIOFILIZACIÓN. A) CONGELACIÓN; B) SECADO PRIMARIO; C) SECADO SECUNDARIO. FUENTE: (Kharaghabi et al., 2017). 33
Figura 8 ESQUEMA DE UN PRODUCTO PARCIALMENTE LIOFILIZADO MEDIANTE RADIANCIÓN Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN UN MOMENTO DETERMINADO DEL SECADO PRIMARIO. FUENTE: (Kharaghabi et al,. 2017). 35
Figura 9 COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS ASOSIADOS A LA LIOFILIZACIÓN. FUENTE: (Babic et al, 2009) 36
Figura 10 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRANSPORTE DEL AGUA LIGADA EN UNA MATRIZ POROSA DURANTE LA ETAPA DEL SECADO SECUNDARIO. FUENTE: (Kharaghabi et al., 2017).....38
Figura 11 ESQUEMA ESTRUCTURA LIOFILIZADOR. FUENTE: (Ratti, 2013)....39
Figura 12 ESQUEMA SECADOR TAMBOR ROTATORIO DOBLE. FUENTE: (Gavrielidou et al., 2002) 42
Figura 13 TEMPERATURA DEL PRODUCTO Y DE LA SUPERFICIE DEL TAMBOR DURANTE UNA REVOLUCIÓN DE SECADO POR TAMBOR ROTATORIO EN TRES DIFERENTES PERIODOS. FUENTE: (Bonaui et al. 1996)....43
Figura 14 ESQUEMA PROCESO PRODUCCIÓN HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 45
Figura 15 ESQUEMA METODOLOGÍA GENERAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 46
Figura 16 LOMBRIZ ADULTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 47
Figura 17 BALANCE DE MATERIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 47
Figura 18 LOMBRICOMPOSTERAS....48
Figura 19 MINIPIMER. 48
Figura 20 CONGELADOR. 49
Figura 21 LIOFILIZADOR. 49
Figura 22 INTERFAZ SOFTWARE LPC PLUS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA....49
Figura 23 SECADOR DOBLE TAMBOR ROTATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA....50
Figura 24 TERMOCUPLA Y LECTOR DE TEMPERATURA....50
Figura 25 ESTUFA MEMEMERT. 51
Figura 26 BALANZA. 51
Figura 27 ESQUEMA DISEÑO DE EXPERIMENTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 52
Figura 28 LOMBRICES RECOLECTADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 53
Figura 29 PRETRATAMIENTO LOMBRICES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 53
Figura 30 MOLIENDA LOMBRICES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 54
Figura 31 SECADO PRIMARIO POR LIOFILIZACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 55
Figura 32 CURVA DE CRECIMIENTO. FUENTE: (Zwietering et al., 1990) 56
Figura 33 MUESTRAS SECADAS POR LIOFILIZADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 57

Figura 34 SECADO POR TAMBOR ROTATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 58
Figura 35 PRODUCCIÓN DE PTC AMINO ÁCIDO. FUENTE: (White et al., 1986) 61
Figura 36 TEMPERATURA DEL PRODUCTO en el tiempo DURANTE el SECADO PRIMARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....64
Figura 37 SECADO PRIMARIO HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 65
Figura 38 HUMEDAD (BASE HÚMEDA) V/S TIEMPO A 110 [ºC], 120 [ºC] Y 130 [ºC]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....67
Figura 39 HUMEDAD (BASE SECA) V/S TIEMPO A 110 [ºC], 120 [ºC] Y 130 [ºC]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....68
Figura 40 GRÁFICA LN(K) V/S 1/T. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 69
Figura 41 GRÁFICA HUMEDAD DE EQUILIBRIO V/S TEMPERATURA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 70
Figura 42 CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN TRES MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....73
Figura 43 REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS Y SU CONTENIDO EN LA HARINA DE LOMBRIZ CADA 100 [G] DE PROTEÍNA CONSUMIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 76
Figura 44 CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN 100 [G] DE PRODUCTO EN DISTINTAS FUENTES DE PROTEÍNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 77

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 REFERENCIAS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....23
Tabla 2 REFERENCIAS DEL CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN LA HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....23
Tabla 3 LISTADO DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES Y NO ESENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA 26
Tabla 4 INGESTA RECOMENDADA DE PROTEÍNA. Fuente: (Burges and Glasauer 2006) 28
Tabla 5 REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (WHO/FAO/UNU 2007).....29
Tabla 6 PORCENTAJE DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES CONSTITUYENTES DE VARIAS PROTEÍNAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (Braekkkan, 1976) 30
Tabla 7 COMPARACIÓN DEL SECADO CONVENCIONAL CON LA LIOFILIZACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....40
Tabla 8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO POR TAMBOR ROTADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (Heldman and Moraru 2000). 44
Tabla 9 TIEMPO DE SECADO PRIMARIO PARA DOS MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 64
Tabla 10 HUMEDAD AL FINALIZAR EL SECADO PRIMARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 66
Tabla 11 VALORES EXPERIMENTALES DE LA HUMEDAD EN EL TIEMPO A UNA DETERMINADA TEMPERATURA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 66
Tabla 12 VALOR CONSTANTE CINÉTICA A 110[ºC], 120[ºC] Y 130[ºC]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 68
Tabla 13 PARÁMETROS ECUACIÓN DE ARRHENIUS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 69
Tabla 14 [G/100 G MASA SECA] PROTEÍNA TOTAL EN 3 MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 70
Tabla 15 [G AA RECUPERADOS /100 G MASA SECA] AMINOÁCIDO EN TRES MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....71
Tabla 16 [G AA/100 G MASA SECA] AMINOÁCIDO EN TRES MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 72
Tabla 17 DIFERENCIA CONTENIDO DE PROTEÍNA TOTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 73
Tabla 18 DIFERENCIAS EN EL CONTENIDO DE AMONIÁCIDOS ENTRE LA PASTA DE LOMBRIZ (SIN SECAR), HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR TAMBOR ROTADOR Y HARINA DE LOMBRIZ LIOFILIZADA.FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 74
Tabla 20 RESULTADO ANÁLISIS PROTEÍNA TOTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 85
Tabla 21 RESULTADO ANÁLISIS PERFIL DE AMINOÁCIDOS HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR DOBLE TAMBOR ROTADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....85
Tabla 22 RESULTADO PERFIL DE AMINOÁCIDOS HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR LIOFILIZADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 86
Tabla 23 RESULTADO PERFIL DE AMINOÁCIDOS PASTA DE LOMBRIZ SIN SECAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....87
Tabla 23 REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS Y SU CONTENIDO EN LA HARINA DE LOMBRIZ CADA 100 [G] DE PROTEÍNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 88
Tabla 24 CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN 100 [G] DE PRODUCTO EN DISTINTAS FUENTES DE PROTEÍNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. 88

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Las proteínas son moléculas que encierran una veintena de aminoácidos, y su consumo es indispensable para el organismo de los seres humanos, debido a que son necesarias para su crecimiento, desarrollo y mantenimiento, y para reparar y reemplazar los tejidos gastados o dañados, así como también para producir enzimas metabólicas y digestivas, además de ser un componente esencial de ciertas hormonas (FAO, 2018). Actualmente la principal fuente de proteínas es la carne tradicional, sin embargo, cabe señalar que el sector ganadero ocupa alrededor del 70% del terreno agrícola y el 30% de la superficie total del planeta (Steinfeld et al., 2009). Lo anterior representa un problema debido a que a medida que crece la población, la demanda de proteínas aumenta, y junto con ello el requerimiento de carne, mientras que la cantidad de tierra disponible es fija y limitada; por otro lado, el sector ganadero es el principal responsable de las emisiones de gas invernadero, constituyendo aproximadamente el 18% del total de ellas (Steinfeld et al., 2009), y es además, el principal contribuyente al calentamiento global.

En el 2050 el mundo tendrá que alimentar a más de 9.000 millones de personas (FAO, 2013), y la FAO estima que satisfacer la demanda de proteínas mediante carne tradicional no es una opción viable. Para hacer frente a esta problemática los expertos de la ONU sostienen que lo que comemos debe ser revaluado, y es ahí donde se recomienda incluir insectos en la dieta humana por su alto contenido de proteínas (FAO, 2013). Al respecto, la harina deshidratada de lombriz de la especie *Eisenia foetida* representa una alternativa sobresaliente, ya que estudios científicos muestran que contiene una concentración de proteínas mayor al 60% p/p en base seca (Velasquez et al., 1986) y proporciona aminoácidos esenciales para la dieta humana, además de poseer ácidos grasos esenciales y micronutrientes como el hierro y el calcio (Vielma et al., 2007); su obtención es ventajosa debido a que las lombrices se alimentan de desechos orgánicos, crecen a una alta velocidad y se multiplican rápidamente.

La producción de harina de lombriz requiere de las siguientes etapas: Pre tratamiento, molienda y secado, siendo esta última la más crítica debido a factores como el tiempo y requerimiento energético; además de ser determinante en la calidad nutricional del producto, ya que, dependiendo de las condiciones utilizadas, algunas proteínas o aminoácidos se podrían desnaturalizar (Alcívar-

Cedeño et al., 2016). Hoy se reconoce que el secado por liofilización evita en gran medida estas pérdidas nutricionales, sin embargo, es una técnica más costosa y lenta que otras metodologías tradicionales de secado (Ratti, 2013).

Con el propósito de considerar una fuente alternativa de proteínas, distinta a las convencionales que provienen de la ganadería, se estudia la proteína contenida en la harina de lombriz, para ello, en el presente trabajo, se evalúa la influencia del secado en la cantidad y calidad de los aminoácidos presentes en la harina de lombriz producida, proceso que se realiza mediante liofilizador y un método tradicional de secado, doble tambor rotatorio. Con este fin, primeramente, se buscan las condiciones de operación adecuadas para el secado mediante ambos métodos; por un lado, para el liofilizador, se obtiene el tiempo de secado primario a partir del cálculo del punto de inflexión de la temperatura del proceso, para así determinar la humedad del producto al finalizar dicho proceso, mientras que, con el secador en tambor rotatorio, se establece una relación semiempírica para poder establecer la temperatura y tiempo de operación requeridos para conseguir una humedad específica en el producto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 PRINCIPAL

Caracterizar y estabilizar la harina de lombriz obtenida por secado en tambor rotatorio y liofilización, con el propósito de evaluar el efecto de estos métodos en la cantidad y calidad de la proteína que contiene.

1.2.2 ESPECÍFICOS

- Desarrollar una relación semiempírica que permita conocer la temperatura y tiempo de operación en el secador doble tambor rotatorio, para obtener una humedad específica.
- Determinar el tiempo de duración del secado primario en la liofilización y obtener la humedad al finalizar dicha etapa.
- Evaluar la utilización de secador tambor rotatorio o liofilizador para la producción de harina de lombriz, considerando el contenido de proteína total y perfil de aminoácidos del producto.
- Verificar la conveniencia de considerar a la harina de lombriz como una fuente alternativa de proteínas.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

2.1 LOMBRICULTURA

2.1.1 IMPORTANCIA Y BENEFICIOS

Actualmente se le reconoce como un recurso biotecnológico de elevado interés ecológico y nutricional (Velasquez, Herrera, & Ibañez, 1986). La lombricultura es una biotecnología que consiste en una serie de operaciones relacionadas con la cría y producción de lombrices (Carrera, 1920), que utiliza principalmente una especie de lombriz domesticada denominada *Eisenia foetida*, con dos objetivos principales, primero como una alternativa de reciclaje de desechos orgánicos de diferentes fuentes, y segundo, como una fuente de proteína no convencional. Las lombrices, transforman la materia orgánica en un abono llamado humus, fertilizante orgánico y ecológico de alta calidad, que no daña el ecosistema y reduce el uso indiscriminado de fertilizantes químicos (Díaz, 2002); por otro lado, debido a su alta tasa reproductiva, nos proveen de carne que puede transformarse en harina, la cual se caracteriza principalmente por un elevado contenido de proteínas, además posee lípidos ricos en ácidos grasos esenciales, minerales y fibra (Vielma Rondon et al., 2003); lo que le permite ser utilizada como fuente nutritiva para el consumo animal y humano.

A continuación, se listan algunos de los beneficios que presenta la lombricultura:

- Aprovecha los residuos, tanto de la unidad de producción (cultivos y animales) como de los desechos orgánicos de cocina de la familia.
- Es un proceso limpio, socialmente aceptable y con poco o nada de olor.
- No requiere energía para la aireación.
- Esta explotación, puede ser manejada por niños y/o adultos indistintamente, ya que es hacedera y no depara ningún tipo de enfermedad potencial.
- Esta actividad puede desarrollarse como microemprendimiento o a gran escala.
- La cría de lombrices no requiere grandes inversiones, espacios, infraestructura ni tiempo.
- La práctica de la lombricultura directa o indirectamente, ayuda a mejorar la calidad de los suelos de manera natural y económica.
- De la Lombriz, se pueden obtener otros productos para la industria farmacéutica (Diaz, 2002).

2.1.2 LOMBRICULTURA EN CHILE Y EL MUNDO

El rol de las lombrices en el mejoramiento de las tierras de cultivo era muy conocido y respetado en el antiguo Egipto, pues sabían que gran parte de la fertilidad del Valle del Nilo dependía de ellas. Años más tarde, Aristóteles las definió como "los intestinos de la tierra" por su movilidad dentro del suelo y los beneficios que producía en ellos.

Posteriormente, en 1881, Charles Darwin escribió el libro "La formación de la tierra por la acción de las lombrices". Esta obra, sería el inicio de una serie de investigaciones que hoy han transformado la lombricultura en una actividad de alta importancia, convirtiéndose Darwin en el padre de la lombricultura.

Hug Carter en 1947 inicia su propio criadero en California, Estados Unidos, con la particularidad de que empleó una especie diferente de lombriz, la *Eisenia foetida* o también conocida como roja californiana que, por razones de crianza, reproducción y la variedad de desechos orgánicos que ingiere, es considerada la especie más adecuada para el desarrollo del lombricultivo. Al mismo tiempo, Carter supo aplicar las técnicas modernas de esta disciplina que, con ligeras variantes, siguen vigentes hasta la actualidad.

Hoy en día, en el continente asiático, las lombrices se valoran de manera justa de acuerdo a sus potencialidades, de echo, son conocidas como los "dragones de tierra". Se han utilizado en medicina tradicional y como fuente alimenticia en China, Japón y otros países del sector por cientos de años (Wang et al., 2013). Mientras que, Filipinas es uno de los mayores productores de harina de lombriz para consumo humano, ya que la ausencia de olor y sabor la hace competitiva con la harina de pescado, tanto en calidad como en precio.

En Latinoamérica, la lombricultura se desarrolla principalmente con el fin de generar humus. Los países productores más relevantes son: Brasil, Colombia, Argentina, Ecuador y Cuba; aunque en casi todos los otros países, en menor escala, esta actividad también es dada. Particularmente en Cuba, la actividad política-económica impidió seguir importando fertilizantes químicos, lo que impulsó el desarrollo de la lombricultura a gran escala (Carrera, 1920), y hoy el humus se aplica en cultivos de tabaco, café, hortalizas y verduras, además las lombrices se emplean como una fuente de proteína animal y se investigan aspectos farmacológicos como la obtención de proteasas.

La lombricultura en nuestro país, aún no es considerablemente difundida, a pesar de ser una disciplina en expansión, pues, principalmente se desarrolla para la obtención de humus, y la demanda de biofertilizantes está en aumento. También se destaca el uso de la lombriz como lombrifiltro o biofiltro, el cual fue creado por el investigador de la Universidad de Chile, Dr. José Tohá, a mediados de los 90; este sistema, se encarga de tratar las aguas residuales a través de las lombrices, y cuenta con una serie de ventajas respecto a los sistemas convencionales, por lo que en Chile se está implementando en más de 200 proyectos y se ha exportado a países como Japón, Estados Unidos, Canadá, Argentina, entre otros. En tanto, respecto a la harina de lombriz, se han iniciado investigaciones, pero es aún es un tema en desarrollo.

2.2 LOMBRIZ

Existen más de 8.000 especies de lombrices, de ellas, las más empleadas para la lombricultura son: roja californiana (*Eisenia foetida*), roja africana (*Eudrilus eugeniae*), roja de Taiwan (*Perionyx excavatus*) y roja nocturna (*Lombricus rabellus*) (Carrera, 1920). Sin embargo, la lombricultura utiliza la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) para desempeñar sus labores. La elección se debe a que posee un corto ciclo reproductivo, presenta elevada frecuencia de apareamiento, es voraz y acepta gran variedad de alimentos orgánicos, es rápida para producir humus y lo hace en gran volumen, es dócil para la cría en ambientes reducidos y se adapta a diferentes tipos de clima.

2.2.1 GENERALIDADES

TAXONOMÍA

Reino: Animal
División: Anélidos
Clase: Clitelados
Orden: Oligoquetos
Familia: Lombrícidos
Género: Eisenia
Especie: Foetida (Díaz, 2002)

CARACTERÍSTICAS GENERALES

- En estado adulto llega a medir entre 9 y 30 cm de largo tienen una masa entre 0,75 y 1,2 g.
- Viven aproximadamente 16 años.
- No se enferman ni transmiten enfermedades.
- No poseen pulmones, respiran por la piel.
- Son fotofóbicas, los rayos ultravioletas las matan en poco tiempo.
- Se alimentan mediante succión, ya que no tienen dientes.
- Su color va de blanco rosa a rojo oscuro en la adultez.
- La lombriz puede regenerar segmentos perdidos, pero solo si la lesión afecta la última porción del intestino, en caso de comprometer la región anterior, la lombriz muere.
- Se compone en un 80% de agua y el 20% restante corresponde a materia seca. (Díaz, 2002)

2.2.2 ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DE LA LOMBRIZ

El cuerpo de la lombriz es cilíndrico, y se caracteriza por presentar una división externa y otra interna. Está constituido por entre 80 y 120 anillos, unidos en forma de segmentos. Para una mejor comprensión, en la Figura 1 se muestra un corte transversal de la lombriz *Eisenia foetida*, y a continuación se describen sus partes y fisiología.

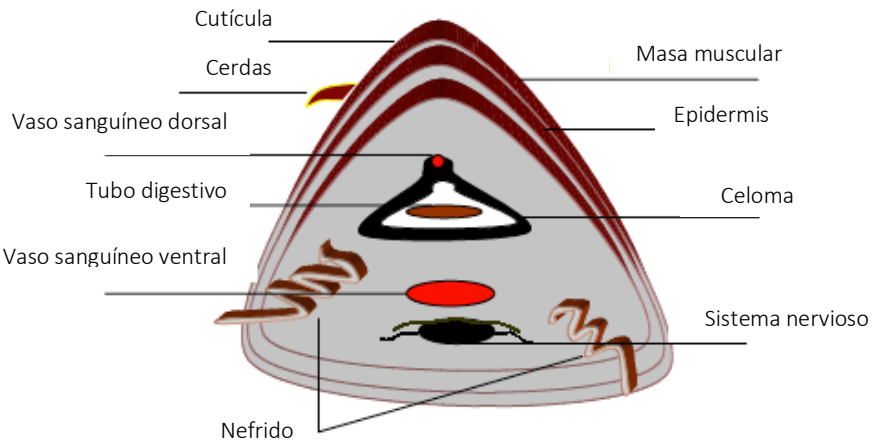


FIGURA 1 CORTE TRANSVERSAL EISENIA FOETIDA. FUENTE: (DÍAZ, 2002)

- Cutícula: Lámina delgada cruzada por fibras que permite la respiración.
- Epidermis: Epitelio simple con células glandulares que están encargadas de producir mucus y sustancias cerosas.
- Capas musculares: Una circular externa y otra longitudinal interna.
- Peritoneo: Limita exteriormente al celoma de la lombriz.
- Celoma: Cavidad que contiene líquido celómico, el cual se expulsa ante el peligro. Se extiende a lo largo del animal y envuelve el canal alimenticio.
- Tubo digestivo: Corre desde la boca al ano. (Díaz, 2002)

SISTEMA DIGESTIVO

El alimento se introduce por la boca y es succionado por la faringe, luego pasa al papo a través del esófago, que posee partículas minerales y donde mediante el movimiento muscular muele la materia orgánica digerida, y continúa hacia la molleja, detrás de la cual comienza el intestino, donde ocurre la digestión y la absorción de los alimentos.

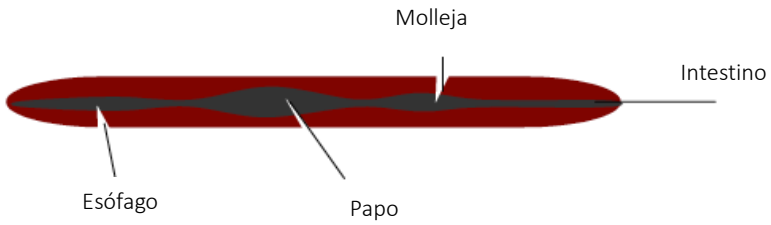


FIGURA 2 APARATO DIGESTIVO. FUENTE: (DÍAZ, 2002)

En el intestino de la lombriz ocurren procesos de fraccionamiento, desdoblamiento, síntesis y enriquecimiento enzimático microbiano, lo cual tiene como consecuencia un aumento significativo en la velocidad de degradación y mineralización del residuo, obteniendo un abono de alta calidad.

SISTEMA CIRCULATORIO

Entre el comienzo del aparato digestivo y la pared corporal existen pares de vasos sanguíneos que impulsan líquido sanguíneo. La sangre absorbe oxígeno y alimentos del intestino, elimina residuos solubles en los riñones y libera gas carbónico por la piel.

SISTEMA RESPIRATORIO

No tiene pulmones. La respiración se realiza a través de la piel. Las escasas distancias que existen entre la piel y las células de otros tejidos u órganos, aseguran el transporte de los gases respiratorios a través de la sangre sin dificultad.

SISTEMA NERVIOSO

Tiene dos ganglios dorsales supraesofágicos, de los cuales parten dos tiras laterales dirigidas hacia atrás y hacia abajo a otros dos ganglios subesofágicos, unidos también por una comisura transversal. Este sistema les permite percibir sensaciones de humedad, tacto, temperatura y luminosidad, que generan reacciones en el sistema muscular modificando su comportamiento.

SISTEMA MUSCULAR

Está provisto de una serie de fibras externas circulares o transversas de músculo, que rodean el cuerpo, y una serie interna de fibras musculares longitudinales que sirven para mover las cerdas.

2.2.3 FUENTE ALIMENTICIA

El principio general de la alimentación de las lombrices consiste en proveerlos de desechos orgánicos, los cuales pueden provenir de las actividades agropecuarias, basuras de mercado y/o desechos orgánicos industriales; de esta forma la lombricultura es parte de la solución en la problemática de la contaminación medioambiental.

La lombriz es un animal que no posee dientes, por lo que se recomienda que el alimento que se le suministra no sea duro, o bien, se encuentre compostado, y tenga siempre una humedad entre 70% y 80% para facilitar su succión (Sales Dávila, 1996).

Una lombriz *Eisenia foetida* adulta come diariamente un equivalente al 75% de su peso, de lo cual excreta un 60% en forma de abono, mientras que el 40% restante es asimilado y se convierte en biomasa de lombriz (Sales Dávila, 1996).

2.2.4 REPRODUCCIÓN

Las lombrices son hermafroditas incompletas, es decir, están dotadas de órganos sexuales masculinos y femeninos, sin embargo, son incapaces de autofecundarse, y se reproducen recíprocamente por fecundación cruzada (Díaz, 2002).

En la Figura 3, se observa el ciclo de reproducción de la lombriz. Alcanzan la madurez sexual a los 3 meses, cuando se ha de haber formado el clitelio, el cual está situado en el tercio anterior de la lombriz, y está dotado de una glándula que se encarga de secretar las sustancias que forman cápsulas

de paredes resistentes, donde se incuban las lombrices fecundadas, llamadas cocones. Al producirse la fecundación, después de 3 días, depositan en el lugar donde habitan 3 cocones, del que luego de 21 días de incubación, emergen de 3 a 21 lombrices pequeñas, sin embargo, debido a su alta sensibilidad al medio, solo de 2 a 7 serán capaces de nutrirse y llegar a ser adultas (Sales Dávila, 1996).

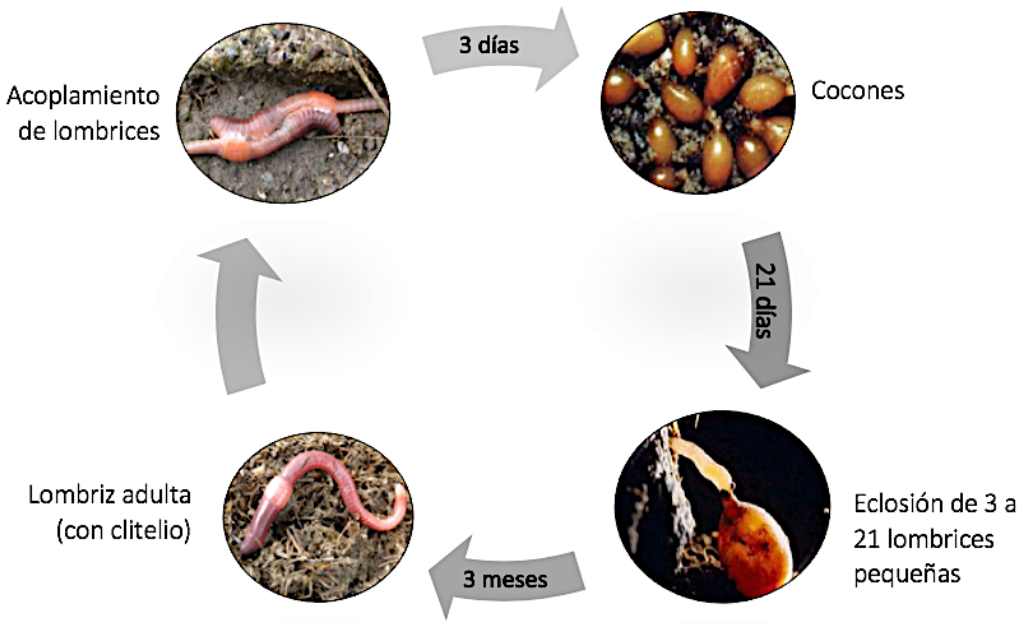


FIGURA 3 CICLO REPRODUCTIVO DE LAS LOMBRICES EISENIA FOETIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Bajo condiciones óptimas del entorno, se estima que una lombriz podría llegar a reproducir 1500 lombrices en un año. Por lo tanto, 1.000 lombrices al cabo de un 1 año se habrán multiplicado y podrían llegar a haber aproximadamente 15.000.000; las que podrían transformar 11,25 toneladas de residuos orgánicos al día y producirían 9 toneladas de humus en el mismo período.

2.2.5 CONDICIONES AMBIENTALES

En la lombricultura, la lombriz vive en lechos o cúmulos de desechos orgánicos que constituyen su casa y su alimento. Pueden funcionar como un sistema por lotes o continuo. En el primero, los residuos se introducen en el mismo recipiente de las lombrices, por lo que el humus se recolecta desde el mismo espacio, mientras que en el segundo (ver Figura 4), se dispone de un compartimiento en la parte superior donde se ponen los residuos orgánicos, de tal manera que las lombrices migran hacia él para alimentarse, y al mismo tiempo abandonan el comportamiento inferior permitiendo recoger el humus presente. Además, ambos sistemas cuentan con una casilla inferior como receptora

del lixiviado resultante del exceso de humedad, este lixiviado igualmente se utiliza y comercializa como un fertilizante.

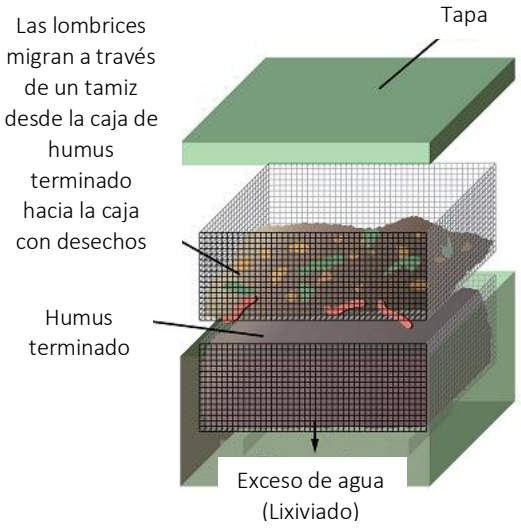


FIGURA 4 LOMBRICOMPOSTERA QUE OPERA EN CONTINUO. FUENTE: (CHAOUI, 2010).

- HUMEDAD

La humedad apropiada es del 75%. Las lombrices toman el alimento mediante succión, por lo que la falta de humedad imposibilita dicha operación. En tanto, la humedad nunca debe ser mayor al 85% puesto que el exceso de humedad origina empapamiento y una oxigenación deficiente (Chaoui, 2010).

- TEMPERATURA

El rango óptimo de temperatura está entre 0-25ºC. Se recomienda dejar el recipiente en interiores de tal forma que se mantenga protegido de las fluctuaciones de la temperatura del ambiente (Chaoui, 2010).

- AIREACIÓN

Es fundamental para la correcta respiración y desarrollo de las lombrices. La falta de aireación puede provocar la fermentación de los alimentos, y esto a su vez genera malos olores y exceso de calor, reduciendo el consumo de alimentos, además del apareamiento y reproducción (Chaoui, 2010).

- PH

El pH es un factor que depende de la humedad y la temperatura, por lo tanto si estos factores se mantienen controlados adecuadamente, el pH se mantendrá en un nivel adecuado siempre y cuando el sustrato contenga pH alcalinos entre 5 y 8,4 (Sales Dávila, 1996).

2.2.6 HUMUS

El Humus es un abono 100% orgánico y es originado por la descomposición de materia orgánica en el interior de las lombrices. Este producto, sumado a la expulsión de microorganismos y a la acción de los compuestos húmicos generados, funcionan como cementante de partículas primarias del suelo, mejorando su estructura y porosidad, retención de agua, infiltración y la capacidad de penetración de las raíces, lo que favorece el crecimiento de la vegetación; además, el humus mejora el tamaño, color, sabor y olor de flores, frutas, verduras y granos alimenticios.

Son estos efectos por los que el humus es considerado como un fertilizante de alta calidad. Se ha demostrado que es aproximadamente cuatro veces más nutritivo que el compost tradicional y que al aplicarlo, genera de 30 a 40% mayor productividad que los fertilizantes químicos y es aproximadamente 75% más económico que los mismos.

2.3 HARINA DE LOMBRIZ

Según la investigación realizada por Dynes (2003), donde se elaboró harina a partir de distintas especies de lombriz, la que resulta con un contenido mayor de proteínas es la lombriz roja californiana *Eisenia foetida*; además, esta especie de lombriz posee una alta tasa reproductiva y una rápida velocidad de crecimiento, otorgando una gran cantidad de biomasa para transformarse en harina.

2.3.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN

Para el proceso productivo de la harina de lombriz, se reconocen variadas metodologías de acuerdo a las distintas referencias que han abarcado el tema.

Ishii et al. (2009) implementó un proceso que consiste en que las lombrices recolectadas se colocan vivas en una caja plana bajo la luz entre 10 y 50 horas, y al finalizar, la suciedad remanente de la piel se quita con una tela. Luego las lombrices se ponen en contacto con una solución de agua y ácido orgánico cuyo pH se encuentra entre 2 y 5, por un tiempo de 3 a 180 minutos. El lavado se acaba al

sumergir las lombrices en un baño de agua con micro nano burbujas. A continuación, las lombrices se muelen en una trituradora para luego ingresar al secado mediante liofilizador. El proceso culmina con un tratamiento de calor a una temperatura entre 110 y 130ºC entre 60 y 90 minutos para esterilizar la harina.

De acuerdo a Sales Dávila (1996), para la elaboración de la harina recolectan las lombrices del compost y se colocan en un tamiz y se lavan con agua de caño para retirar los residuos que las rodean. Posteriormente, los anélidos se introducen en salmuera cuya concentración se encuentra entre 4 y 5% por unos 10 minutos. Para terminar la limpieza, las lombrices se lavan nuevamente con agua de caño para quitar los residuos desprendidos de la salmuera. Las lombrices finalmente se secan en un horno y luego se muelen con un mortero para obtener el producto final, el cual envasado en bolsas de polietileno bajo vacío.

El procesos para Vielma Rondon et al. (2003), consiste en que las lombrices apartadas de su medio se lavan profusamente y luego se conservan durante 24 horas en un recipiente que contenga agua e insuflación de aire. Una vez finalizada la limpieza, se congelan e ingresan a un liofilizador. Luego el producto seco se muele hasta obtener un producto harinoso.

En tanto, en la investigación desarrollada por Boulogne et al. (2008), después de cosechar las lombrices, se eliminan los restos de compost de las lombrices con una corriente de agua para posteriormente colocarlas en bañeras con agua a 19ºC con insuflación de aire por 18 horas. El lavado termina eliminando los últimos residuos de compost con una corriente de agua. Los anélidos son sacrificados con agua a 100ºC por 1 minuto, finalmente se secan y muelen.

2.3.2 COMPOSICIÓN

La harina de lombriz, por su composición química, representa una importante alternativa nutricional. En la Tabla 1 se entrega el contenido de proteína cruda, lípidos, cenizas y fibra de la harina de lombriz *Eisenia foetida* liofilizada, entregada por distintos investigadores, en tanto, la cantidad de aminoácidos esenciales se muestra en la Tabla 2, mientras que la cantidad de los no esenciales se encuentran en la Tabla 3.

TABLA 1 REFERENCIAS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	Concentración componente [g/100 g muestra seca]			
Componente	(Medina et al., 2003)	(Busisiwe et al., 2016)	(Vielma y Medina, 2006)	(Zhenjun et al., 1996)
Proteína cruda	61,85	66,2	60,38	54,6
Lípidos	11,13	10	10,16	7,34
Cenizas	8,7	-	8,74	21,2
Fibra	-	-	1,75	-

TABLA 2 REFERENCIAS DEL CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES EN LA HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	Concentración aminoácido [g /100 g proteína]		
Aminoácido	(Dynes, 2003)	(Vielma Rondon et al., 2003)	(Medina & Araque, 1999)
Esencial			
Lisina	6,8	4,3	12,51
Histidina	2,6	2,5	2,51
Valina	4,7	-	6,14
Metionina	-	-	1,53
Isoleucina	4,3	6,2	4,73
Leucina	7,2	16,6	7,39
Treonina	5,2	3,6	3,76
Triptófano	-	-	0,29
Arginina	6,0	-	7,03
Fenilalanina	3,8	3,53	3,54

TABLA 3 REFERENCIAS DEL CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS NO ESENCIALES EN LA HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	Concentración aminoácido [g /100 g proteína]		
Aminoácido	(Dynes, 2003)	(Vielma Rondon et al., 2003)	(Medina & Araque, 1999)
No esencial			
Ácido aspártico	8,9	7,1	11,01
Serina	4,7	0,9	3,30
Ácido glutámico	16,4	9,0	13,57
Prolina	4,0	-	4,47
Glicina	5,8	5,7	5,22
Alanina	6,0	4,1	5,54
Cisteína	-	-	4,23
Tirosina	3,3	0,9	3,23
Asparagina	-	-	-
Glutamina	-	-	-

2.4 CONSUMO DE PROTEINAS

El consumo de proteínas por parte de los seres humanos es esencial para su desarrollo y funcionamiento. Esto representa una preocupación en los expertos, debido a que actualmente los alimentos utilizados convencionalmente como fuentes de proteína provienen del sector ganadero, el cual es el principal contribuyente en el calentamiento global y ocupa grandes cantidades de tierra que, al crecer esta industria, y los terrenos disponibles ser fijos y limitados, llegará el punto donde no podrá cubrir la demanda para satisfacer de proteína a toda la población mundial. Ante lo anterior, surge como alternativa la incorporación de harina de lombriz en la dieta humana, cuyo impacto medioambiental es significativamente menor, como se observa en la Figura 5.

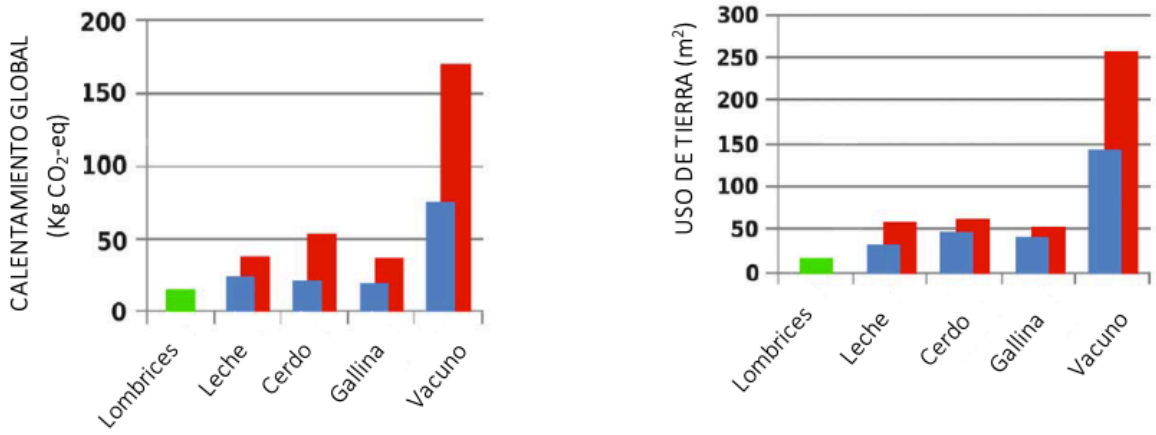


FIGURA 5 COMPARACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DE LA HARINA DE LOMBRIZ RESPECTO A OTROS PRODUCTOS ANIMALES. FUENTE: (OONINCX Y DE BOER, 2012).

2.4.1 IMPORTANCIA

Las proteínas son grandes moléculas conformadas por aminoácidos que se encuentran unidos entre sí mediante cadenas de aminas. Su principal diferencia respecto de los otros macronutrientes es que contienen nitrógeno, pues, los aminoácidos están conformados por un grupo amino (NH_2) y un grupo carboxilo (COOH) unidos a un grupo R (Lehninger, 2009).

Participan en todos los procesos vitales por lo que son un componente fundamental en el cuerpo humano. Después del agua, las proteínas representan la mayor proporción de los tejidos corporales, y constituyen los principales componentes estructurales de las células. Actúan como catalizadores bioquímicos y son importantes reguladores de la expresión de genes. Además, las proteínas participan en la síntesis de tejidos, en la formación de enzimas, hormonas y en la secreción de varios líquidos corporales. También intervienen en el transporte de diversos nutrientes como grasas, vitaminas y minerales; y contribuyen en mantener las relaciones osmóticas normales entre líquidos corporales (Lehninger, 2009).

El cuerpo humano utiliza 20 aminoácidos distintos (ver listado en la Tabla 4) para la síntesis de proteínas. Dentro de ellos se encuentran los aminoácidos no esenciales, los cuales son sintetizados por el organismo, a partir de hidratos de carbono y de otros aminoácidos; mientras que, por otro lado, se tiene a los aminoácidos esenciales, los que no pueden ser sintetizados por el organismo, por lo que deben ser suministrados en la dieta.

TABLA 4 LISTADO DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES Y NO ESENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Aminoácidos Esenciales	Aminoácidos No Esenciales
Fenilalanina	Ácido aspártico
Isoleucina	Ácido glutámico
Leucina	Alanina
Lisina	Asparagina
Treonina	Serina
Triptófano	Glicina
Valina	Glutamina
Metionina	Prolina
Histidina ←	Cisteína ←
Arginina ←	Tirosina ←

Algunos aminoácidos de la Tabla 4 se indican con una flecha, esto debido a que en ocasiones se consideran semiesenciales por los siguientes motivos:

- Arginina: Si bien es un aminoácido fabricado diariamente por el organismo, se utiliza como intermediario en la ruta de la urea. En consecuencia, no queda un remanente de ésta a disposición del metabolismo para cumplir sus objetivos, dentro de los cuales se encuentra su incorporación a la estructura de las proteínas.
- Histidina: Solo es esencial durante la lactancia, pues, se ha comprobado que durante la infancia el organismo no tiene la capacidad de producir todo lo que se requiere en dicho período.
- Cisteína: Nuestro metabolismo puede sintetizar este aminoácido, pero sólo a expensas de la metionina.
- Tirosina: Solo puede ser fabricada a partir de la fenilalanina, cuya única misión es la producción de tirosina. (Nelson y Cox 2015)

Las recomendaciones dietéticas, cuando se refieren a aminoácidos, se interesan solo en los aminoácidos esenciales, puesto que, nuestro organismo puede sintetizar el resto. La función e importancia de cada uno de los aminoácidos esenciales se describe a continuación:

- Fenilalanina: Síntesis de tirosina; activación de la síntesis de BH_4 (cofactor para NOS); desarrollo y funcionamiento neurológico.
- Isoleucina: Función anabólica y anti catabólica del metabolismo celular; produce noradrenalina; bloquea ciertas enzimas.
- Leucina: Función anabólica y anti catabólica del metabolismo celular; regulación del recambio de proteínas; potenciador del sabor;
- Lisina: Regulación de la síntesis de NO; actividad antiviral; metilación de proteínas; estructura y funcionamiento del colágeno.
- Treonina: Síntesis de la proteína mucina que se requiere para mantener el funcionamiento intestinal; función inmune;
- Triptófano: Neurotransmisor; Inhibición de la producción de citoquinas inflamatorias y superóxido; segregación de melatonina.
- Valina: Función anabólica y anti catabólica del metabolismo celular;
- Arginina: Activavión de la señalización mTOR; antioxidante; regulación de la secreción hormonal; desintoxicación de amoniaco; sunción inmune; síntesis de BH_4; metilación de proteínas.
- Histidina: Metilación de proteínas; estructura y función de hemoglobina; metabolismo unitario de un carbono.
- Metionina: Tejidos de la piel y las uñas. (Wu, 2009)

2.4.2 REQUERIMIENTOS PARA EL SER HUMANO

El ser humano experimenta un continuo desgaste de las proteínas en los tejidos, por lo que es preciso repararlas a través de la ingesta de alimentos que las contengan. En la Tabla 5, se detalla el requerimiento de proteína total del cuerpo humano, en ambos sexos y a distintas edades, que debe ser ingerido, mientras que, en la Tabla 6 se muestra el contenido mínimo de aminoácidos esenciales que se tiene que consumir en distintos períodos.

TABLA 5 INGESTA RECOMENDADA DE PROTEÍNA. FUENTE: (BURGES AND GLASAUER, 2006)

Edad y sexo		Ingesta recomendada [g/Kg/día]
Niños (Ambos sexos)	4-6 meses	2,5
	7-9 meses	2,2
	10-12 meses	2,0
	1-2 años	1,6
	2-3 años	1,55
	3-5 años	1,5
	5-12 años	1,35
Hombres	12-14 años	1,35
	14-16 años	1,3
	16-18 años	1,2
	18 y más	1,0
Mujeres	12-14 años	1,3
	14-16 años	1,2
	16-18 años	1,1
	18 y más	1,0
Condición		Cantidad adicional por día [g]
Embarazo		8
Lactancia primeros 6 meses		23
Lactancia después de 6 meses		16

TABLA 6 REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (WHO/FAO/UNU, 2007)

Aminoácido	0 años [g/100 g prot]	1-2 años [g/100 g prot]	3-18 años [g/100 g prot]	19-más [g/100 g prot]
Lisina	5,7	5,2	4,8	4,5
Triptófano	0,85	0,74	0,66	0,6
Histidina	2,0	1,8	1,6	1,5
Leucina	6,6	6,3	6,1	5,9
Isoleucina	3,2	3,1	3,1	3,0
Treonina	3,1	2,7	2,5	2,3
Metionina+Cisteína	2,8	2,6	2,4	2,2
Valina	4,3	4,1	4,0	3,9
Fenilalanina+Tirosina	5,2	4,6	4,1	3,8

2.4.3 FUENTES DE PROTEÍNA

Las proteínas se pueden ingerir a partir de alimentos de procedencia animal y vegetal. Los alimentos de origen animal que contienen proteínas son: pescados, mariscos, carnes, leches, yogur, queso y huevos; los cuales contienen todos los aminoácidos esenciales en la cantidad que nuestro cuerpo necesita. Mientras que, las proteínas de origen vegetal, abarcan cantidades menores de uno o más de estos aminoácidos, por lo que se les llama alimentos limitantes, sin embargo, una adecuada combinación de distintos alimentos de esta naturaleza, puede otorgar la dosis de aminoácidos que necesita el ser humano (FAO, 2014).

TABLA 7 PORCENTAJE DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES CONSTITUYENTES DE VARIAS PROTEÍNAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (BRAEKKKAN, 1976)

Aminoácido	Carne Vacuno [g/100 g proteína]	Pescado [g/100 g proteína]	Leche [g/100 g proteína]	Huevo [g/100 g proteína]
Lisina	9,3	8,8	8,1	6,8
Triptófano	1,1	1,0	1,6	1,9
Histidina	3,8	2,0	2,6	2,2
Leucina	8,2	8,4	10,2	8,4
Isoleucina	5,2	6,0	7,2	7,1
Treonina	4,2	4,6	4,4	5,5
Metionina+Cisteína	2,9	4,0	4,3	3,3
Valina	5,0	6,0	7,6	8,1
Fenilalanina+Triptófano	8,0	5,1	10,2	1,7
Proteína total	26 %	20 %	3,4 %	13 %

2.5 SECADO DE ALIMENTOS

Se debe tener en cuenta que el proceso de secado puede producir cambios indeseables en los alimentos. El tamaño, forma, color, textura, sabor y aroma pueden variar y no es posible recuperarlos; también pérdidas en el valor nutritivo pueden tener lugar en este proceso.

El secado consiste en retirar total o parcialmente el agua de la sustancia que la contiene. Es uno de los métodos más utilizados para la conservación de alimentos, ya que se reconoce que las bacterias y microorganismos que los deterioran, requieren de agua para crecer; además, el secado crea una capa exterior que ayuda a evitar que agentes externos penetren el alimento (Alvarado, 2014).

Si bien el contenido de humedad de un alimento puede ser un factor indicativo de su tendencia al deterioro, también se ha observado que diferentes alimentos con el mismo contenido de humedad pueden ser diferentes en su estabilidad, por lo que el concepto de humedad es insuficiente para indicar lo perecedero que es un alimento, y se requiere considerar las interacciones del agua con otros componentes del mismo (Fennema, 2000). Por esta razón, se busca disminuir la actividad de

agua (aw), que corresponde a la medida del agua disponible en un producto para participar en las reacciones de deterioro (Maupoey et al., 2001).

La deshidratación conlleva, además, una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos, permitiendo una importante disminución en los costos de transporte y almacenamiento de los productos.

El grado en que ocurren los cambios en el proceso de secado dependerá de la composición de los alimentos y de la severidad del método utilizado. Particularmente, las proteínas que contiene una muestra que se somete a un proceso de secado, pueden desnaturalizan bioquímicamente, es decir, se produce la pérdida de la estructura nativa de la molécula de proteínas por la rotura de la estructura superior (secundaria, terciaria y cuaternaria), quedando la cadena polipeptídica reducida a un polímero estadístico sin ninguna estructura tridimensional fija (Fennema, 2000).

Los investigadores buscan constantemente minimizar los aspectos negativos asociados a la deshidratación de alimentos. Y, si bien la modernización de la industria de alimentos permite ofrecer al mercado productos deshidratados de mayor calidad, es un campo que aún está en búsqueda de mejoras.

2.6 LIOFILIZACIÓN

La liofilización es un método de deshidratación conocido por obtener productos de alta calidad, ya que la mayoría de las reacciones de deterioro se minimizan o detienen; esta metodología disminuye la pérdida de aroma, maximiza la retención de nutrientes y resulta una estructura porosa en el producto; esto es posible debido a la ausencia de agua líquida, carencia de oxígeno bajo vacío y operación a bajas temperaturas (Ratti, 2001). Sin embargo, por la lentitud del proceso, la baja temperatura de operación, el uso de vacío y altos costos asociados al secado por liofilización, es que se limita su empleo a productos de alto valor (Barresi et al., 2009), dentro de los cuales se considera a los productos estacionales por su falta de disponibilidad en ciertos periodos, comida de bebé debido la calidad nutricional que demandan, alimentos nutracéuticos y productos organolépticamente distintivos (Ratti, 2001).

2.6.1 DEFINICIÓN

La liofilización consiste en el desecado de determinados materiales por medio de la sublimación del agua que contienen, dicho proceso tiene lugar bajo el punto triple del agua (4580 [mTorr] y 0ºC). Bajo esta metodología de secado, como se observa en la Figura 6, el producto que inicialmente se encuentra en condiciones ambientales (punto A), debe disminuir su temperatura hasta congelarse (pasar por el segmento B), entonces la presión de vapor de agua se reduce por debajo del punto triple (comenzando en el punto C). Finalmente se suministra calor para convertir hielo en vapor mediante sublimación (Segmento D) (Ratti, 2013).

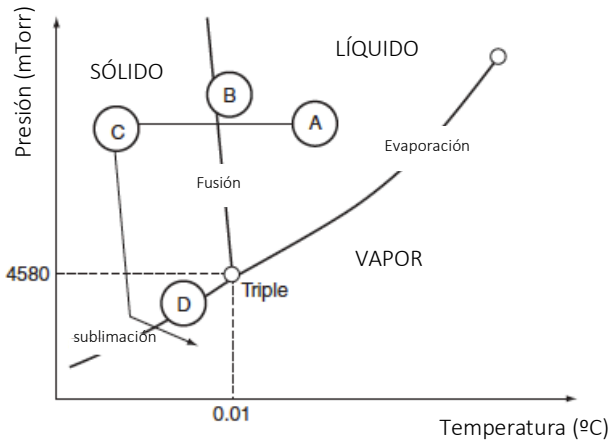


FIGURA 6 DIAGRAMA DE FASES DE AGUA. FUENTE: (RATTI, 2013).

Entonces, se establece que el proceso de liofilización comprende tres etapas: Congelación, secado primario y secado secundario (ver Figura 7). La congelación comienza con la nucleación del hielo, seguida del crecimiento de los mismos; como resultado, la mayor parte del agua se separa en cristales de hielo dentro de una matriz de solutos cristalinos y/o vítreos. Durante el secado primario, dicho hielo cristalino se sublima al reducir la presión de la cámara por debajo de la presión de vapor de saturación del hielo y elevar su temperatura para suministrar el calor requerido para producir la sublimación; esta etapa es la que comúnmente mayor tiempo consume, y al terminar, el producto aún puede contener entre 5-10% de agua no congelada, la cual queda atrapada dentro de la matriz sólida. Finalmente, es posible alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente 1-2% del producto si se desea, mediante la desorción del agua restante a elevada temperatura y muy baja presión durante el secado secundario (Kharaghabi 2017).

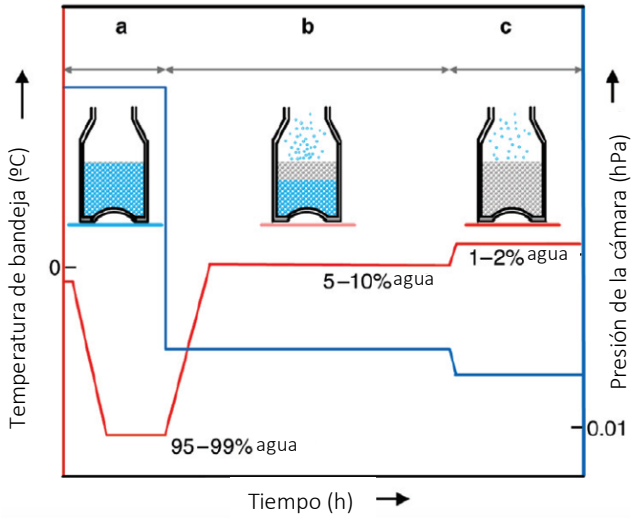


FIGURA 7 ESQUEMA ETAPAS PROCESO LIOFILIZACIÓN. A) CONGELACIÓN; B) SECADO PRIMARIO; C) SECADO SECUNDARIO. FUENTE: (KHARAGHABI ET AL., 2017).

2.6.2 CONGELACIÓN

En esta etapa se construye la matriz sólida en la cual la concentración de la solución aumenta; el agua y los solutos se solidifican, dando como resultado una estructura que toma forma cristalina o amorfa (Kharaghabi et al., 2017). La congelación influye notablemente no solo en el proceso de sublimación que continúa, sino también en la calidad del producto final (Ratti, 2013).

El proceso de formación de cristales puede describirse en tres etapas:

- Nucleación: Proceso que antecede a la cristalización; sub-enfriamiento del producto hasta el punto de congelación inicial, donde aparecen los núcleos de hielo.
- Propagación: Crecimiento de los cristales que permite que las moléculas puedan difundirse hasta la superficie de los núcleos cristalinos crecientes.
- Maduración o recristalización: Corresponde a cualquier cambio en el número, tamaño, forma, orientación o perfección de los cristales después de finalizada la cristalización. (Orrego, 2017)

El tamaño y la forma de los cristales formados durante la congelación establecen la estructura de la red de poros del producto resultante de la liofilización (Kharaghabi et al., 2017). Dicho tamaño y forma de los cristales son consecuencia de variados factores interdependientes, no obstante, en términos simples y generales se distinguen dos tipos de cristales de acuerdo a la velocidad de

congelación; cuando este proceso se realiza de manera lenta (<0,5 [ºC/min]) se incrementa la formación de cristales grandes, lo cual no es favorable debido a que se destruyen las membranas celulares, mientras que una congelación rápida (5-200 [ºC/min]) permite la formación de microcristales que no dañan a las membranas celulares. No obstante, cabe señalar que la formación de cristales grandes facilita la liofilización por la presencia de canales que permiten el movimiento del vapor de agua, en tanto que los pequeños cristales incrementan la presencia de agua no congelada atrapada en la muestra, la cual es difícil de retirar en el secado. La velocidad óptima de congelación depende en gran parte de la naturaleza del producto.

Prácticamente todos los productos que se liofilizan corresponden a soluciones en agua, y pueden ser materiales cristalinos o amorfos. Al congelar estas soluciones, los primeros cristales que aparecen a temperatura Ti, corresponden al agua. A medida que avanza la congelación, para el caso de solutos cristalinos, a una temperatura eutéctica, Te, se emprende la formación de cristales de soluto, mientras que los solutos amorfos o no cristalinos, en lugar de congelación experimentan vitrificación, cuyo proceso se acaba bajo la temperatura de transición vítrea, Tg', logrando obtener un sólido vítreo amorfo rígido. A diferencia de la congelación, la vitrificación no es un proceso de equilibrio entre el hielo y el líquido. Se debe tener en cuenta que una mezcla pude contener ambos tipos de solutos.

Luego que los materiales se congelan por completo, sigue un descenso de temperatura aproximadamente lineal causado por el retiro de calor sensible del producto sólido, proceso que concluye cuando el material alcanza la temperatura del medio refrigerante (Orrego, 2017). La temperatura del producto debe mantenerse debajo de ciertos límites para no deteriorar la calidad del producto, pero lo suficientemente alta como para tener una tasa de sublimación adecuada para evitar un proceso lento y costoso (Ratti, 2013).

2.6.3 SECADO PRIMARIO

Durante esta etapa, los cristales de hielo se eliminan por sublimación, bajo condición de vacío y presencia de una fuente externa de energía, la cual se transfiere mediante conducción y radiación. Como se observa en la Figura 8, en este proceso, el calor debe atravesar barreras externas e internas, tales como la capa congelada del producto (b), la bandeja (d), el recipiente y el espacio existente entre éste y la bandeja (c); además, se aprecia esquemáticamente la transferencia de calor hacia la muestra por conducción, mediante una bandeja de calentamiento, y por radiación, desde la bandeja superior (no se indica la transferencia de calor por medio de convección gaseosa y radiación hacia un

recipiente desde las paredes laterales del liofilizador). Cabe señalar que la sublimación del hielo ocurre desde la superficie exterior de la muestra y pasa gradualmente hacia adentro, al mismo tiempo que se forma una capa porosa llamada capa seca (a). La interfase que hay entre la capa seca y la capa congelada es conocida como el frente de sublimación o frente de hielo como se muestra (e).

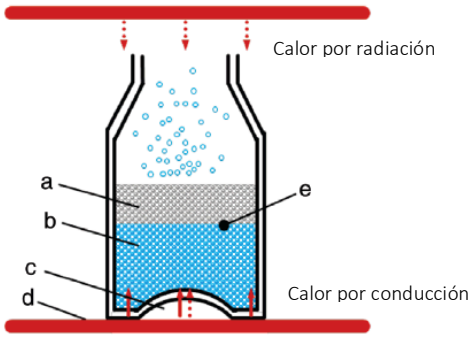


FIGURA 8 ESQUEMA DE UN PRODUCTO PARCIALMENTE LIOFILIZADO MEDIANTE RADIANCIÓN Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN UN MOMENTO DETERMINADO DEL SECADO PRIMARIO. FUENTE: (KHARAGHABI ET AL,. 2017).

El vapor de agua se retira de la muestra de diferentes maneras. Si hay canales en la estructura escapa por ellos y, al hacerlo, se propicia la aparición de nuevos poros o canales. Si no los hay disponibles, como sucede en el caso de los materiales amorfos, las moléculas de agua se difunden hasta llegar a los poros generados en la zona seca, desde donde escapan de la muestra. En el caso que la matriz sólida tenga una alta resistencia a la difusión se produce una sobrepresión del vapor de agua que puede fracturar la estructura y hacer aparecer canales de interconexión en medio de la zona del hielo por donde el vapor pueda salir (Orrego, 2017).

El secado primario debe llevarse a cabo a una temperatura óptima, que no sea tan baja de modo que minimice la duración del proceso, y que a su vez, no supere la temperatura de transición vítrea, Tg, ya que puede producirse un colapso que provoque el sellado de los capilares, lo que conduce a la reducción del tamaño de los poros, pérdida de la estructura, descenso de la deshidratación e hinchazón (Ratti, 2013). Por lo anterior, se recomienda secar lo más cerca posible del punto de solidificación (temperatura eutéctica o transición vítrea). De igual manera, si existe agua ligada (o no congelable), esta se expande abruptamente generando daño al producto (Ratti, 2001).

Cabe señalar, que la tasa de sublimación en el producto disminuye con el tiempo, esto se debe a que la resistencia interna aumenta, ya que la capa seca se va volviendo más gruesa, dificultando el transporte del vapor se agua a través de ella.

FIN DEL SECADO PRIMARIO

El secado primario es el más lento dentro del proceso de liofilización, por lo que el foco de la industria se encuentra en su optimización (Barresi et al., 2009). El término del secado primario corresponde al momento exacto en el que no quedan cristales de hielo y acaba la sublimación, este punto es difícil de determinar debido a que una de las limitaciones de esta tecnología consiste en la dificultad de medir los parámetros de interés, pues actualmente incluso los liofilizadores industriales más avanzados tienen sistemas de control que no son más que sistemas de adquisición de datos para ciertas variables claves (Barresi et al., 2009). La importancia de determinar el fin del secado primario radica en que influye en la calidad del producto y en la optimización del proceso (Mayeresse et al., 2007).

Son varios los criterios que se pueden utilizar para determinar el fin del secado primario, algunos se observan en la Figura 9, y a continuación, se describen.

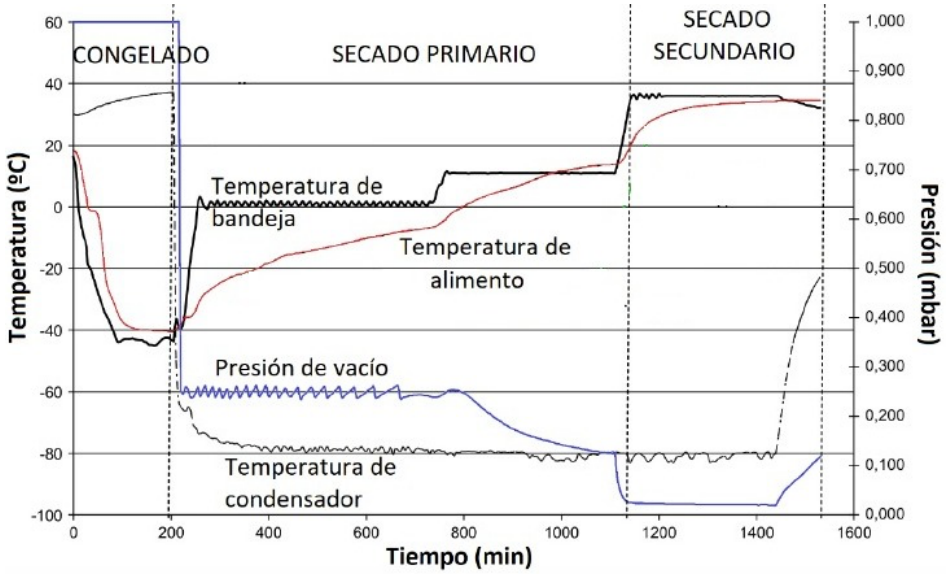


FIGURA 9 COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS ASOSIADOS A LA LIOFILIZACIÓN. FUENTE: (BABIC ET AL, 2009)

- Temperatura: Para conocer la temperatura de la muestra durante el proceso de liofilización, se introduce en su interior un sensor que se encargará de tomar los datos. El problema de esto, se encuentra en que las mediciones no son representativas de todo el lote, si no que solo del sector donde se ubica el sensor, el cual debe situarse en la parte inferior del alimento ya que se asume es la última zona en sublimar (Bardat et al., 1993). Además, se debe considerar que los productos que contienen sensor se secan más rápido debido a que tienen un tamaño de poro más grande alrededor del mismo, con una resistencia menor a la transferencia de masa (Milton et al., 1997). En el momento en que termina el secado primario ocurre un aumento brusco de temperatura indicando la ausencia de hielo y fin del secado primario, aunque se estima que para las muestras que no tienen sensor pueden demorarse entre 10-30% más del tiempo que requiere una muestra que si los contiene (Patel et al., 2010).
- Condensador: Al principio del secado primario, la cámara posee alto contenido de vapor de agua, pero cuando está finalizando el proceso, el contenido disminuye. Dicho vapor de agua se elimina de la cámara a través del condensador, el cual, por una diferencia de presión entre él y la cámara, atrapa el vapor de agua y lo condensa. Sin embargo, una vez que finaliza el secado primario, esta diferencia de presión disminuye porque la presión del condensador aumenta desde que la presión de la cámara se mantiene contante, puesto que representa la presión parcial de nitrógeno en el condensador (Patel et al., 2010).
- Presión de la cámara: Durante el secado primario se controla la presión de la cámara mediante un sensor de capacitancia, el cual mide la presión absoluta dentro de ella y un sensor pirani que es sensible a la composición de los gases presentes. El medidor pirani lee aproximadamente un 60% más que el manómetro de capacitancia durante el secado primario, esto se debe a que prácticamente todo el gas es vapor de agua, cuya conductividad térmica es aproximadamente 1,6 veces mayor que la del nitrógeno. El punto donde la presión pirani comienza a disminuir bruscamente, indica que la composición de gas está cambiando y mayormente corresponde a aire (nitrógeno), por lo que la sublimación está esencialmente completa (Patel et al., 2010).
- Válvula: Una técnica no invasiva propuesta, consiste en la medida del aumento de presión debido al cierre de una válvula, colocada entre la cámara de secado y el condensador, por un corto intervalo de tiempo. Al cerrar la válvula el vapor no puede fluir, aumento de presión en la cámara del producto.

2.6.4 SECADO SECUNDARIO

Luego de sublimarse todo el hielo al terminar el secado primario, aún queda agua líquida remanente en el producto, la cual se retira de la muestra durante la etapa del secado secundario. Usualmente este proceso inicia con un contenido de humedad de alrededor del 10%, y acaba conteniendo entre 1 y 2%, dependiendo del producto que se esté liofilizando (Kharaghabi et al., 2017). El comienzo del secado secundario no está delimitado por el fin del primario, en efecto, ambos procesos de secado ocurren paralelamente mientras coexisten la fase congelada y líquida, entonces una vez que los cristales son sublimados en una región, el agua ligada en dicha zona comienza a abandonar la torta porosa (ver Figura 10).

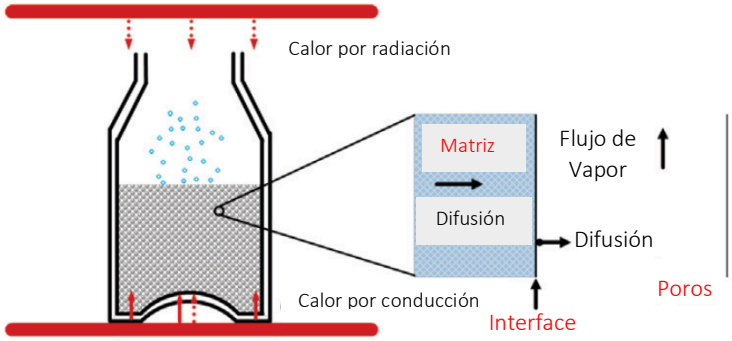


FIGURA 10 ESQUEMA DEL PROCESO DE TRANSPORTE DEL AGUA LIGADA EN UNA MATRIZ POROSA DURANTE LA ETAPA DEL SECADO SECUNDARIO. FUENTE: (KHARAGHABI ET AL., 2017).

En esta etapa se disminuye la presión de operación y se incrementa la temperatura. Esta última debe aumentar lentamente en el secado secundario, puesto que un aumento brusco puede provocar colapso de la estructura en los productos amorfos, mientras que los productos cristalinos, no tienen ningún potencial de colapso durante el secado secundario, por lo que se sugiere una tasa de incremento más alta para dichos productos (Tang y Pikal, 2004).

Para el caso de matrices cristalinas, el agua ligada existe como agua adsorbida en la superficie y el mecanismo de secado es el de desorción, que consiste en la evaporación del agua desde la superficie cristalina. La transferencia de masa se determina por el equilibrio de desorción (isoterma) en las paredes de los poros y por el flujo de vapor a través de ellos; si el área superficial específica disponible en los poros es grande, entonces el producto estará casi seco al final del secado primario y, por lo tanto, el secado secundario será corto. Mientras que, si se trata de sustancias amorfas, el contenido de agua no congelada puede alcanzar hasta un 40%, que se disuelve en la fase amorfa formando una

solución vítrea. Dado que el transporte de vapor es impulsado por difusión molecular dentro de la fase vítrea y el contenido de agua es alto, el proceso del secado secundario es lento, pudiendo durar aproximadamente la mitad del tiempo requerido para el secado primario (Kharaghabi et al., 2017).

2.6.5 COMPONENTES DEL LIOFILIZADOR

Como se observa en la Figura 11, el liofilizador está constituido por 4 componentes principales:

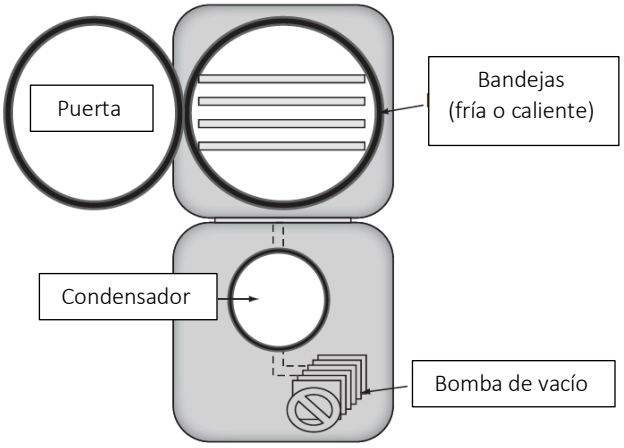


FIGURA 11 ESQUEMA ESTRUCTURA LIOFILIZADOR. FUENTE: (RATTI, 2013).

CÁMARA DE SECADO

Intención en cuyo interior se encuentra una pila de bandejas en las cuales se sitúa el producto. Las bandejas se calientan por conducción para suministrar el calor latente de sublimación requerido.

CONDENSADOR

Atrae el vapor de agua presente desde la cámara, condensándolo en hielo al alcanzar las superficies de enfriamiento.

BOMBA DE VACÍO

Se encarga de retirar los gases no condensables (aire) presentes en la cámara. Esto permite que la cámara permanezca bajo el punto triple, aumentando la zona libre media de las moléculas de vapor en la zona seca del producto. (Kharaghabi et al., 2017)

2.6.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Esta técnica de secado constituye un efectivo sistema de preservación de elementos biológicos como células, enzimas, vacunas, virus, levaduras, sueros, algas, frutas, vegetales y alimentos en general. Todos estos materiales contienen sustancias volátiles o termosensibles que no se ven afectados por este proceso, ya que trabaja a temperatura y presiones reducidas.

Lo más importante de este método es que no altera la estructura fisicoquímica del producto y admite su conservación sin cadena de frío, ya que su bajo porcentaje de humedad permite obtener un producto con elevada estabilidad microbiológica. Asimismo, el hecho de no requerir refrigeración facilita su distribución y almacenamiento.

A continuación, en la Tabla 8, se contrastan algunas características del secado por liofilización y por secado convencional.

TABLA 8 COMPARACIÓN DEL SECADO CONVENCIONAL CON LA LIOFILIZACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Secado Convencional	Liofilización
Es poco satisfactorio para carne.	Recomendado para carnes crudas y cocidas.
Presión atmosférica	Presión reducida (27-133 Pa)
Se evapora el agua de la superficie del alimento	Se sublima el agua del frente de sublimación.
Movimiento de solutos, lo que causa en ocasiones endurecimiento.	Movimiento mínimo de solutos.
Las tensiones en alimentos sólidos causan daño estructural y encogimiento	Cambios estructurales o encogimientos mínimos.
Rehidratación incompleta o retardada.	Rehidratación completa y rápida.
Olor y sabor frecuentemente anormal.	Olor y sabor normalmente intensificado.
Valor nutritivo reducido	Nutrientes retenidos en gran porcentaje
Costos generales bajos.	Costos generalmente altos, aproximadamente cuatro veces más que el secado convencional.

2.7 TAMBOR ROTATORIO

2.7.1 DESCRIPCIÓN

El secado por tambor rotatorio se comenzó a desarrollar cerca del 1900. Estos equipos eran usados para secar prácticamente todos los productos alimenticios líquidos, antes de que existiera el secador spray. Hoy en día, estos secadores se utilizan principalmente en la industria alimenticia para secar productos, tales como lácteos, cereales, pulpa de frutas y vegetales, puré de papa, almidones cocidos y levaduras (Heldman y Moraru, 2000).

El proceso de secado en tambor rotatorio consiste en la eliminación de agua de un producto húmedo mediante la aplicación de una delgada película de él sobre uno o más tambores calentados por el vapor presente en su interior, y la posterior remoción de la película del material seco mediante cuchillas raspadoras.

A través de esta operación es posible alcanzar un rendimiento de 3,3 a 6,4 [kg/m^2] aproximadamente (Straub et al., 1979). Es considerado uno de los métodos de secado más económicos, requiriendo de 1,2 a 3 unidades de corriente de vapor por unidad de agua a evaporar (Von Loesecke, 1965).

La exposición del producto de manera directa sobre el tambor caliente puede provocar que se queme (Von Loesecke, 1965) y pierda calidad, lo cual corresponde al problema más serio asociado a este método de secado. Esta reducción de calidad se manifiesta a través de la destrucción de algunos aminoácidos y pérdida en la digestibilidad de la proteína (Straub et al., 1979).

2.7.2 COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El secador tambor rotatorio está compuesto por uno o dos cilindros montados horizontalmente, un marco de soporte, una espátula, un sistema de alimentación y algunos elementos auxiliares (Heldman y Moraru, 2000). Generalmente, se utilizan equipos con dos cilindros, cuya estructura se observa en la Figura 12. El diámetro de los tambores usualmente se encuentra en el rango de 0,5 [m] a 6 [m] y su longitud puede estar entre 1 [m] y 6[m] (Heldman y Moraru, 2000).

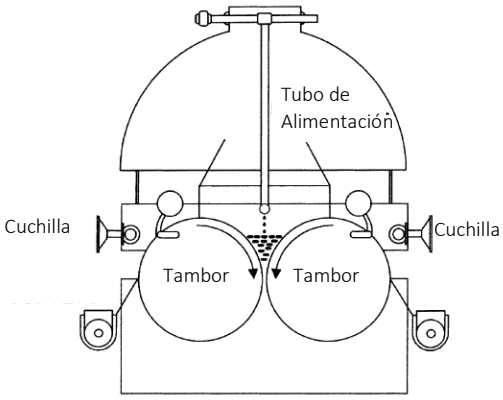


FIGURA 12 ESQUEMA SECADOR TAMBOR ROTATORIO DOBLE. FUENTE: (GAVRIELIDOU ET AL., 2002)

En la operación, una capa del material húmedo se aplica uniformemente en la superficie exterior de los tambores que giran en el sentido que muestra la Figura 12. Dentro de los tambores se encuentra vapor que se encarga de calentar los tambores, de tal forma que se produce transferencia de calor por conducción al producto al posarse sobre la superficie, provocando la evaporación de la humedad que contiene; posteriormente el producto seco se retira del equipo mediante cuchillas raspadoras. Los factores que afectan el rendimiento de la operación son la velocidad de giro, la temperatura de los tambores y su espacio de separación (Straub et al., 1979).

2.7.3 FUNDAMENTOS DEL SECADO POR TAMBOR ROTATORIO

En la operación del secador tambor rotatorio, una gran cantidad de energía es liberada por la condensación de vapor en el tambor y la conducción de calor a través de la pared del tambor hacia el producto. Durante el secado, la muestra húmeda pasa por tres períodos generales que se observan en la Figura 13 y se describen a continuación:

I. PERÍODO CALENTAMIENTO INICIAL

Luego de aplicar una delgada lámina del material húmedo sobre la superficie, una intensiva transferencia de calor toma lugar debido a la gran diferencia de temperatura que existe entra la superficie del tambor y el producto. Rápidamente la temperatura del producto se incrementa hasta llegar al punto de ebullición del agua.

II. PERÍODO TEMPERATURA CONSTANTE DEL PRODUCTO

Después de alcanzar la temperatura de ebullición, se evapora una gran cantidad de agua mientras la temperatura del producto se mantiene constante. Sin embargo, la temperatura de la superficie del tambor disminuye debido a que se encuentra entregando energía al producto.

III. PERÍODO DE AUMENTO DE LA TEMPERATURA DEL PRODUCTO

A continuación de remover la mayor parte del agua presente en el producto, la cantidad de agua evaporada disminuye. El calor transferido desde el vapor que se encuentra dentro del tambor gradualmente excede la energía requerida para la evaporación, por lo que la temperatura de la superficie del tambor y del producto aumentan, esta tendencia se mantiene hasta llegar a la cuchilla de raspe del producto.

La temperatura de los tambores continuará en aumento hasta que se aplique nuevamente un producto húmedo sobre su superficie.

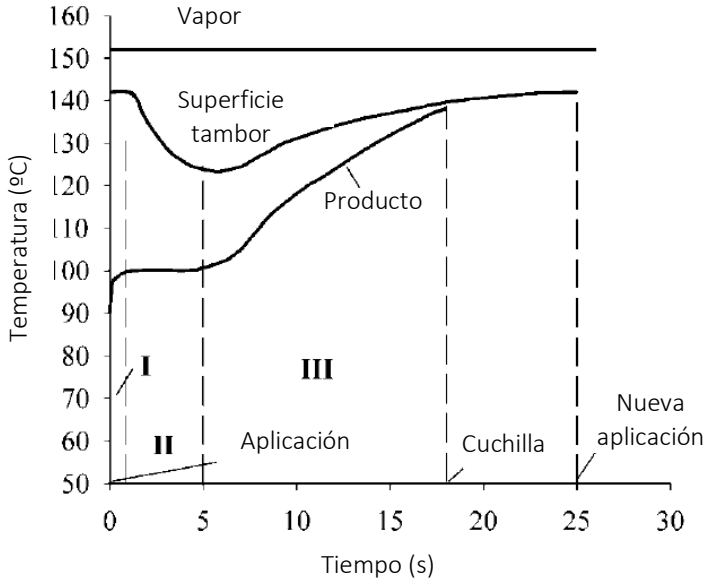


FIGURA 13 TEMPERATURA DEL PRODUCTO Y DE LA SUPERFICIE DEL TAMBOR DURANTE UNA REVOLUCIÓN DE SECADO POR TAMBOR ROTATORIO EN TRES DIFERENTES PERIODOS. FUENTE: (BONAUI ET AL. 1996)

2.7.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

TABLA 9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO POR TAMBOR ROTATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (HELDMAN Y MORARU, 2000).

Ventajas	Desventajas
• El producto final seco posee buena porosidad y, por lo tanto, buena rehidratación. • Pueden secar alimentos viscosos, los cuales no son fácil de secar por otro método. • Posee alta eficiencia energética. • Es un proceso limpio e higiénico. • Su operación y mantenimiento es simple. • Adecuados para el secado de múltiples y pequeñas cantidades.	• Algunos productos no podrían formar una adecuada película en la superficie de los tambores. • Productos con un alto contenido de azúcar, una vez secos, no se pueden retirar tan fácilmente de la superficie del tambor. • El contacto directo del producto con una superficie a alta temperatura posibilita el quemado del mismo, impactando su sabor y color. • No pude procesar sal u otros materiales corrosivos porque podría generar picadura en la superficie de los tambores.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 METODOLOGÍA GENERAL

El presente trabajo consistió en poner en marcha un proceso para la elaboración de harina de lombriz, *Eisenia foetida*, el cual se inicia con la recolección de lombrices en estado adulto, las que se someten a un pretratamiento que consiste en limpiar el anélido por fuera con un flujo de agua y su interior mediante una solución salina, luego se muelen hasta formar una pasta y finalmente se secan, proceso que se lleva a cabo en esta investigación a través de dos tecnologías, doble tambor rotatorio y liofilizador.

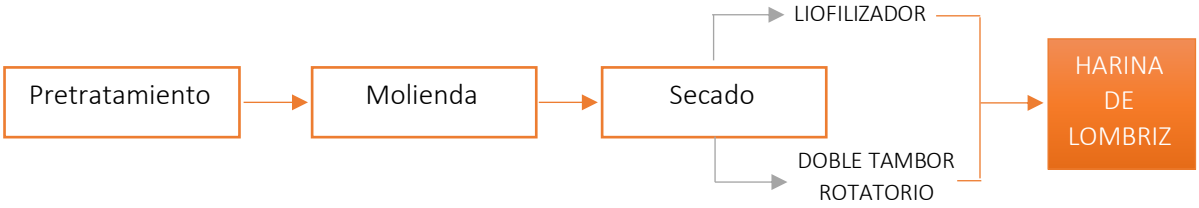


FIGURA 14 ESQUEMA PROCESO PRODUCCIÓN HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para el secado con ambos métodos, es importante conocer las condiciones de operación adecuadas para obtener un producto estable, es decir, que el contenido de humedad del producto no propicie el desarrollo de agentes patógenos que la deterioren, y por ende, pueda considerarse un alimento consumible; para este tipo de productos, el rango óptimo de humedad se encuentra bajo el 10% (Ovalles et al., 2018).

Es por esta razón, que se pretende conocer la humedad que se obtiene al operar bajo una temperatura y tiempo específicos en el secador doble tambor rotatorio. Esto es posible de determinar mediante una relación semiempírica que involucre estos parámetros, la cual se obtiene a partir de la construcción experimental de curvas de secado a distintas temperaturas. En tanto, en el liofilizador, se mide la humedad al finalizar el secado primario, momento que se define a través del cálculo del punto de inflexión de los datos de temperatura del producto durante secado.

Además, considerando que la etapa de secado es la más crítica por el deterioro que provoca en la calidad nutricional del producto, se hacen análisis de proteína total y del perfil de aminoácidos de la harina de lombriz secada a partir de ambos métodos de secado para ser comparados, y así poder determinar la conveniencia de utilizar una de las dos tecnologías respecto de la otra.

Finalmente, con el contenido de proteínas y aminoácidos de la harina obtenida con el secador seleccionado, se evalúa la factibilidad de considerar este producto como una fuente alternativa de proteína al constatar si satisface o no, los requerimientos de consumo establecidos por la FAO. Por otro lado, los resultados se comparan con la información de otras fuentes convencionales de proteína.

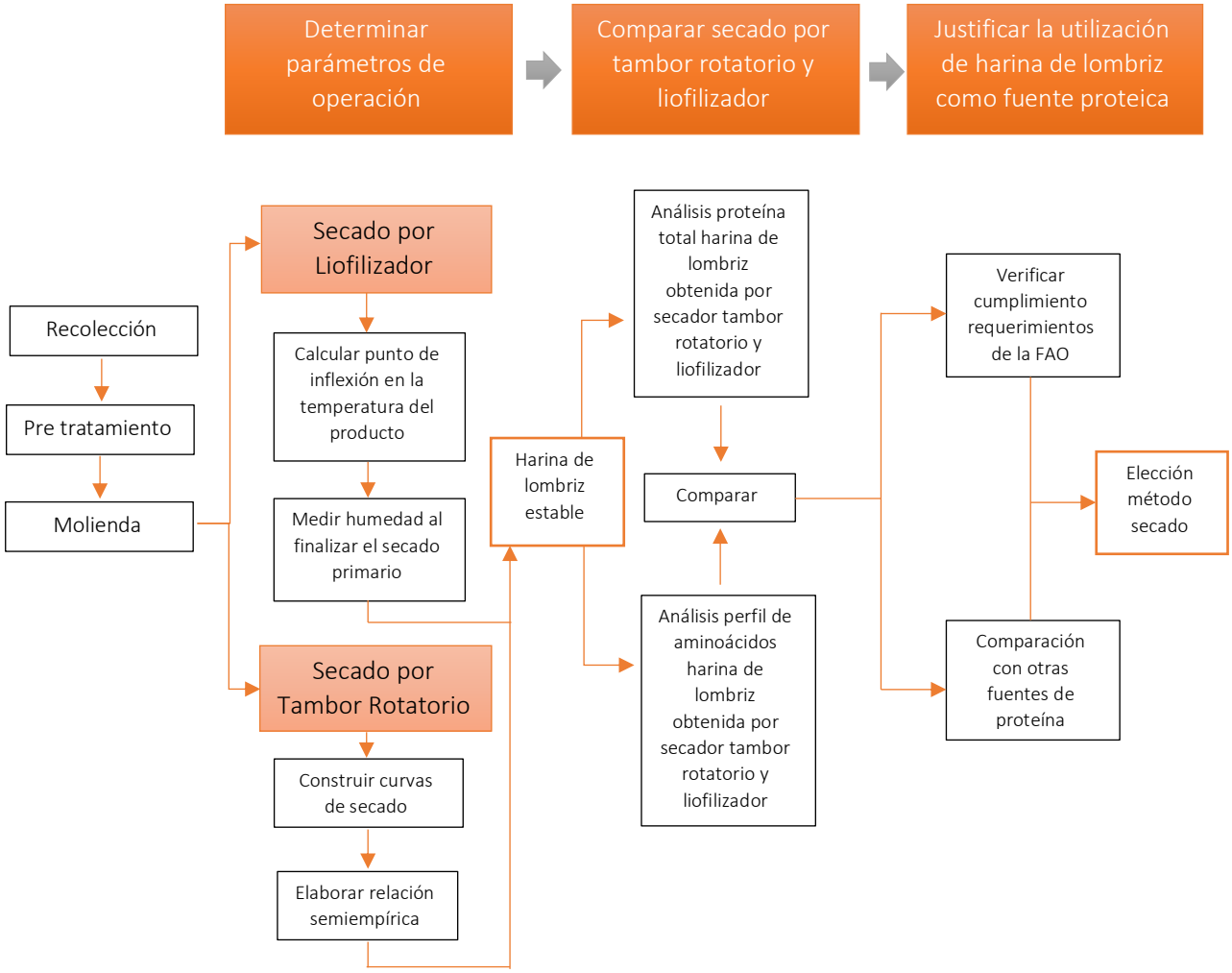


FIGURA 15 ESQUEMA METODOLOGÍA GENERAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.2 MATERIA PRIMA

Se utiliza como materia prima la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en estado adulto (Ver Figura 16), es decir, con más de 3 meses de vida. Las lombrices utilizadas en esta investigación, son provistas por la empresa Newen Mapu ubicada en Viña del Mar, quienes las entregan en formato nido, donde conviven cocones, lombrices pequeñas y adultas, en medio de humus y desechos orgánicos, por lo cual una vez recibidas son criadas en las lombricomposteras dispuestas en la Planta Piloto del Departamento de Ingeniería química y Ambiental de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Se mantuvo solo un proveedor, y se continuó la crianza de las lombrices con el mismo alimento (plátano, palta, huevo y guano de caballo), para evitar las posibles variaciones que pudiese generar la alimentación en el perfil de aminoácidos de la harina de lombrices producida.



FIGURA 16 LOMBRIZ ADULTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La cantidad de lombrices a procesar se estima considerando que en el pretratamiento genera una pérdida de aproximadamente el 20% de la masa total recolectada, sin embargo, esto es relativo, ya que depende de la prolijidad con que cada persona tome las lombrices, las cuales tienen adheridas humus y deshechos orgánicos a su exterior. Luego, al someter la pasta de lombriz al proceso de secado para obtener harina con un 7% de humedad, se produce una pérdida de masa adicional de alrededor del 70%.

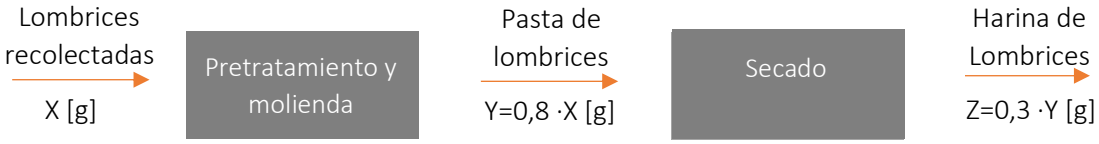


FIGURA 17 BALANCE DE MATERIA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.3 MATERIALES Y EQUIPOS

3.3.1 LOMBRICOMPOSTERA

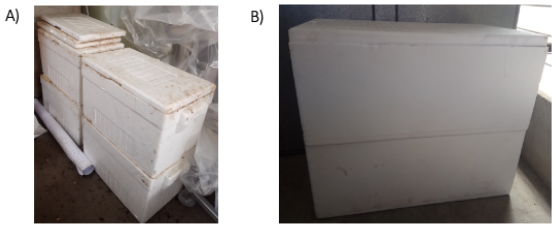


FIGURA 18 LOMBRICOMPOSTERAS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se dispone de 3 lombricomposteras, cada una de ellas compuesta por dos cajas de plumavit de igual dimensión cada una. La caja superior se encarga de albergar a los desechos, humus y lombrices, mientras que la inferior, recibe el lixiviado correspondiente al exceso de humedad.

Dos de las lombricomposteras están constituidas por cajas de 60 m^3 de capacidad (Figura 18.A), y la restante, por cajas de 90 m^3 (Figura 18.B).

3.3.2 MINIPIMER



FIGURA 19 MINIPIMER.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

La Minipimer Ursus Trotter modelo URMIN-8210 se utilizan para realizar la molienda de las lombrices. Este implemento cuenta con una potencia de 750 Watts, regulación de velocidad y sólidas aspas de acero inoxidable.

3.3.3 CONGELADOR



FIGURA 20 CONGELADOR.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El refrigerante industrial Alaska modelo MT 05, se usa para congelar las muestras antes de ingresar al liofilizador.

3.3.4 LIOFILIZADOR



FIGURA 21 LIOFILIZADOR.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Se utiliza el liofilizador modelo Alpha 2-4 LSCplus marca Christ para el secado por sublimación. Algunas especificaciones del equipo se listan a continuación:

- Las dimensiones del equipo son de 290 (alto) x 415 (ancho) x 555 (fondo) [mm] y su masa es de 60 [Kg]
- Posee un condensador cuya capacidad es de 4 [Kg], su rendimiento es de 4 [Kg] cada 24 [h] y alcanza una temperatura de -85 [ºC].
- Las bandejas cuentan con una tecnología inalámbrica (WST) que facilita el control del proceso.



FIGURA 22 INTERFAZ SOFTWARE LPC PLUS.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El software LPC plus da soporte al control de procesos manual y automático del liofilizador. A través de esta plataforma, se ingresan los distintos parámetros de operación; además, permite visualizar el avance del proceso según los distintos criterios asociados.

3.3.5 SECADOR TAMBOR ROTATORIO



FIGURA 23 SECADOR DOBLE TAMBOR ROTATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El secador de doble tambor rotatorio marca Buflovak se usa para secar la pasta de lombrices. Este método de secado es uno de los más utilizados debido a la versatilidad de productos que puede procesar, a la alta eficiencia de secado y bajo costo operativo asociado.

El equipo consta de dos tambores rotatorios de acero, uno fijo y otro ajustable que permite el control del espesor de la película del producto.

3.3.6 TERMOCUPLA Y LECTOR DE TEMPERATURA



FIGURA 24 TERMOCUPLA Y LECTOR DE TEMPERATURA.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El sensor de temperatura tipo K está acoplado al controlador Autonics modelo TZN4S-14R, el cual mide automáticamente las características térmicas en respuesta a lo captado por la termocupla y permite la visualización de estos valores de manera rápida.

3.3.7 ESTUFA

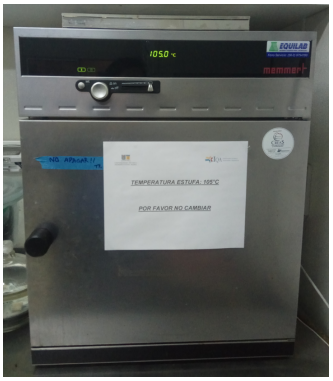


FIGURA 25 ESTUFA MEMEMERT.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para la medición de humedad, se usó una estufa Mermmet modelo UM 200, la cual funciona con convección y posee las siguientes especificaciones:

- Temperatura nominal de 220 [ºC].
- Volumen de 32 [L].
- Consumo de corriente de 4,78 [A].

3.3.8 BALANZA

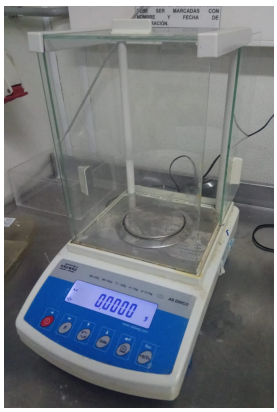


FIGURA 26 BALANZA.
FUENTE: ELABORACIÓNPROPIA.

Para obtener la masa de las muestras se utiliza una balanza marca RADWAG modelo AS 200/C/2, cuya capacidad máxima es de 220 [g] y posee una lectura mínima de 0,1 [mg].

3.5 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

La producción de harina de lombriz se llevó a cabo por dos metodologías de secado, cuyas condiciones de operación se detallan en la Figura 27.

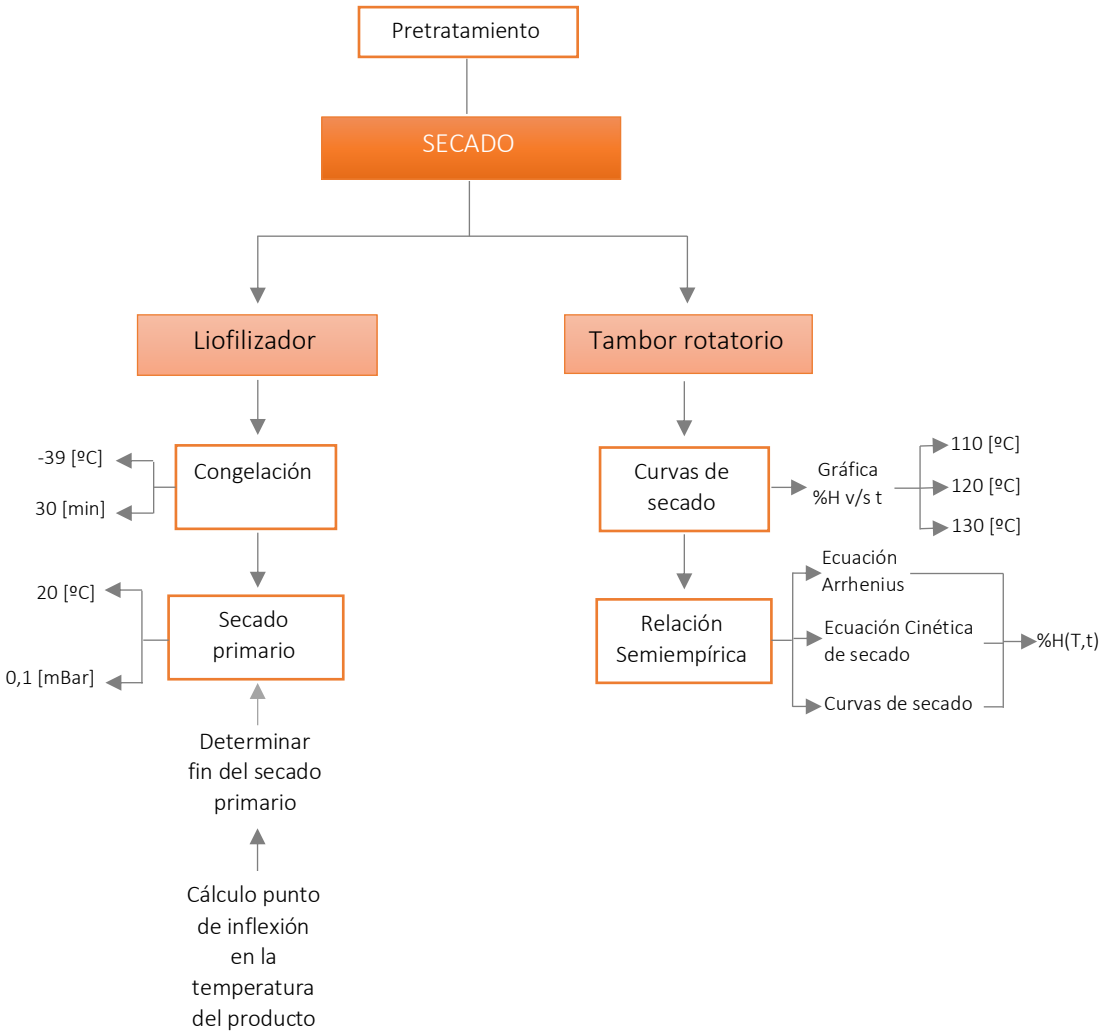


FIGURA 27 ESQUEMA DISEÑO DE EXPERIMENTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.6 RECOLECCIÓN, PRETRATAMIENTO Y MOLIENDA

El proceso de producción se inicia con la recolección de lombrices adultas desde las lombricomposteras, este procedimiento se lleva a cabo tomando manualmente una a una las lombrices, teniendo cuidado de recogerlas con la menor cantidad posible de agentes externos.



FIGURA 28 LOMBRICES RECOLECTADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Para liofilizar 3 muestras contenidas en placas petri, se requiere recolectar 200 [g] de lombrices; en tanto, para la creación de cada curva de secado se toman 300 [g] de las mismas.

Una vez recolectadas se pretratan, es decir, se lavan interior y exteriormente. Para ello existen variados procedimientos, sin embargo, por la disponibilidad de recursos y las condiciones del laboratorio, se decide implementar el pretratamiendo propuesto por Sales Dávila (1996), el cual consiste en lo siguiente:

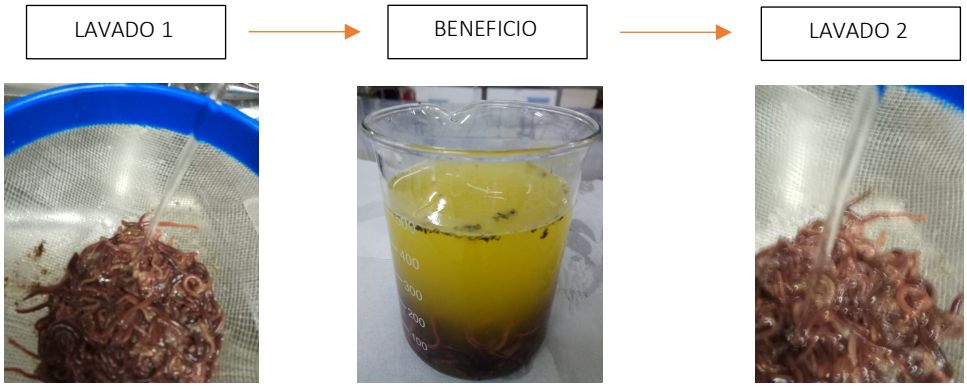


FIGURA 29 PRETRATAMIENTO LOMBRICES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la etapa del lavado 1, se remueven los desechos orgánicos y humus que quedan adheridos a la piel de las lombrices al ser recolectadas. Posteriormente, en el beneficio, se prepara una solución

salina al 5% p/p, en la cual se introducen las lombrices por alrededor de 20 segundos, hasta que detengan su movimiento, para que excreten el contenido presente en el interior de su tracto digestivo. Por último, en el lavado 2, se elimina el líquido amarillento resultante de la etapa de beneficio y se retiran todos los restos de suciedad que quedan en el exterior de la lombriz.

Las pretratadas se introducen en una Mini Pimer para ser trituradas, hasta obtener una pasta de lombriz lo más homogénea posible.

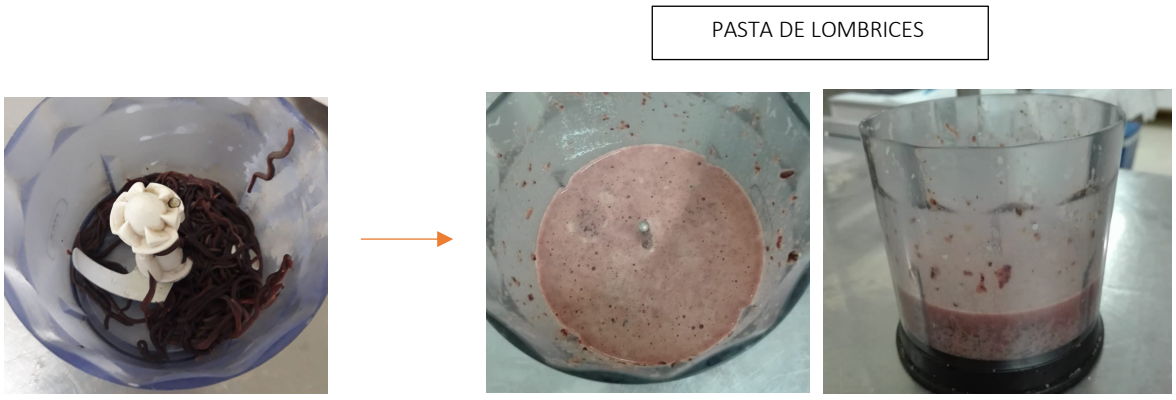


FIGURA 30 MOLIENDA LOMBRICES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.7 DETERMINAR PARÁMETRO DE OPERACIÓN LIOFILIZADOR

Primeramente, se preparan 3 muestras con la pasta de lombriz en placas petri similares, de altura 1,5 [cm]. Luego, se introduce una termocupla en cada una de las muestras, posicionándolas lo más central y profundo posible. Las muestras ingresan al congelador situadas sobre las bandejas del liofilizador por 30 [min] a -39 [ºC], condiciones a las que se observa la muestra se encuentra totalmente congelada.

Posteriormente, las muestras congeladas se ingresan al liofilizador para llevar a cabo el secado primario, el cual se realiza a 0,01 [mBar] para asegurar el vacío y a una temperatura de 20 [ºC].

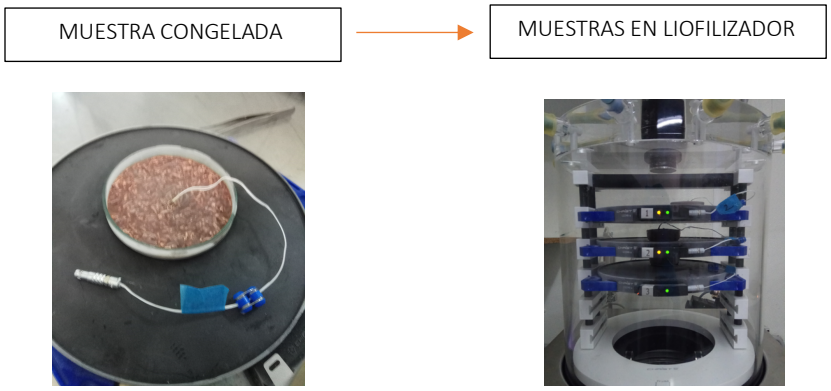


FIGURA 31 SECADO PRIMARIO POR LIOFILIZACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.7.1 CALCULAR TIEMPO DE SECADO PRIMARIO

Para determinar el momento en que finaliza el secado primario, se consideran los criterios asociados al liofilizador Alpha 2-4 LSC plus. De todos ellos, se escoge analizar cuantitativamente la temperatura del producto, la cual se registró cada 5 segundos, debido a que la válvula no se encuentra disponible, los sensores de presión no están calibrados y la temperatura del condensador presenta más variaciones.

Al acabar el secado primario, se habrá sublimado todo el hielo presente en la muestra, representado en un punto de inflexión en el aumento de la temperatura, decretando el fin del cambio de fase e inicio del calentamiento sensible del producto.

El punto de inflexión se determina a partir de la función de Gompertz (ecuación 3.1), la cual representa un modelo matemático para una serie de datos que van en aumento en el tiempo.

$$y = a \cdot \exp[-\exp(b - cx)] \quad (3.1)$$

Donde,

$a = A$

$b = \frac{\mu_m e \lambda}{A} + 1$

$c = -\frac{\mu_m e}{A}$

Como se observa en la Figura 32, la curva de crecimiento describe el logaritmo natural del parámetro u organismo en crecimiento ($\ln(N/N_O)$) respecto al tiempo. Las tres fases de la curva pueden ser entendidas con tres parámetros: el máximo rango de crecimiento específico, μ_m, que corresponde a la tangente en el punto de inflexión; tiempo de la fase lag, que está determinado por el intercepto de la tangente con el eje x; y la asíntota A, que es el máximo valor alcanzado (Zwietering et al. 1990).

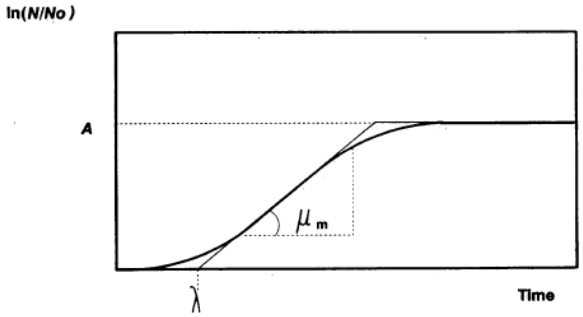


FIGURA 32 CURVA DE CRECIMIENTO. FUENTE: (ZWIETERING ET AL., 1990)

El procedimiento para encontrar el punto de inflexión consiste en tomar, de manera subjetiva, un segmento de datos, considerando que se encuentren cerca del punto de inflexión, y éste se posicione en el centro. Luego, se define la segunda derivada según la ecuación 3.2.

$$\frac{d^2y}{dt^2} = ac^2 \exp[-\exp(b-ct)] \cdot \exp[b-ct] \cdot [\exp(b-ct)-1] \qquad (3.2)$$

La cual es igual a cero en el punto de inflexión (ecuación 3.3), por lo tanto:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = 0 \rightarrow t_i = \frac{b}{c} \qquad (3.3)$$

Los datos de la temperatura del producto se ajustan a la función de Gompertz mediante mínimos cuadrados en Excel para obtener los valores de a, b y c; de tal forma que se cuente con todos los parámetros necesarios para calcular el tiempo transcurrido en el secado primario hasta alcanzar el punto de inflexión.

3.7.2 MEDIR HUMEDAD AL FINALIZAR EL SECADO PRIMARIO

La humedad se midió de acuerdo a lo establecido por la Norma Chilena 841 del 78, la cual establece el siguiente procedimiento: se colocan placas limpias por una hora es la estufa, luego se sacan, se ponen en el desecador hasta enfriar y se registra su masa. En dichas placas, se pone al menos 2 [g]

de muestra retirada del liofilizador a penas acaba el secado primario, posteriormente se introducen en la estufa por al menos 24 [h] a 105 [ºC], y al terminar, se colocan en el desecador para después ser pesadas nuevamente.

MUESTRA AL TERMINAR EL SECADO PRIMARIO

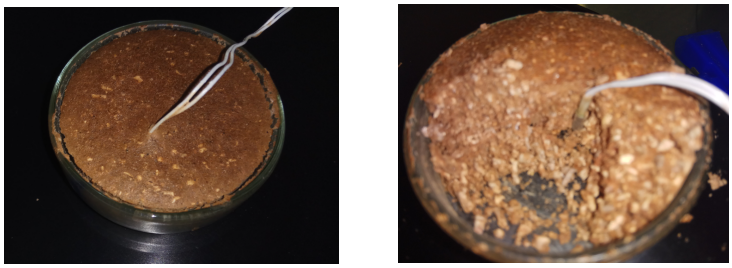


FIGURA 33 MUESTRAS SECADAS POR LIOFILIZADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

El contenido de humedad se puede expresar en base a la masa de la muestra humedad inicial o en base a la masa de la muestra seca final de acuerdo a las ecuaciones 3.4 y 3.5:

$$\%\ Humedad\ (base\ húmeda) = \frac{M_1 - M_2}{(M_1 - M)} \cdot 100 \qquad (3.4)$$

$$\%\ Humedad\ (base\ seca) = \frac{M_1 - M_2}{(M_1 - M)} \cdot 100 \qquad (3.5)$$

Donde:

M_1: [g] Masa de la muestra húmeda (al acabar el secado)

M_2: [g] Masa de la muestra seca (al sacarla de la estufa)

M: [g] Masa de la placa.

3.8 DETERMINAR PARÁMETROS DE OPERACIÓN SECADOR TAMBOR ROTATORIO

Para secar la pasta de lombriz en el secador tambor rotatorio, primero se deben purgar los tambores del equipo. Entonces, comienza a ingresar vapor dentro de los tambores para calentar su superficie hasta alcanzar la temperatura deseada (Straub et al., 1979). La temperatura se mide con una termocupla y se regula con la presión de vapor. La separación de los tambores se define en 0,2 [mm], puesto que no se quema la muestra y se adhiere sin dificultades a los tambores.

El procedimiento consiste en verter la pasta de lombriz entre los dos tambores rotatorios, entonces se forma una lámina fina adherida a los tambores, la cual se retira al llegar a las cuchillas del equipo.

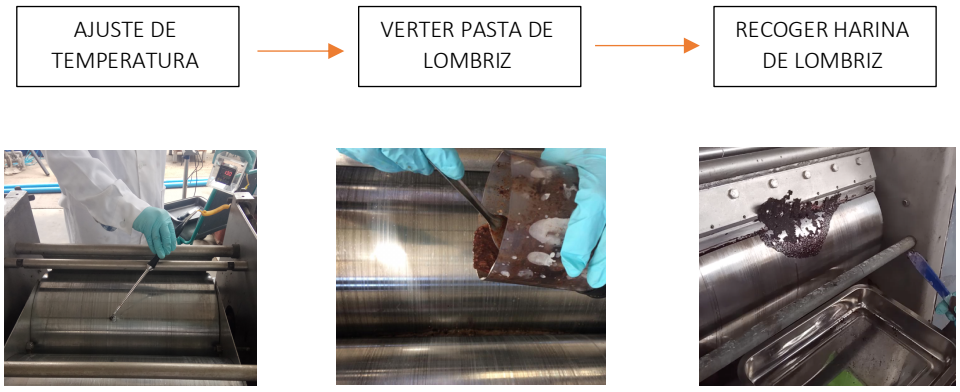


FIGURA 34 SECADO POR TAMBOR ROTATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

3.8.1 CONSTRUIR CURVAS DE SECADO

Las curvas de secado relacionan la humedad con el tiempo de secado a una temperatura estable. Se construyeron tres curvas de secado a las temperaturas de 110 [ºC], 120 [ºC] y 130 [ºC], de acuerdo a lo sugerido por Straub et al. 1979.

Para cada una de esas temperaturas, se fue variando el tiempo de secado hasta alcanzar la humedad de equilibrio, la cual corresponde a la humedad que, al ser alcanzada, permanece contante a partir de un determinado tiempo de operación. La humedad se obtuvo de acuerdo al procedimiento descrito en el punto 3.7.1.

3.8.2 ELABORAR RELACIÓN EMPÍRICA

A partir de datos experimentales, se construye una relación matemática que relaciona la humedad con el tiempo de secado a una temperatura constante. Esto se logra a partir de la ecuación 3.6, que define el secado, de la siguiente manera:

$$-\frac{dW}{dt} = K(W - W_e) \qquad (3.6)$$

$$\int_{W_i}^{W_f} -\frac{dW}{(W - W_e)} = \int_{t_i}^{t_f} K dt \qquad (3.7)$$

$$W_f = W_e + e^{-Kt}(W_i - W_e) \qquad (3.8)$$

Donde,

W_i: Humedad inicial.

W_f: Humedad final.

W_e: Humedad de equilibrio.

t: Tiempo de secado.

K: Constante cinética.

Por los datos conocidos experimentalmente, es posible despejar la constante cinética, K, para cada una de las temperaturas de operación. Ahora, para poder conocer k, a distintas temperaturas de secado, se relacionan matemáticamente mediante la ecuación de Arrhenius:

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \qquad (3.9)$$

Donde,

A: Frecuencia de las colisiones.

E_a: Energía de activación.

R: Constante universal de los gases.

Luego, la ecuación de Arrhenius se linealiza para conocer el valor de las distintas variables. Entonces se tiene:

$$\ln(K) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT} \qquad (3.10)$$

Donde,

$Eje\ x = \frac{1}{T}$

$Eje\ y = \ln(K)$

$Pendiente = -\frac{E_a}{R}$

$Intercepto = \ln(A)$

3.9 COMPARACIÓN SECADO POR TAMBOR ROTATORIO Y LIOFILIZADOR

3.9.1 ANÁLISIS DE PROTEÍNA TOTAL

El contenido de proteína total se obtiene a partir del análisis de Nitrógeno Total Kejldahl (NTK), el cual fue realizado en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad Técnica Federico Santa María, campus San Joaquín. Se realiza el análisis a tres muestras: pasta de lombrices, harina de lombrices secada mediante tambor rotatorio y harina de lombrices secada por liofilizador.

Este método se utiliza en química analítica para la determinación de la cantidad de proteína en una muestra a partir del contenido de nitrógeno en muestras orgánicas e inorgánicas, esto es posible debido a que diferentes tipos de proteínas coinciden en una proporción similar de dicho nitrógeno, por lo tanto, se utiliza el siguiente factor de cálculo:

$$Contenido\ de\ proteína = Contenido\ de\ nitrógeno\ orgánico \cdot 6{,}25$$

El procedimiento, se lleva a cabo en tres etapas:

- Digestión

Las proteínas y otros compuestos que constituyen la muestra orgánica se digieren con ácido sulfúrico a elevada temperatura y, opcionalmente, se añaden catalizadores para acelerar la digestión, y así finalmente se obtiene una solución de sulfato de amonio.

$$Proteína\ (-N) + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 + CO_2 + H_2O$$

- Destilación

La mezcla resultante se neutraliza con una base y se destila. En esta etapa, los iones amoniaco se convierten en amoniaco, el cual es arrastrado al vaso receptor por medio de una corriente de vapor de agua y se retiene en una solución de ácido bórico formando iones amonio.

$$(NH_4)_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow 2NH_3(gas) + Na_2SO_4 + 2H_2O$$

$$B(OH)_3 + NH_3 + H_2O \rightarrow {NH_4}^+ + {B(OH)_4}^-$$

- Titulación

Finalmente, los aniones de borato formados, se titulan con HCl estandarizado para determinar el contenido de nitrógeno en la muestra.

$$B(OH)_4 + HCl \rightarrow Cl^- + B(OH)_3 + H_2O$$

3.9.2 ANÁLISIS DEL PERFIL DE AMINOÁCIDOS

El estudio para obtener el perfil de aminoácidos se realiza en el Laboratorio Cecta de la universidad de Santiago de Chile, y se lleva a cabo es una muestra de pasta de lombrices, otra de harina de lombriz secada por tambor rotatorio e igualmente, en una secada a través de liofilizador.

La metodología utilizada es una evaluación de aguas Pico-Tag, la que consiste en una técnica integrada para el análisis de aminoácidos. El reactivo fenilisotiocianato (PITC) se utiliza para la derivación previa a la columna, mientras que la cromatografía líquida (HPLC) separa los derivados de feniltiocarbamida (PTC) que poseen una fuerte absorbancia UV, que permite la detección de aminoácidos (White et al., 1986).

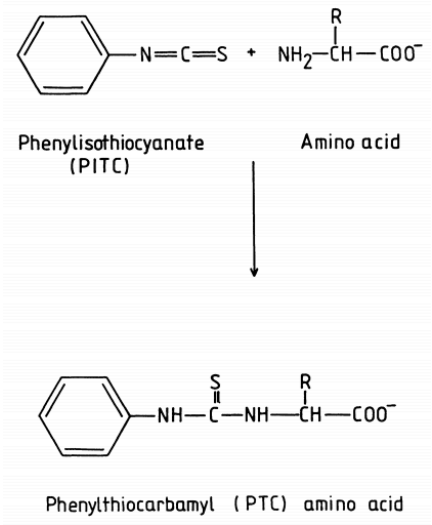


FIGURA 35 PRODUCCIÓN DE PTC AMINO ÁCIDO. FUENTE: (WHITE ET AL., 1986)

Resumiendo, este análisis comprende los siguientes procedimientos:

a) Hidrólisis convencional en ácido para liberar los aminoácidos constituyentes.
b) Preparación del hidrolizado para cromatografía, es decir, secado, re-secado y derivatización.
c) Separación de los derivados de PTC por HPLC (White et al., 1986).

3.9.3 COMPARACIÓN MÉTODOS DE SECADO

Se estudian las diferencias que existen, en el contenido de proteína total y perfil de aminoácidos, entre la pasta de lombriz y la harina producida por ambos métodos de secado, además, de las diferencias que presentan la harina secada por tambor rotatorio con la harina liofilizada.

Las diferencias para los parámetros (X) comparados, se calculan según:

Pasta de lombriz v/s HL liofilizada

$$[\%]diferencia = \frac{(X_{PL} - X_{HL\,lio})}{X_{PL}} \qquad (3.11)$$

Pasta de lombriz v/s HL secada por tambor rotatorio

$$[\%]diferencia = \frac{(X_{PL} - X_{HL\,tam})}{X_{PL}} \qquad (3.12)$$

HL liofilizada v/s HL secada por tambor rotatorio

$$[\%]diferencia = \frac{(X_{HL\,lio} - X_{HL\,tam})}{X_{HL\,lio}} \qquad (3.13)$$

Basados en el estudio realizado por Vielma Rondon et al. (2003), se considerará una diferencia mayor al 10% como significativa, al realizar las distintas comparaciones.

3.10 JUSTIFICACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DE HARINA DE LOMBRIZ COMO FUENTE DE PROTEÍNAS

3.6.11 VERIFICAR CUMPLIMIENTO REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS.

La FAO establece el requerimiento de aminoácidos, el cual se describe en la Tabla 6. Estos valores dependen de la edad, sexo y peso de la persona, además, consideran un consumo adicional para las mujeres embarazadas o en un período de lactancia.

Se contrasta el requerimiento de aminoácidos, cada 100 [g] de proteína consumida, establecido por la FAO, con el contenido de los mismos en la harina de lombrices producida con liofilizador y doble tambor rotatorio, con el fin de verificar su cumplimiento.

3.6.12 COMPARAR CON OTRAS FUENTES DE PROTEÍNA.

Se compara el contenido de aminoácidos, cada 100 [g] de producto, de la harina de lombrices con el de otras fuentes convencionales de proteína, como la carne de vacuno, pescado, leche y huevos, cuyo contenido de aminoácidos se muestra en la Tabla 7. De esta manera, se determinará qué tan favorable es considerar la harina de lombriz, producida con las dos metodologías de secado utilizadas, como una fuente de proteína, respecto de los alimentos mencionados anteriormente.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN LIOFILIZADOR

4.1.1 TIEMPO DE SECADO PRIMARIO

Se sometieron dos muestras a condiciones de secado primario por un tiempo extendido para observar el progreso de la temperatura del producto. Particularmente, es de interés el punto de inflexión que se produce al dejar de existir producto congelado, indicando el fin del secado primario.

La temperatura para cada una de las muestras en todo el período de secado se observa de la siguiente manera:

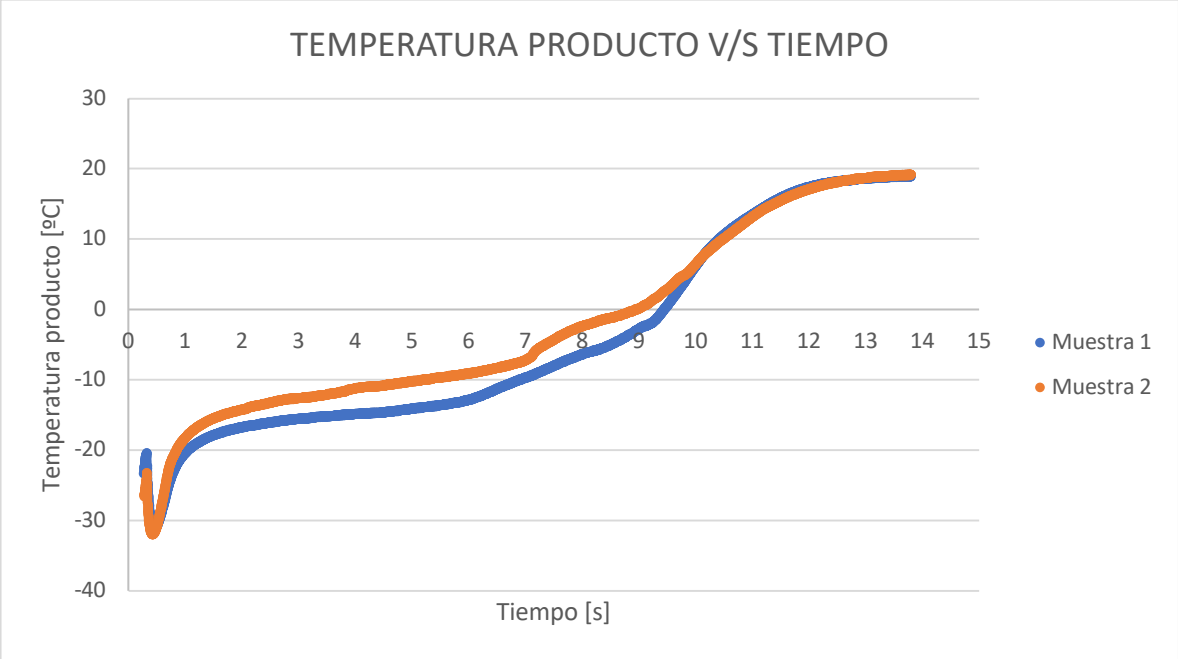


FIGURA 36 TEMPERATURA DEL PRODUCTO EN EL TIEMPO DURANTE EL SECADO PRIMARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Al ajustar los datos a la ecuación de Gompertz, para encontrar el punto de inflexión, se obtiene:

TABLA 10 TIEMPO DE SECADO PRIMARIO PARA DOS MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	a	b	c	Tiempo secado primario [h]
Muestra 1	0,094918	9,728379	1,003326	9,70
Muestra 2	0,084380	8,192273	0,823924	9,94

El tiempo de secado primario para cada muestra varía debido a que no todas ellas son exactamente iguales y, además, resulta imposible que la ubicación de la termocupla sea siempre la misma. El valor promedio para el tiempo de secado primario, y su respectiva desviación estándar corresponde a:

$$t_{secado\ primario} = 9{,}82 \pm 0{,}17[h]$$

4.1.2 HUMEDAD AL FINALIZAR EL SECADO PRIMARIO

Se lleva a cabo el secado primario en el liofilizador por 9,9897 [h]. En la Figura 37, se observa el comportamiento de la temperatura del condensador, la temperatura de la bandeja durante el proceso y la temperatura del producto de dos muestras. En tanto, se omite los datos de presión pirani y capacitiva por encontrarse descalibrados los sensores, mientras que la variación de presión por el cierre de la válvula no se registra por no encontrarse disponible el aparato.

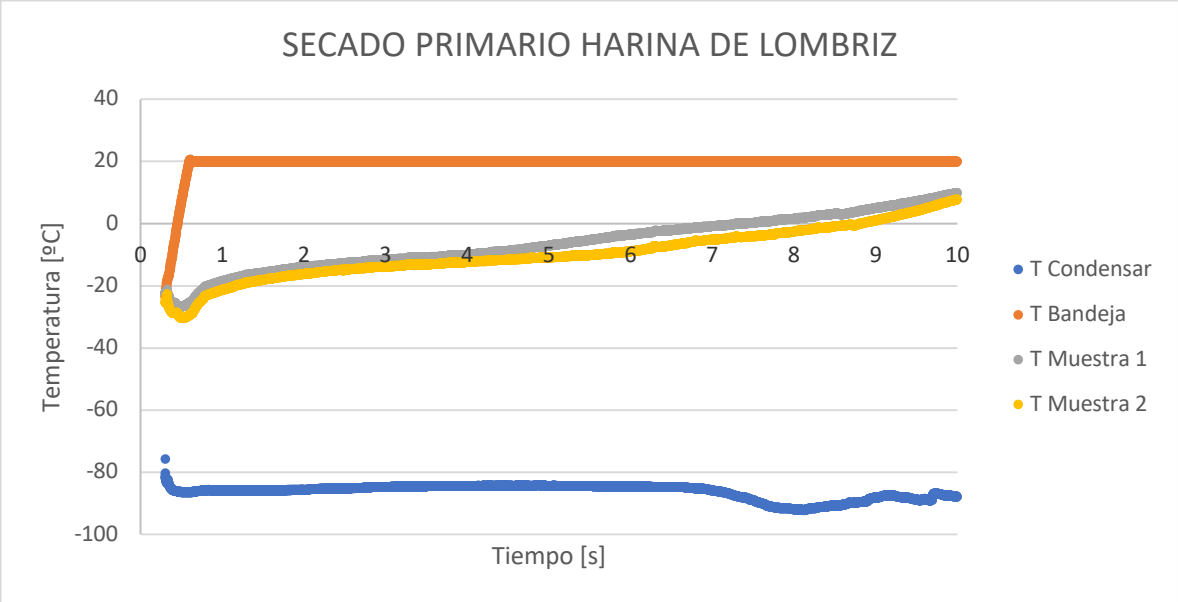


FIGURA 37 SECADO PRIMARIO HARINA DE LOMBRIZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En el secado primario, inicialmente la temperatura del condensador se mantiene constante debido a que hay un alto contenido de vapor de agua disponible que el condensador se encarga de congelar; sin embargo, luego de un tiempo, la cantidad de vapor de agua disminuye por lo que se produce un descenso en la temperatura del condensador, lo que indica el inicio del fin del secado primario. Por otro lado, la temperatura de las muestras se mantiene relativamente constante al comienzo debido a que se está llevando a cabo un cambio de fase de hielo a vapor (calor latente), pero a medida que

avanza el secado primario, va disminuyendo la cantidad de hielo y la muestra se calienta, hasta que se produce un punto de inflexión donde se habrá sublimado todo el hielo presente en la muestra.

Al terminar el secado primario, se mide inmediatamente la humedad de las muestras, cuyos resultados y su respectiva desviación estándar se presentan en la Tabla 11.

TABLA 11 HUMEDAD AL FINALIZAR EL SECADO PRIMARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	% Humedad (Base Húmeda)	
Muestra 1	7,18 ± 0,41	6,92 ± 0,37
Muestra 2	6,65 ± 0,19	
	% Humedad (Base Seca)	
Muestra 1	7,74 ± 0,48	7,43 ± 0,43
Muestra 2	7,13 ± 0,22	

Del secado primario resulta un producto estable, sin necesidad de aplicar secado secundario.

4.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN SECADOR TAMBOR ROTATORIO

4.2.1 CURVAS DE SECADO

Las curvas de secado obtenidas experimentalmente a 110 [ºC], 120 [ºC] y 130 [ºC], se construyen de acuerdo a los datos que se muestran en la Tabla 12.

TABLA 12 VALORES EXPERIMENTALES DE LA HUMEDAD EN EL TIEMPO A UNA DETERMINADA TEMPERATURA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	Humedad [%]					
Tiempo secado [s]	110 [ºC]		120 [ºC]		130 [ºC]	
	B.H.	B.S.	B.H.	B.S.	B.H.	B.S.
0	76,83±0,53	331,62±9,93	77,57±0,25	345,9±5,01	77,04±0,98	347,63±16,80
30	28,94±0,08	40,72±0,16	16,46±0,40	19,71±0,57	3,30±0,05	3,42±0,17
40	22,81±0,09	29,55±0,16	12,53±0,07	14,33±0,10	2,45±0,00	2,51±0,13
50	18,55±0,35	22,77±0,53	10,16±0,23	11,31±0,28	2,14±0,00	2,19±0,11
60	16,15±0,02	19,26±0,03	8,75±0,16	9,59±0,19	1,57±0,04	1,60±0,08
70	14,72±0,00	17,25±0,00	7,46±0,19	8,06±0,23	1,45±0,02	1,47±0,07
80	13,00±0,04	14,95±0,05	7,11±0,00	7,66±0,00	1,46±0,04	1,48±0,07
90	12,66±0,04	14,50±0,05	7,11±0,02	7,66±0,02	1,45±0,00	1,47±0,07
100	12,66±0,04	14,50±0,05	7,11±0,01	7,66±0,01	1,45±0,01	1,47±0,07

En la Figura 38, se grafican las tres curvas de secado con la humedad expresada en base húmeda, donde se observa que, a menor temperatura de secado, mayor es la humedad obtenida para un mismo tiempo de operación. Además, la humedad de equilibrio se alcanza en un menor tiempo a mayor temperatura de operación, y es más alta a menor temperatura de secado.

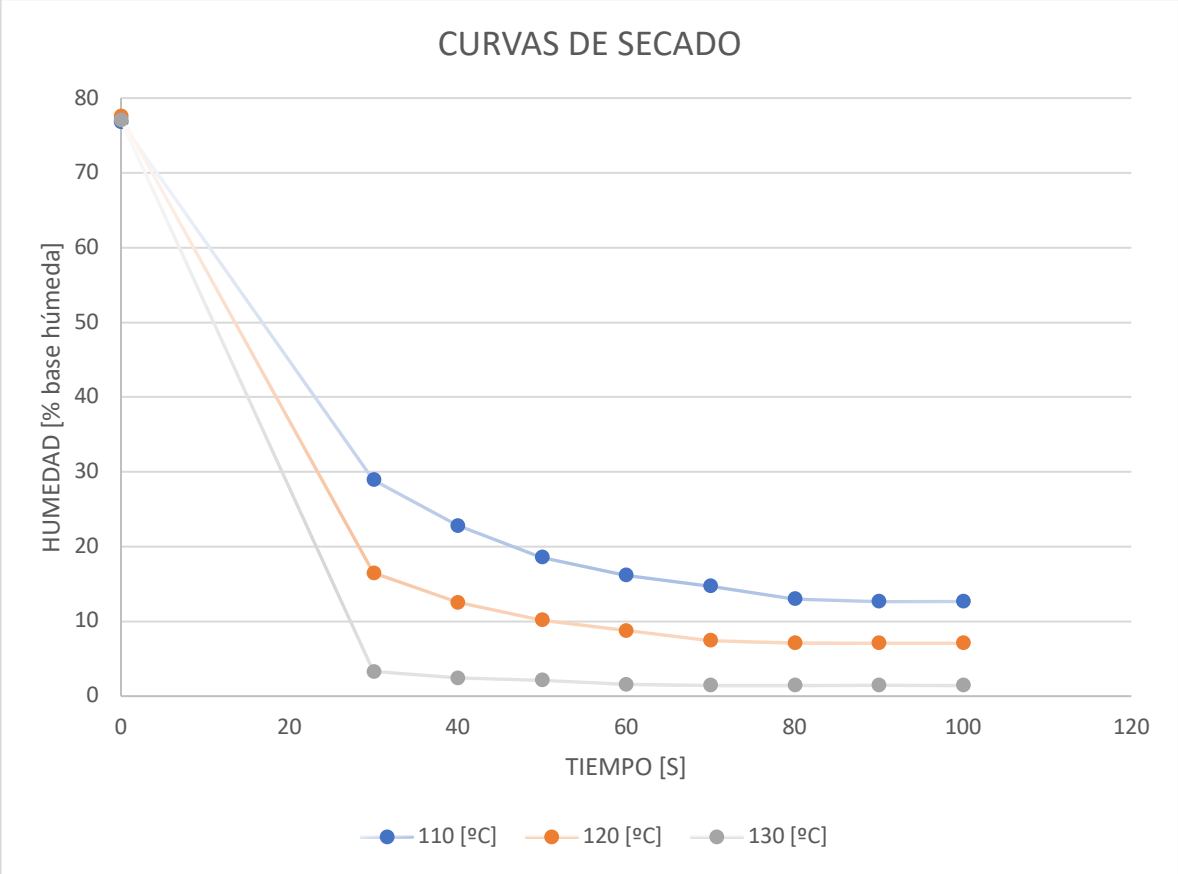


FIGURA 38 HUMEDAD (BASE HÚMEDA) V/S TIEMPO A 110 [ºC], 120 [ºC] Y 130 [ºC]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Mientras que en la Figura 39, se muestran las curvas de secado expresando la humedad en base seca.

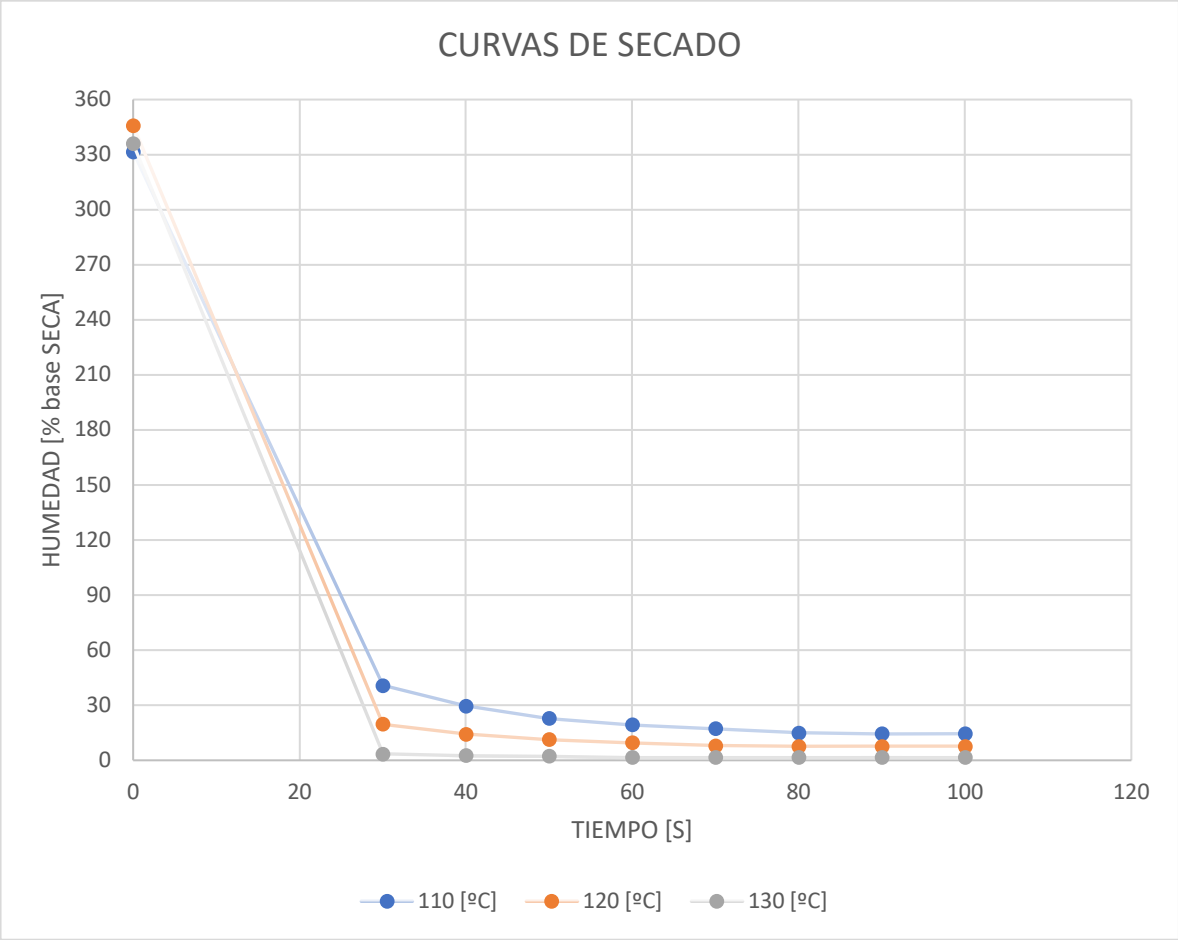


FIGURA 39 HUMEDAD (BASE SECA) V/S TIEMPO A 110 [ºC], 120 [ºC] Y 130 [ºC]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

4.2.2 RELACIÓN SEMIEMPÍRICA

Se itera el valor de la constante cinética, K, hasta que la humedad teórica obtenida con dicho valor, tenga un mínimo de error respecto a la humedad alcanzada experimentalmente. De esta forma, los valores de K para las distintas temperaturas de operación son los siguientes:

TABLA 13 VALOR CONSTANTE CINÉTICA A 110[ºC], 120[ºC] Y 130[ºC]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	110 [ºC]	120 [ºC]	130 [ºC]
K	0,047	0,066	0,120

Ahora es posible graficar Ln(K) v/s 1/T (ver Figura 40), donde la tendencia trazada representa la linealización de la ecuación de arrhenius (ecuación 3.9).

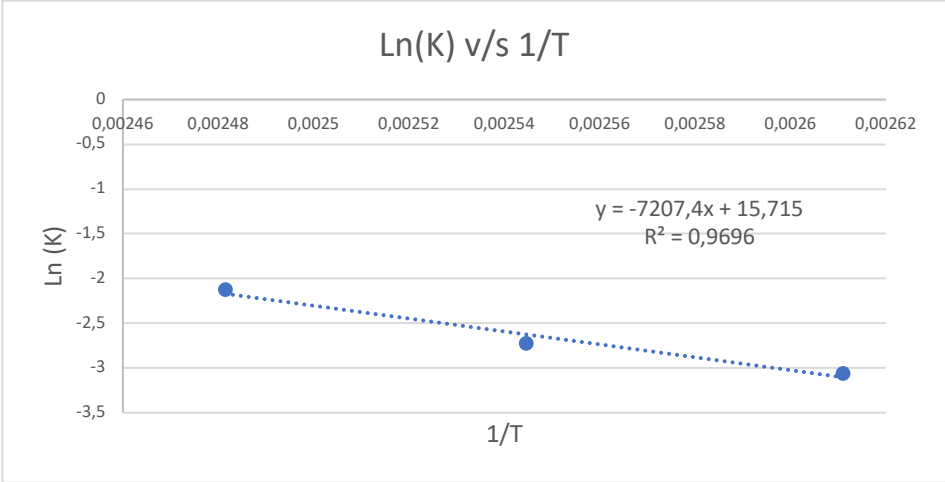


FIGURA 40 GRÁFICA LN(K) V/S 1/T. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

TABLA 14 PARÁMETROS ECUACIÓN DE ARRHENIUS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

PARÁMETROS ARRHENIUS		
R	8,314	[J/mol K]
Intercepto	15,715	
A	6682481,78	[1/min]
Pendiente	-7207,4	
Ea	-59922,324	[J/mol]
	-59,922324	[KJ/mol]

Entonces, la constante cinética a una determinada temperatura queda definida según:

$$K = 6682481{,}78 \cdot e^{-\frac{-59922{,}324}{8{,}314 \cdot T[K]}} \qquad (4.1)$$

En tanto, la humedad de equilibrio a una temperatura de operación específica se obtiene a partir de una aproximación lineal de los datos experimentales de la misma, según se observa en Figura 41.

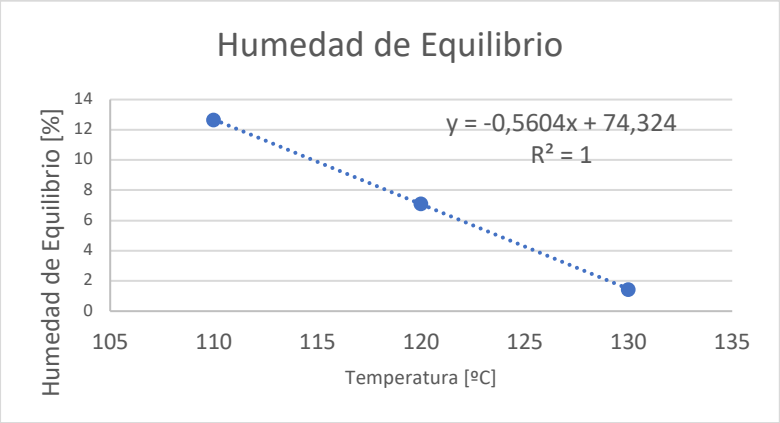


FIGURA 41 GRÁFICA HUMEDAD DE EQUILIBRIO V/S TEMPERATURA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

Por lo tanto, la humedad de equilibrio depende de la temperatura de acuerdo a:

$$W_e = -0{,}5604 \cdot T[ºC] + 74{,}324 \qquad (4.2)$$

Finalmente, la humedad del producto al secarse un tiempo específico y a una determinada temperatura, estimando una humedad inicial del 79%, se define por la ecuación 4.3

$$W_f = W_e + \exp\left(-6682481{,}78 \cdot t \cdot \exp\left(\frac{59922{,}324}{8{,}314 \cdot T[K]}\right)\right) \cdot (0{,}79 - W_e) \qquad (4.3)$$

De acuerdo a esta relación, se tiene que operando a 130 [ºC] por 23 [s] es posible obtener una harina de lombriz con 7% de humedad, similar a la que contiene la harina al finalizar la liofilización.

4.3 ELECCIÓN MÉTODO DE SECADO

4.3.1 ANÁLISIS DE PROTEÍNA TOTAL

TABLA 15 [G/100 G MASA SECA] PROTEÍNA TOTAL EN 3 MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

PROTEÍNA TOTAL [g/100 g masa seca]	
Harina de Lombriz (Tambor rotatorio)	$53{,}42 \pm 0{,}37$
Harina de Lombriz (Liofilizador)	$64{,}51 \pm 0{,}53$
Pasta de lombriz (sin secar)	$68{,}69 \pm 26{,}09$

Los resultados son los esperados de acuerdo a lo señalado por otros investigadores y se comprueba que la harina de lombriz posee un alto contenido de proteínas.

Se observa una elevada desviación estándar en el contenido de la proteína total de la pasta de lombriz, lo cual se debe a que, al no tratarse de una mezcla homogénea, la medición presenta una mayor variabilidad.

4.3.2 ANÁLISIS DEL PERIFIL DE AMINOÁCIDOS

TABLA 16 [G AA RECUPERADOS /100 G MASA SECA] AMINOÁCIDO EN TRES MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	CONTENIDO AMINOÁCIDOS [g AA recuperados /100 g masa seca]		
AMINOÁCIDO	HARINA DE LOMBRIZ (Tambor rotatorio)	HARINA DE LOMBRIZ (Liofilizador)	PASTA DE LOMBRIZ (Sin secar)
Aminoácidos Esenciales			
Fenilalanina	1,14 ± 0,05	1,36 ± 0,11	1,78 ± 0,47
Isoleucina	1,54 ± 0,07	1,91 ± 0,01	2,20 ± 0,49
Leucina	2,30 ± 0,02	2,71 ± 0,14	3,12 ± 1,05
Lisina	1,67 ± 0,16	2,09 ± 2,00	2,98 ± 0,94
Treonina	1,50 ± 0,00	1,78 ± 0,02	2,21 ± 0,59
Valina	1,49 ± 0,03	1,72 ± 0,03	2,25 ± 0,64
Arginina	1,54 ± 0,04	1,55 ± 0,05	2,17 ± 0,65
Histidina	0,63 ± 0,02	0,71 ± 0,01	0,59 ± 0,19
Metionina	0,64 ± 0,00	0,65 ± 0,02	0,77 ± 0,20
Aminoácidos No Esenciales			
Ácido aspártico	4,06 ± 0,07	4,98 ± 0,13	4,72 ± 0,13
Ácido glutámico	5,55 ± 0,04	6,16 ± 0,01	8,47 ± 0,22
Serina	1,75 ± 0,01	2,01 ± 0,01	1,82 ± 0,52
Glicina	2,15 ± 0,02	2,21 ± 0,02	2,97 ± 0,87
Alanina	2,53 ± 0,01	2,56 ± 0,13	3,29 ± 0,93
Prolina	0,89 ± 0,02	0,97 ± 0,05	1,45 ± 0,43
Tirosina	0,26 ± 0,01	0,32 ± 0,03	0,42 ± 0,12
Total	29,30 ± 0,46	33,60± 0,61	41,21 ± 8,51

Cuando se realiza el análisis para conocer el perfil aminoacídico, y el contenido de proteína total supera el 50% en una muestra, el procedimiento se satura; por esta razón, el rendimiento en la determinación de la cantidad de aminoácidos disminuye, y el contenido total de aminoácidos difiere respecto al de proteína total. Entonces, como una aproximación, se ajustan los resultados de la cantidad de aminoácidos recuperados a la cantidad de proteína total contenida en las muestras, obteniéndose lo siguiente:

TABLA 17 [G AA/100 G MASA SECA] AMINOÁCIDO EN TRES MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	CONTENIDO AMINOÁCIDOS [g AA /100 g masa seca]		
AMINOÁCIDO	HARINA DE LOMBRIZ (Tambor rotatorio)	HARINA DE LOMBRIZ (Liofilizador)	PASTA DE LOMBRIZ (Sin secar)
Aminoácidos Esenciales			
Fenilalanina	2,06 ± 0,05	2,26 ± 0,16	2,96 ± 0,18
Isoleucina	2,77 ± 0,09	3,66 ± 0,05	3,66 ± 0,07
Leucina	4,14 ± 0,04	5,20 ± 0,17	5,13 ± 0,69
Lisina	3,01 ± 0,24	3,83 ± 0,20	4,91 ± 0,56
Treonina	2,70 ± 0,03	3,43 ± 0,03	3,66 ± 0,07
Valina	2,68 ± 0,02	3,30 ± 0,01	3,72 ± 0,31
Arginina	2,77 ± 0,03	2,98 ± 0,04	3,59 ± 0,35
Histidina	0,63 ± 0,02	1,35 ± 0,01	0,98 ± 0,12
Metionina	0,64 ± 0,00	1,24 ± 0,02	1,27 ± 0,08
Aminoácidos No Esenciales			
Ácido aspártico	7,31 ± 0,02	9,56 ± 0,07	8,01 ± 1,42
Ácido glutámico	10,01 ± 0,08	11,83 ± 0,23	14,38 ± 2,58
Serina	3,16 ± 0,06	3,87 ± 0,09	3,01 ± 0,25
Glicina	3,87 ± 0,10	4,24 ± 0,03	4,90 ± 0,44
Alanina	4,57 ± 0,06	4,92 ± 0,33	5,44 ± 0,43
Prolina	1,60 ± 0,06	1,87 ± 0,06	2,39 ± 0,23
Tirosina	0,47 ± 0,00	0,61 ± 0,05	0,69 ± 0,06
Total	53,42	64,51	68,69

Esta aproximación no es del todo certera, pues, no fueron analizados todos los aminoácidos y, parte del valor de proteína total, pudiera proceder de otras fuentes que no correspondan a la carne de lombriz, sin embargo, nos acerca al real contenido de aminoácidos de la harina analizada.

Cabe señalar, que la metodología Pico Tag utilizada contempla un error del 16% en sus resultados (White et al., 1986). Particularmente, la muestra de pasta de lombriz, presentó mayor dificultad al ser analizada debido a que no se pudo llevar a cabo correctamente la homogeneización por no ser suficiente la cantidad de muestra disponible, lo cual derivó en que las porciones tomadas para realizar las mediciones pudieron presentar variado contenido de agua y la cantidad de aminoácidos reportada esté mayormente propensa a ser errónea.

El contenido de los aminoácidos analizados en la pasta de lombriz, en la harina de lombriz liofilizada y la secada por tambor rotatorio, con sus respectivas barras de error, se presentan gráficamente a continuación:

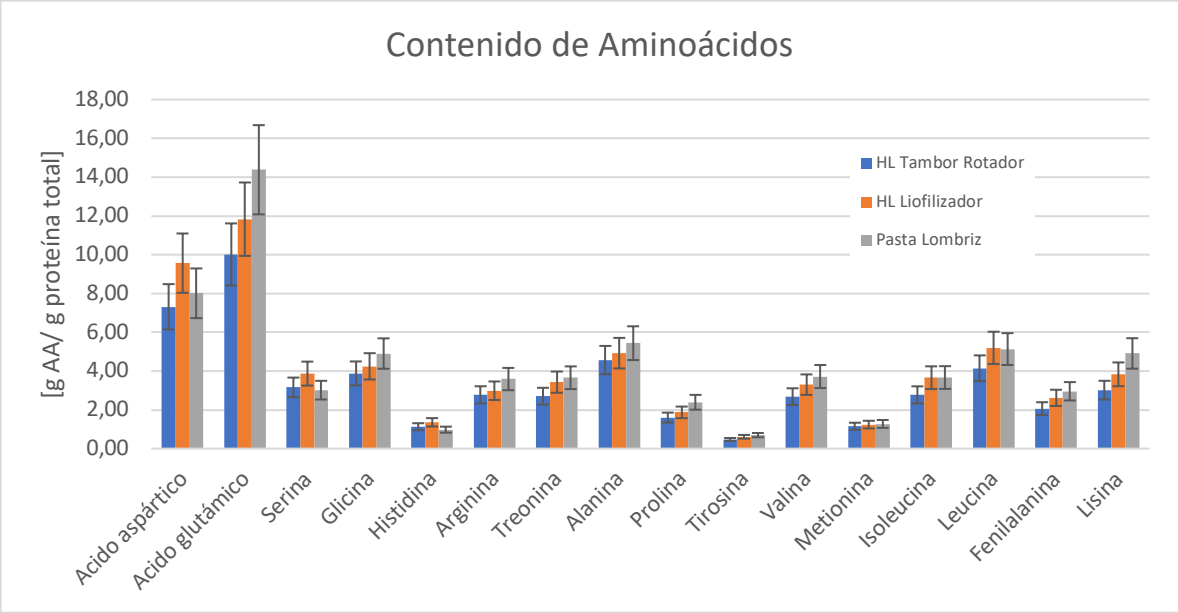


FIGURA 42 CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN TRES MUESTRAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

4.3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO

PROTEÍNA TOTAL

El efecto generado por el secado de los productos obtenidos mediante ambas tecnologías de secado de la pasta de lombriz, genera una diferencia en el contenido de proteína total en la harina producida que se describe a continuación:

TABLA 18 DIFERENCIA CONTENIDO DE PROTEÍNA TOTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

DIFERENCIA CONTENIDO PROTEÍNA TOTAL	
Pasta de Lombriz v/s HL Tambor rotatorio	22,23 %
Pasta de Lombriz v/s HL Liofilizador	6,09 %
HL Liofilizador v/s HL Tambor rotatorio	17,19 %

El secado de la pasta de lombriz, influye en gran manera en la cantidad de proteína total de la harina obtenida por tambor rotatorio, sin embargo, no sucede lo mismo al utilizar el liofilizador, cuya diferencia es inferior al 10%.

Por otro lado, la cantidad de proteína total que posee la harina de lombriz secada por liofilizador presenta una diferencia mayor al 10% respecto a la obtenida por medio de secador doble tambor rotatorio, lo que representa una diferencia considerable.

Entonces, considerando que el tambor rotatorio, a diferencia del liofilizador, genera una diferencia importante en el contenido de proteína total respecto a la pasta de lombriz, y que es considerablemente menor al que posee la harina de lombriz liofilizada, se puede decir que si se pretende conseguir un producto con alto contenido de proteína total, se recomienda el uso de liofilizador para secar la pasta de lombrices.

PERFIL DE AMINOÁCIDOS

La desigualdad en el contenido de aminoácidos que provocan ambas tecnologías de secado en la pasta de lombriz, y la diferencia existente entre las harinas obtenidas mediante ambas metodologías se tabulan a continuación:

TABLA 19 DIFERENCIAS EN EL CONTENIDO DE AMONIÁCIDOS ENTRE LA PASTA DE LOMBRIZ (SIN SECAR), HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR TAMBOR ROTATORIO Y HARINA DE LOMBRIZ LIOFILIZADA.FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

AMINOÁCIDO	Pasta de Lombriz v/s HL Tambor rotatorio	Pasta de Lombriz v/s HL Liofilizador	HL Liofilizador v/s HL Tambor rotatorio
Aminoácidos Esenciales			
Fenilalanina	8,71 %	11,46 %	21,20 %
Isoleucina	24,45 %	0,18 %	24,32 %
Leucina	19,25 %	-1,23 %	20,23 %
Lisina	38,58 %	21,94 %	21,31 %
Treonina	26,04 %	6,25 %	21,11 %
Valina	27,81 %	11,21 %	18,69 %
Arginina	22,72 %	16,79 %	7,13 %
Histidina	-15,58 %	-38,67 %	16,65 %
Metionina	9,60 %	2,71 %	7,08 %
Aminoácidos No Esenciales			
Ácido aspártico	8,71 %	-19,40 %	23,55 %
Ácido glutámico	30,38 %	17,72 %	15,38 %
Serina	-4, 78 %	-28,33 %	18,36 %
Glicina	20,95 %	13,47 %	8,64 %
Alanina	16,05 %	9,49 %	7,25 %
Prolina	33,00 %	21,71 %	14,42 %
Tirosina	32,04 %	12,53 %	22,31 %

Se observa que algunos aminoácidos, como el ácido aspártico, serina, histidina y leucina, se encuentran en mayor cantidad luego de haber sido sometidos a secado, sin embargo, esto no es

posible, ya que este proceso provoca la desnaturalización de los aminoácidos, no la generación de los mismos. Estos resultados son consecuencia de errores experimentales, provocados por la poca cantidad de muestra disponible que complicó la realización del análisis. A pesar de ello, es posible destacar que las diferencias registradas en el contenido de los distintos aminoácidos son mayores en la harina de lombriz secada por tambor rotatorio respecto a la pasta de lombriz, que las diferencias generadas al utilizar liofilizador.

Ahora, analizando las diferencias existentes en el perfil de aminoácidos entre las harinas producidas con los dos métodos de secado utilizados, se tiene que la cantidad de aminoácidos es considerablemente mayor, pues supera el 10% de diferencia, en la harina liofilizada respecto a la secada por tambor rotatorio en 12 de los 16 aminoácidos analizados, y entre de ellos, se encuentran algunos aminoácidos esenciales tales como la fenilalanina, isoleucina, leucina, lisina, treonina, valina e histidina.

Particularmente, la lisina es en gran medida sensible a las altas temperaturas, donde suele reaccionar con grupos carboxilos o con la misma proteína. El estudio de su contenido es importante, debido a que generalmente es un aminoácido limitante en los distintos alimentos, al igual que la metionina. Ambos aminoácidos se encuentran en mayor cantidad en la harina liofilizada, aunque solo la lisina presenta una diferencia mayor al 10% en la harina de lombriz liofilizada.

Dado que el contenido de importantes aminoácidos esenciales es mejor preservado al utilizar liofilizador, se opta por este método como el indicado para la producción de harina si se desea conseguir un producto con un contenido de aminoácidos óptimo.

4.4 HARINA DE LOMBRIZ COMO FUENTE DE PROTEÍNA

4.4.1. CUMPLIMIENTO REQUISITOS DE LA FAO

La mínima cantidad de aminoácidos que debe ingerir el ser humano diariamente es establecida por la FAO (ver Tabla 6). En la Figura 43 se grafica el consumo de aminoácidos requerido a distintas edades y el contenido de aminoácidos cada 100 [g] de proteína consumida como base de cálculo, para verificar el cumplimiento de los requisitos de la FAO. Los resultados específicos se encuentran en la Tabla 24 del Anexo 8.3.1.

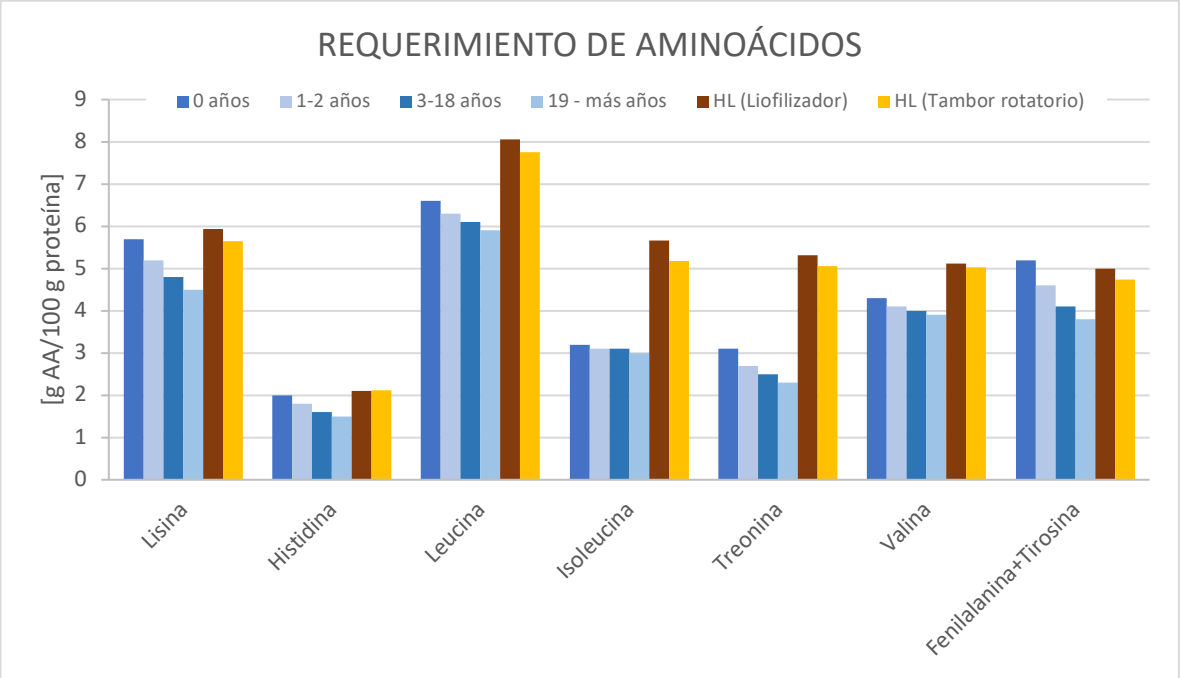


FIGURA 43 REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS Y SU CONTENIDO EN LA HARINA DE LOMBRIZ CADA 100 [G] DE PROTEÍNA CONSUMIDA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

A partir de los datos entregados por el análisis realizado, se verifica que las harinas obtenidas mediante el secado por doble tambor rotatorio y liofilizador, son capaces de cubrir las necesidades mínimas de aminoácidos esenciales, ya que, a pesar de que no satisfacen los 5,2 g de fenilalanina + tirosina requerido durante la lactancia, este segmento de personas no representa un consumidor del producto. Para el caso de los aminoácidos esenciales cuyo contenido no fue informado por el análisis, como el triptófano y cisteína+metionina, no es posible constatar el cumplimiento de esos requerimientos, sin embargo, de no cumplirlos, es posible suplir las faltantes con otros alimentos en la dieta.

Los resultados comentados anteriormente, representan una proporcionalidad respecto a 100 g de proteína total consumida, sin embargo, cabe señalar que el total de proteína que se debe consumir diariamente depende de la edad, sexo y peso de la persona. De todas formas, esto nos permite afirmar que, con solo consumir la cantidad mínima de proteína total que demanda el cuerpo humano para su correcto funcionamiento a partir de harina de lombriz, se satisfacen los requerimientos mínimos de ingesta de aminoácidos y, por consiguiente, se establece que no posee aminoácidos limitantes, al igual que las principales fuentes convencionales de proteína, como la carne, pescado, leche y huevo.

Por ejemplo, para el caso de una persona mayor de 18 años que debe consumir al menos 1 [g] de proteína al día por [Kg] corporal, dicho requerimiento equivale a la ingesta de 0,5806 [g] de harina de lombriz. Si la persona posee una masa corporal de 60 [Kg], debe consumir 34,84 [g] de harina para suplir el requerimiento de aminoácidos, para lo que se utilizan aproximadamente 129 [g] de lombriz pretratada. Sin embargo, es preciso señalar, que nadie consume el total de proteínas a partir de solo un alimento, si no que de una dieta variada.

4.4.2 VENTAJAS RESPECTO A UNA FUENTE CONVENCIONAL DE PROTEÍNA

Actualmente, el consumo de proteínas está principalmente ligado a alimentos convencionales, dentro de los cuales se encuentran la carne de vacuno, pescado, leche y huevo. En este ítem, se compara el contenido de aminoácidos de la harina de lombriz, obtenida con ambas metodologías de secado, con el de las fuentes de proteína mencionadas anteriormente. Los valores exactos se encuentran en la Tabla 25 del Anexo 8.3.2.

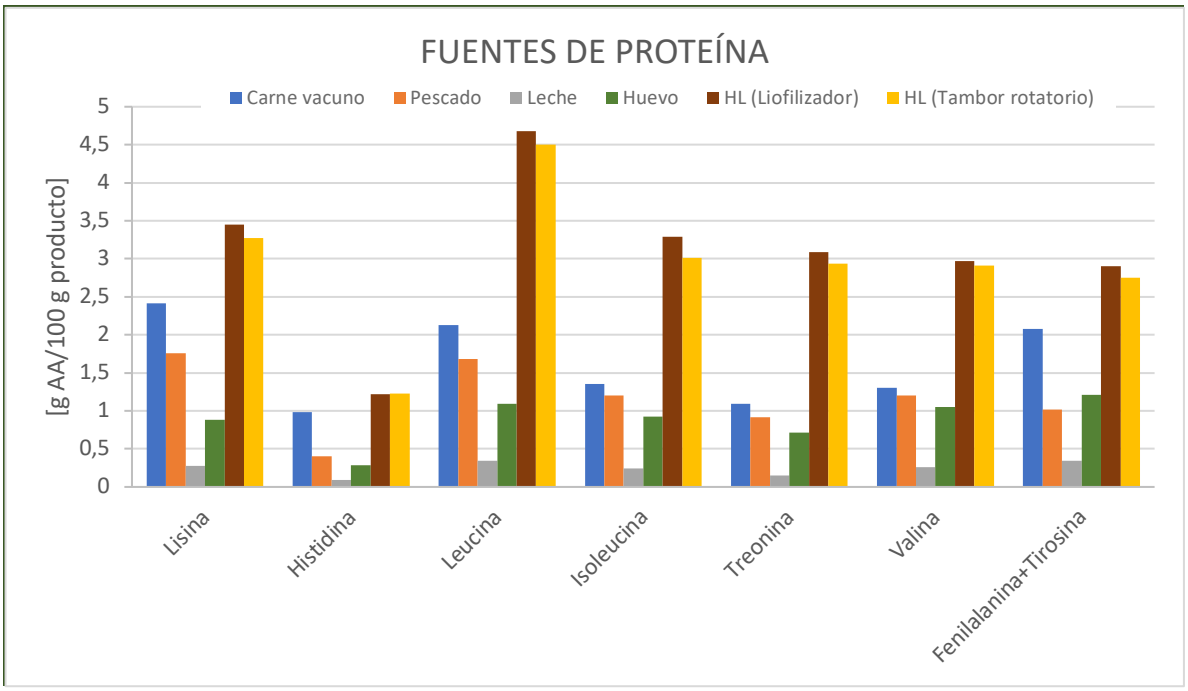


FIGURA 44 CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN 100 [G] DE PRODUCTO EN DISTINTAS FUENTES DE PROTEÍNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la Figura 44 se verifica que la harina de lombriz posee un contenido superior de aminoácidos esenciales respecto a la carne de vacuno, pescado, leche y huevo, cada 100 [g] de producto. Lo cual

garantiza, eventualmente, la posible sustitución, total o parcial, de las distintas fuentes de proteína mencionadas, por la harina de lombriz al ser secada por doble tambor rotatorio o liofilizador.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Es factible obtener harina de lombriz estable utilizando las tecnologías del secador por doble tambor rotatorio y liofilizador, cuya composición de proteína y aminoácidos cumple con los requerimientos establecidos por la FAO, en ambos casos.

La harina de lombriz es una alternativa prometedora para considerarse como un alimento alto en proteínas, ya que su concentración es mayor al de las fuentes convencionales de proteína existentes, tal como lo son las carnes, pescaos, huevo y leche. Además, su proceso productivo genera un impacto medio ambiental mínimo, a diferencia de la ganadería.

Aún cuando la harina de lombriz liofilizada posee un contenido de aminoácidos considerablemente mayor que el de la harina secada por doble rotatorio, ambas cumplen con los requisitos mínimos de consumo establecidos por la FAO y superan el contenido de aminoácidos de las fuentes convencionales de proteína. Bajo este escenario, el secado por doble tambor rotatorio, se escoge como la metodología de secado más apropiada desde el punto de vista proteico, ya que, es menos costosa, de uso más simple y requiere un menor tiempo de operación.

Es posible conseguir harina de lombriz estable al finalizar el secado primario de la liofilización, cuya humedad es de 6,92% (base húmeda), condición que se alcanza con el secador doble tambor rotatorio operando a 130[ºC] por 23[s].

RECOMENDACIONES

Si bien la harina de lombriz representa una alternativa como fuente de proteína para el ser humano, su consumo no es atractivo para las personas debido a barreras culturales, por lo que se recomienda la creación de un producto que utilice a la harina de lombriz como un ingrediente, de tal modo que sea mayormente aceptado.

El contenido y calidad de la proteína que constituye la harina de lombriz, se puede ver afectado por otros factores, como el pretratamiento, la crianza de las lombrices y/o condiciones de operación, por esta razón, se sugiere estudiar cómo afectan estas variables.

Las lombrices conforman la materia prima del producto en estudio, por lo que la optimización de su crecimiento y reproducción es sustancial a la hora de pensar en la producción de harina de lombriz.

Se recomienda realizar más análisis del perfil de aminoácidos, de tal manera que al contar con más datos sea posible elaborar un análisis estadístico de diferencias significativas, que permita entregar conclusiones más robustas del estudio.

CAPÍTULO 7: REFERENCIAS

Alvarado, J. D. D. (2014). *Principios de Ingeniería Aplicados en Alimentos*.

Babić, J., Cantalejo, M. J., & Arroqui, C. (2009). The effects of freeze-drying process parameters on Broiler chicken breast meat. *LWT - Food Science and Technology*, *42*(8), 1325–1334.

Bardat, A., Biguet, J., Chatenet, E., Sci, P. D. A. J. P., Biguet, A. B. J., Chatenet, E., & Courteille, F. (1993). Moisture Measurement : A New Method for Monitoring Freeze-drying Cycles Moisture Measurement : A New Method for Monitoring Freeze-drying Cycles.

Barresi, A. A., Pisano, R., Fissore, D., Rasetto, V., Velardi, S. A., Vallan, A., … Galan, M. (2009). Monitoring of the primary drying of a lyophilization process in vials. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *48*(1), 408–423.

Bonaui, C., Dumoulin, E., Raoult-Wack, A.-L., Berk, Z., Bimbenet, J. J., Courtois, F., … Vasseur, J. (1996). Food Drying and Dewatering. *Drying Technology*, *14*(9), 2135–2170.

Boulogne, S., Márquez, E., García, Y., Medina, A., & Cayot, P. (2008). Optimización de la operación de secado de la carne de lombriz (Eisenia Andrei) para producir harina destinada al consumo animal. *Revista Ciencia e Ingeniería*, *29*(2), 91–96.

Burges, A., & Glasauer, P. (2006). Guía de Nutrición de la Familia. *Ciencia*, 121–135.

Busisiwe, G., Masika, P., Arno, H., & Voster, M. (2016). Nutrient Composition and Fatty Acid Profiles of Oven-dried and Freeze-dried Earthworm Eisenia foetida. *Journal of Food and Nutrition Research*, *4*(6), 343–348.

Carrera, M. (1920). Una nueva visión de la lombricultura.

Chaoui, H. (2010). Vermicasting (or Vermicomposting): Processing Organic Wastes Through Earthworms. *Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*, (10), 1–8.

Díaz, E. (2002). Guía de Lombricultura. *ADEX*, 9–11.

Dynes, R. A. (2003). Technology information to enable the development of earthworm production, (03), 39.

FAO. (2018). Proteínas | Nutrición | FAO. Retrieved October 1, 2018, from http://www.fao.org/nutrition/requisitos-nutricionales/proteinas/es/

FAO. (2013). *Edible insects. Future prospects for food and feed security*. *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Vol. 171).

FAO. (2014). Necesidades Nutricionales. *FAO*, 30–64.

Fennema, O. (2000). *Química de los alimentos*. *Editorial Acribia*.

Gavrielidou, M. A., Valous, N. A., Karapantsios, T. D., & Raphaelides, S. N. (2002). Heat transport to a starch slurry gelatinizing between the drums of a double drum dryer. *Journal of Food Engineering*, *54*, 45–58.

Hatley, R. H. M., & F. Franks. (1991). Applications of Dsc in the Development of Improved Freeze-Drying Processes for Labile Biologicals. *Journal OfThermal Analysis*, *37*, 1905–1914.

Heldman, D., & Moraru, C. (2000). *Agricultural, Food, and Biological Engineering* (Vol. 2).

Ishii, Y., Ishii, K., Sumi, H., Yoshida, E., & Ishii, S. (2009). *EP2316464A1*.

Ishii, Y., Sumi, H., & Yoshida, E. (2012). Method of producing a dry earthworm powder.

Karmas, R., Buera, M. P., & Karel, M. (1992). Effect of Glass Transition on Rates of Nonenzymic Browning in Food Systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *40*(5), 873–879.

Kharaghabi, A., Tsotsas, E., & Wolf, C. (2017). Freeze - Drying. *Ullmann's. Encyclopedia of Industrial Chemistry*.

Latham, M. C. (2002). Nutrición humana en el mundo en desarrollo. *FAO*, 23–42.

Maupoey, P. F., María, A., Grau, A., Manuel, J., Baviera, B., & Sorolla, A. (2001). Introduccion Al Secado De Alimentos.

Mayeresse, Y., Veillon, R., Sibille, P., & Nomine, C. (2007). Freeze-drying process monitoring using a cold plasma ionization device. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, *61*(3), 160–174.

Medina, A. L., Cova, J. A., Vielma, R. A., Pujic, P., Carlos, M. P., & Torres, J. V. (2003). Immunological and chemical analysis of proteins from Eisenia foetida earthworm. *Food and Agricultural Immunology*, *15*(3–4), 255–263.

Medina, A. L., & Araque, J. (1999). Obtención, composición química, funcional, perfiles electroforéticos y calidad bacteriológica de la carne y harina de lombriz. *Rev. Fac. Farm. (Merida)*, *37*(October 1999), 31–38.

Milton, N., Pikal, M., Roy, M., & Nail, S. (1997). Evaluation of manometric temperature measurement as a method of monitoring product temperature during lyophilization. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, *51*(1), 7–16.

Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2015). *Lehninger, principles of biochemistry*. *Omega*.

Oonincx, D. G. A. B., & de Boer, I. J. M. (2012). Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans - A Life Cycle Assessment. *PLoS ONE*, *7*(12), 1–5.

Orrego, C. (2017). *Congelación y Liofilización de alimentos*. *Drying Technology* (Vol. 29).

Ovalles, J., Medina, A., Márquez, E., & Rial, L. (2018). Efecto del proceso de secado de lombriz de tierra (Eisenia andrei) sobre el perfil aminoacídico de la harina determinado por cromatografía (CLAE), (December 2017).

Parzanese, M. (2009). Tecnologías para la Industria Alimentaria: Liofilización de alimentos. *Alimentos Argentinos*, 1–12.

Patel, S. M., Doen, T., & Pikal, M. J. (2010). Determination of End Point of Primary Drying in Freeze-Drying Process Control. *AAPS PharmSciTech*, *11*(1), 73–84.

Ratti, C. (2013). *Freeze drying for food powder production*. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. Woodhead Publishing Limited.

Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, *49*(4), 311–319.

Sales Dávila, F. (1996). Harina de lombriz, alternativa proteica en tropico y tipos de alimento. *Folia Amazónica*, *8*(2), 77–90.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & Haan, C. (2009). *La larga sombra del ganado problemas ambientales y opciones*. *Environmental Modeling and Assessment* (Vol. 14).

Straub, R., Tung, J. Y., Koegel, R. G., & Bruhn, H. D. (1979). Drum Drying of Plant Juice Protein Concentrates. *American Society of Agricultural Engineers*, 484–487.

Tacon, A. G. J., Stafford, E. A., & Edwards, C. A. (1983). A preliminary investigation of the nutritive value of three terrestrial lumbricid worms for rainbow trout. *Elservier Science Published B.V.*, *35*, 187–199.

Tang, X. C., & Pikal, M. J. (2004). Design of Freeze-Drying Processes for Pharmaceuticals: Practical Advice. *Plenum Publishing Corporation*, *21*(2).

Velasquez, Herrera, & Ibañez. (1986). *Harina de Lombriz 1 parte: Obtención, composición química, valor nutricional y calidad bacteriológica.*

Vielma Rondon, R., Ovalles Duran, J., León Leal, A., & Medina, A. (2003). Valor nutritivo de la harina de lombriz (Eisenia foetida) como fuente de aminoácidos y su estimación cuantitativa mediante cromatografía en fase reversa (HPLC) y derivatización precolumna con o-ftalaldehído (OPA). *Ars Pharmaceutica*, (15), 43–58.

Vielma, A. R., Carrero, P., Rondon, C., & Medina, A. L. (2007). Comparación del contenido de minerales y elementos trazas en la harina de lombriz de tierra (Eisenia foetida) utilizando dos métodos de secado. *Redalyc*, *19*, 83–89.

Vielma, R., & Medina, A. L. (2006). Determinación de la composición química y estudios de solubilidad en la harina de lombriz Eisenia foetida . *Revista de La Facultad de Farmacia*, *48*(1), 7.

Von Loesecke, H. (1965). Drying and deshidration of foods. *Reinholt Publishing Co.*

Wang, K. Y., Tull, L., Cooper, E., Wang, N., & Liu, D. (2013). Recombinant protein production of earthworm lumbrokinase for potential antithrombotic application. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*.

White, J. ., Hart, R. ., & Fry, J. . (1986). An Evaluation of The Waters Pico-Tag system for the amino-acid analysis of food materials. *Journal of Automatic Chemistry*, *8*(4), 170–177.

WHO/FAO/UNU. (2007). Protein and amino acid requirements in human nutrition. *WHO Technical Report Series*.

Wu, G. (2009). Amino acids: Metabolism, functions, and nutrition. *Amino Acids*, *37*(1), 1–17.

Zhenjun, S., Xianchun, L., Lihui, S., & Chunyang, S. (1996). Earthworm as a potential protein resource. *Routledge*, 37–41.

Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, *56*(2), 1875–1881.

CAPÍTULO 8: ANEXOS

8.1 RESULTADO ANÁLISIS PROTEÍNA TOTAL

TABLA 20 RESULTADO ANÁLISIS PROTEÍNA TOTAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	% PROTEÍNA TOTAL (BASE HÚMEDA)		% PROTEÍNA TOTAL (BASE SECA)	
Harina Lombriz (Tambor rotatorio)	48,01	48,15	53,34	53,50
Harina Lombriz (Liofilizador)	58,09	58,02	64,55	64,47
Pasta de Lombriz (sin secar)	14,15	13,33	70,75	66,64

8.2 RESULTADOS PERFIL DE AMINOÁCIDOS

8.2.1 HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR TAMBOR ROTATORIO

TABLA 21 RESULTADO ANÁLISIS PERFIL DE AMINOÁCIDOS HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR DOBLE TAMBOR ROTATORIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	Harina Lombriz (Tambor rotatorio)	
Concentración	mg/100g	
Aminoácido	Muestra 1 (B.H.)	Muestra 2 (B.H.)
Acido aspártico	3697,36	3603,41
Acido glutámico	5024,08	4971,18
Serina	1570,82	1581,28
Glicina	1918,43	1949,71
Histidina	575,64	551,85
Arginina	1409,12	1358,82
Treonina	1352,16	1346,92
Alanina	2282,58	2274,90
Prolina	785,55	811,29
Tirosina	239,83	231,11
Valina	1359,68	1318,57
Metionina	274,00	274,46
Isoleucina	1429,31	1335,50
Leucina	2079,09	2059,09
Fenilalanina	1058,99	1000,84
Lisina	1606,30	1405,56

8.2.2 HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR LIOFILIZADOR

TABLA 22 RESULTADO PERFIL DE AMINOÁCIDOS HARINA DE LOMBRIZ SECADA POR LIOFILIZADOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	Harina Lombriz (liofilizador)	
Concentración	mg/100g	
Aminoácido	Muestra 1 (B.H.)	Muestra 2 (B.H.)
Acido aspártico	4402,09	4565,77
Acido glutámico	5552,82	5538,39
Serina	1818,70	1806,67
Glicina	1973,12	2003,51
Histidina	630,75	639,30
Arginina	1367,40	1431,49
Treonina	1595,12	1617,64
Alanina	2385,70	2226,35
Prolina	844,28	909,00
Tirosina	263,27	306,37
Valina	1528,95	1564,18
Metionina	327,79	383,22
Isoleucina	1710,78	1718,62
Leucina	2349,03	2524,47
Fenilalanina	1158,39	1297,16
Lisina	1708,73	1884,91

8.2.3 PASTA DE LOMBRIZ SIN SECAR.

TABLA 23 RESULTADO PERFIL DE AMINOÁCIDOS PASTA DE LOMBRIZ SIN SECAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

	Pasta Lombriz (sin secar)	
Concentración	mg/100g	
Aminoácido	Muestra 1 (B.H.)	Muestra 2 (B.H.)
Acido aspártico	625,08	662,05
Acido glutámico	1662,80	1724,40
Serina	355,43	338,39
Glicina	737,15	716,25
Histidina	143,76	145,42
Arginina	235,78	227,21
Treonina	559,69	525,52
Alanina	824,37	788,87
Prolina	357,27	350,44
Tirosina	154,60	151,20
Valina	561,62	540,42
Metionina	195,65	182,28
Isoleucina	580,30	510,42
Leucina	745,87	772,24
Fenilalanina	354,77	323,21
Lisina	224,54	228,69

8.3 COMPARATIVO PERFIL DE AMINOÁCIDOS

8.3.1 RESPECTO A LOS REQUISITOS DE LA FAO

TABLA 24 REQUERIMIENTO DE AMINOÁCIDOS Y SU CONTENIDO EN LA HARINA DE LOMBRIZ CADA 100 [G] DE PROTEÍNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

AMINOÁCIDO	Requisito FAO [g/100 g prot]				HL (Liofilizador) [g/100 g prot]	HL (Tambor rotatorio) [g/100 g prot]
	0 años	1-2 años	3-18 años	19- más años		
Lisina	5,7	5,2	4,8	4,5	5,94	5,64
Histidina	2	1,8	1,6	1,5	2,10	2,11
Leucina	6,6	6,3	6,1	5,9	8,06	7,76
Isoleucina	3,2	3,1	3,1	3	5,67	5,18
Treonina	3,1	2,7	2,5	2,3	5,31	5,06
Valina	4,3	4,1	4,0	3,9	5,11	5,02
Fenilalanina+Tirosina	5,2	4,6	4,1	3,8	5,00	4,74

8.3.2 RESPECTO A FUENTES CONVENCIONALES DE PROTEÍNA

TABLA 25 CONTENIDO DE AMINOÁCIDOS EN 100 [G] DE PRODUCTO EN DISTINTAS FUENTES DE PROTEÍNA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

AMINOÁCIDO	Carne Vacuno	Pescado	Leche	Huevo	HL (Liofilizador)	HL (Tambor rotatorio)
	[g/100 g producto]	[g/100 g producto]	[g/100 g producto]	[g/100 g producto]	[g/100 g producto]	[g/100 g producto]
Lisina	2,42	1,76	0,28	0,88	3,45	3,28
Histidina	0,99	0,40	0,09	0,29	1,22	1,23
Leucina	2,12	1,68	0,35	1,09	4,68	4,50
Isoleucina	1,35	1,20	0,24	0,92	3,29	3,01
Treonina	1,09	0,92	0,15	0,72	3,08	2,94
Valina	1,30	1,20	0,26	1,05	2,97	2,92
Fenilalanina+Tirosina	2,08	1,02	0,35	1,21	2,90	2,75