

**Optimización en la elaboración de harina de lombriz (*Eisenia foetida*) como fuente proteica en alimento para alevines de tilapia (*Oreochromis* sp.)**

**Juan Francisco Lezcano Cerrud  
Gerardo Josué Borjas Ferrera**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano  
Honduras**

Noviembre, 2017

ZAMORANO  
CARRERA DE AGROINDUSTRIA ALIMENTARIA

**Optimización en la elaboración de harina de lombriz (*Eisenia foetida*) como fuente proteica en alimento para alevines de tilapia (*Oreochromis sp.*)**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingenieros en Agroindustria Alimentaria en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Juan Francisco Lezcano Cerrud  
Gerardo Josué Borjas Ferrera**

**Zamorano, Honduras**  
Noviembre, 2017

## **Optimización en la elaboración de harina de lombriz (*Eisenia foetida*) como fuente proteica en alimento para alevines de tilapia (*Oreochromis* sp.)**

**Juan Francisco Lezcano Cerrud  
Gerardo Josué Borjas Ferrera**

**Resumen.** La acuicultura es de las actividades pecuarias más rentables para Honduras y la necesidad de innovar la alimentación acuícola es cada vez más importante. Sustituir ingredientes es una alternativa para ofrecer oportunidades a la industria de balanceados. El objetivo fue optimizar la elaboración de la harina de lombriz como fuente proteica en alimento para alevines de tilapia. El estudio se elaboró bajo un diseño factorial  $2^3$  con la metodología superficie respuesta incluyendo como variables independientes la temperatura, tiempo y presión. Las variables dependientes fueron humedad, rendimiento y proteína. Los modelos matemáticos obtenidos fueron tendenciosos para las variables humedad y rendimiento, mientras que para proteína se obtuvo un modelo predictivo. La caracterización obtenida con el tratamiento óptimo (temperatura de 69.2 °C, 230.77 minutos y 26.33 inHg) presentó 11.19% de humedad, 18% de rendimiento, 51.22% de proteína. La granulometría de la harina presentó un diámetro de partícula entre 0.43 mm a 0.6 mm en un 67.16% de la muestra, siendo adecuado para alimentar a los alevines que presentaron un peso inicial promedio de 0.2 g. La efectividad del tratamiento (balanceado a base de harina de lombriz) se evaluó contra un control (balanceado comercial) mediante un DCA y una prueba de medias Duncan. Las GDP fueron de 0.15 g/día y 0.12 g/día, los ICA fueron de 1.53 y 1.93; para el tratamiento y el control respectivamente, siendo estos estadísticamente iguales ( $P>0.05$ ). La harina de lombriz elaborada con un secado al vacío presenta múltiples aplicaciones como fuente proteica debido a su composición nutricional.

**Palabras clave:** Físicoquímico, formulación de dietas, nutrición animal, reversión sexual.

**Abstract.** Aquaculture is one of the most profitable livestock activities for Honduras and the need for innovative aquaculture feed is increasing in importance. Substituting ingredients is an alternative which offers opportunities for the animal feed industry. The objective was to optimize the elaboration of an earthworm meal as a protein source in a feed for tilapia fingerlings. The study was made using a factorial design of  $2^3$  with the methodology of surface response in which the independent variables were temperature, time and pressure. The dependent variables were humidity, yield and protein. The mathematical models obtained were tendentious for humidity and yield, while for protein the model was predictive. The characterization with the optimized treatment (temperature of 69.2 °C. 230.77 minutes and 26.33 inHg) presented 11.9% of humidity, 18% of yield and 51.22% of protein. The flour presented a particle diameter between 0.43 mm to 0.6 mm in a 67.16% of the sample, being adequate for feeding the fingerlings that presented an average initial weight of 0.2 g. The effectiveness of the treatment (a feed based on earthworm flour) was evaluated against a control (commercial feed) through a CRD and a Duncan mean separation. The DWG were 0.15 and 0.12 g/day, the FCR were 1.53 and 1.93 for the treatment and control respectively, being these statistically the same ( $P>0.05$ ). The earthworm meal made with a vacuum oven presents many applications as a protein source.

**Key words:** Animal nutrition, diet formulation, physicochemical, sexual reversion.

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos .....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>28</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>29</b>
<b>6. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>30</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>34</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Equipos utilizados para la elaboración de la harina de lombriz.....	3
2. Niveles codificados de las variables independientes de la investigación. ....	5
3. Composición de los tratamientos del diseño experimental.....	6
4. Análisis químicos realizados a la harina de lombriz. ....	7
5. Comparación de secado en horno al vacío y horno de convección mecánica sobre los parámetros de humedad (%), rendimiento (%) y proteína (%). ....	9
6. Resultados de humedad en los tratamientos de la elaboración de harina de lombriz. ....	11
7. Coeficientes de regresión, probabilidades (P) de un modelo de regresión polinomial, valores F y $R^2$ para humedad (%) en función de temperatura ( $X_1$ ), tiempo ( $X_2$ ) y presión ( $X_3$ ) en la elaboración de harina de lombriz. ....	12
8. Resultados de rendimiento en los tratamientos de la elaboración de harina de lombriz. ....	14
9. Coeficientes de regresión, probabilidades (P) de un modelo de regresión polinomial, valores F y $R^2$ para rendimiento (%) en función de temperatura ( $X_1$ ), tiempo ( $X_2$ ) y presión ( $X_3$ ) en la elaboración de harina de lombriz. ....	15
10. Resultados de proteína en los tratamientos de la elaboración de harina de lombriz. ....	17
11. Coeficientes de regresión, probabilidades (P) de un modelo de regresión polinomial, valores F y $R^2$ para proteína (%) en función de temperatura ( $X_1$ ), tiempo ( $X_2$ ) y presión ( $X_3$ ) en la elaboración de harina de lombriz. ....	18
12. Composición química de la harina de lombriz.....	23
13. Formulación del balanceado a base de harina de lombriz. ....	24
14. Distribución granulométrica de la harina de lombriz. ....	24
15. Efecto del balanceado a base de harina de lombriz y el balanceado ALCON de 45% en la GDP e ICA de los alevines salidos de la reversión sexual. ....	26

Figuras	Página
1. Efecto de la temperatura (°C) y tiempo (minutos) sobre la humedad (%) en la elaboración de harina de lombriz. ....	13
2. Efecto de tiempo (minutos) y temperatura (°C) sobre el rendimiento (%) en la elaboración de harina de lombriz. ....	16
3. Efecto de la temperatura (°C) y el tiempo (minutos) sobre la proteína (%) en la elaboración de harina de lombriz. ....	19

Figuras	Página
4. Efecto de la temperatura (°C) y presión (inHg) sobre la proteína (%) en la elaboración de harina de lombriz. ....	20
5. Efecto tiempo (minutos) y presión (inHg) sobre la proteína (%) en la elaboración de harina de lombriz. ....	21
6. Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades en la elaboración de harina de lombriz. ....	22
7. Granulometría presentada en la harina de lombriz en porcentajes acumulados. ....	25
8. Curva de crecimiento de los alevines de tilapia semanalmente. ....	27
Anexos	Página
9. Requerimientos suplidos en el balanceado de harina de lombriz zamorano. ....	34
10. Costos de elaboración de la harina de lombriz. ....	34
11. Flujo de proceso final para la elaboración del balanceado de harina de lombriz. ..	35
12. Costos del balanceado a base de harina de lombriz para un quintal. ....	36
13. Granulometría presentada en el alimento comercial ALCON de 45%. ....	36

## 1. INTRODUCCIÓN

La acuicultura en Honduras es una de las actividades con mayores ganancias y aportes al país donde el año 2014 presentó ventas de tilapia de 74 millones de dólares. El sector agropecuario, en el que se incluyen las exportaciones de tilapia, representa un 26% del producto interno bruto (SAG 2016). Al tener una alta participación en el mercado, la acuicultura es cada vez más exigente y es allí donde se busca reducir los costos totales para obtener mayores porcentajes de rentabilidad. La alimentación representa la mayor parte de los costos de producción, llegando a tener aproximadamente de 60 a 79% de los costos variables totales (FAO 2017).

La alimentación de tilapia (*Oreochromis* sp.) es de conveniencia a la disponibilidad de materias primas y sus costos. La tilapia es generalista en el alimento que se le provee, ya que siempre que cumpla los requerimientos de proteína y aminoácidos se obtendrán buenos resultados en el engorde (FAO 2017). Al tener una diversidad de fuentes alimenticias, la agroindustria de balanceados aporta fuentes innovadoras de alimento buscando bajos costos operativos, disponibilidad y que sean desarrolladas a partir de sub productos ya sean vegetal o animal.

Entre las fuentes de alimento siempre se trata de evaluar la digestibilidad y la cantidad de proteína que aporta. Los subproductos de origen animal comúnmente son los que cumplen con estas condiciones con bajas cantidades de materia prima, representando una ventaja competitiva contra los subproductos de origen vegetal. El estado de la tilapia donde la alimentación requiere mayor porcentaje de proteína es en alevín. Los alevines presentan un requerimiento de proteína de 40 a 50% para un óptimo crecimiento al inicio del engorde (FAO 2017).

La lombricultura o el cultivo de lombriz es una práctica que ha tomado auge en Honduras. En 1993 el Instituto Hondureño de Café introdujo la especie de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) procedente de Colombia. Esta introducción se efectuó con el fin de realizar pruebas en beneficio al cultivo de café (Pineda 2006). Investigaciones a nivel mundial revelan otros usos como es la producción de abono orgánico, carne de lombriz y harina de lombriz para beneficio agronómico y nutricional humano y animal (Bustamante 2016).

La harina de lombriz roja californiana presenta niveles de proteínas elevados entre 61 a 82%, donde este porcentaje varía según la metodología de procesamiento (Vielma *et al.* 2003a). El perfil nutricional de la harina de lombriz demuestra que posee todos los aminoácidos esenciales (Vielma *et al.* 2003a). Tomando estas referencias se infiere que sería un producto que cumple con los estándares necesarios para la producción de alevines de tilapia por su composición nutricional.

La sustitución de ingredientes proteicos por harina de lombriz es una alternativa en la alimentación de alevines al evaluar las ganancias de pesos diarias. Algunos estudios presentan diferencias significativas mientras que otros no, ya sean por las condiciones ambientales o el procesamiento del alimento balanceado (Bastardo *et al.* 2008).

Obtener mayores pesos en menor tiempo en la producción de alevines es indispensable. Al ser más eficientes con buenas fuentes de alimento a bajo costo, los productores hondureños tendrían una mayor participación en el mercado con mejores porcentajes de rentabilidad. Así, seguirían avanzando hasta llegar a nuevos mercados para satisfacer la demanda a nivel mundial.

El beneficio principal de utilizar harina de lombriz en alimentación acuícola es que promovemos una nueva actividad al sector agropecuario hondureño. A partir de esto se busca con la investigación desarrollar un balanceado acuícola con harina de lombriz roja californiana producida en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, como fuente proteica para alevines de tilapia. Basado en lo anterior se establecieron los siguientes objetivos:

- Comparar el secado con horno al vacío y secado con horno de convección mecánica para la elaboración de harina de lombriz roja californiana.
- Optimizar el proceso de la elaboración de harina de lombriz roja californiana.
- Determinar las características fisicoquímicas de la harina de lombriz roja californiana.
- Evaluar la ganancia diaria de peso y el índice de conversión alimenticia en alevines con un balanceado acuícola elaborado en Zamorano a base de harina de lombriz roja californiana.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### **Localización del estudio.**

Las lombrices utilizadas para la investigación fueron producidas en la unidad de agricultura orgánica. El secado de las lombrices, la elaboración de la harina y la caracterización físicoquímica de esta se realizó en el Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ), mientras que la evaluación de la harina en los alevines se realizó en la unidad de acuicultura. Todas las instalaciones mencionadas se encuentran en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

El estudio se realizó en orden cronológico dividido en cuatro fases:

### **Fase 1. Comparación del secado con horno al vacío y horno de convección mecánica.**

**Toma de muestra.** El tamaño de muestra para el secado fue de 250 gramos por repetición, teniendo tres repeticiones por horno. Las lombrices fueron cosechadas, lavadas con abundante agua y puestas en una solución salina al 4% para que expulsaran cualquier residuo dentro del organismo.

**Elaboración de la harina de lombriz.** Se tomó la muestra de 250 g de lombriz y se colocó en una bandeja de aluminio de 15 cm de ancho  $\times$  20 cm de largo  $\times$  5 cm de alto en el horno. Los parámetros para el horno al vacío NAPCO 5831 fueron 70 °C por 300 minutos con 25 inHg, mientras que para el horno de convección mecánica fueron 60 °C por 540 minutos. Después del secado se obtuvo el peso de las lombrices para calcular el porcentaje de rendimiento por muestra. Para adquirir harina, primero, pasaron por el molino de martillo Arthur H. Thomas 32F770 y luego por el molino Cyclotec 1093 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Equipos utilizados para la elaboración de la harina de lombriz.

<b>Equipo</b>	<b>Marca/Modelo</b>
Balanza de mesa	OHAUS SD35
Balanza analítica	OHAUS
Horno	NAPCO 5831
Horno	Fisher 750 f
Horno	NAPCO 630
Molino	Cyclotec 1093
Molino	Arthur H. Thomas 32F770

Al terminar la molienda se realizaron los análisis de humedad bajo la normativa AOAC 952.08 con el horno a 105 °C por 24 horas con su duplicado. Por último, se realizó el análisis de proteína bajo la normativa AOAC 2001.11 (Latimer y Cunniff 2016).

**Diseño experimental.** Para la comparación de secado entre el horno al vacío y el horno de convección mecánica, se utilizó los datos de las variables: rendimiento, humedad y porcentaje de proteína. Estos se evaluaron con un análisis de comparación de media t test para muestras independientes con una probabilidad de significancia del 5%. Este análisis se realizó por medio del programa estadístico “Statistical Analysis System” (SAS Versión 9.4®).

## **Fase 2. Optimización en la elaboración de harina de lombriz.**

Se escogió el horno al vacío NAPCO para la optimización de la harina de lombriz por las cualidades que aporta al producto final. La optimización se realizó en base a las variables independientes de temperatura, tiempo y presión.

**Diseño Experimental.** La evaluación de las variables independientes temperatura, tiempo y presión se realizó con un diseño factorial  $2^3$  con la metodología de superficie respuesta con una probabilidad de significancia del 10% (Rodrigues e Iemma 2014). Los parámetros de la elaboración fueron codificados (-1, 0, 1) y se calcularon con la ecuación 1.

$$X_i = \left( \frac{X_i - Z}{\Delta x_i} \right) \quad [1]$$

Donde:

$x_i$  = Valor codificado de la variable  $x_i$

$X_i$  = El valor real de la variable

$Z$  = Valor real de la variable en el punto central

$\Delta x_i$  = Intervalo de la variable  $x_i$

El modelo presenta dos niveles de variable axiales, que son  $+\alpha$  y  $-\alpha$ . El valor alfa depende del número factorial ( $F=2^k$ ) del diseño y del número de variables independiente ( $K=3$ ), en el caso de esta investigación se definen por la ecuación 2.

$$\pm\alpha = (F)^{1/4} = (2^k)^{1/4} = (2^3)^{1/4} = 1.682 \quad [2]$$

El número de unidades experimentales se basó en el diseño factorial completo  $2^3$ , dados por la ecuación 3.

$$n = 2^k + 2K + m \quad [3]$$

Dónde:

$2^k$  = Número de puntos factoriales

$2K$  = Número de puntos axiales

$m$  = Número de repeticiones del punto central

Descripción y distribución de las unidades experimentales:

$2^k = 2^3 = 8$  puntos factoriales.

$2K = 2 \times 3 = 6$  puntos axiales.

$m = 6$  repeticiones del punto central.

Total = 20 unidades experimentales

El rango de las variables se determinó en base a la comparación de secado de la fase 1 y la literatura consultada sobre los cambios que sufre la proteína, la cual es nuestro indicador primario en el estudio. El punto central se determinó en base a los parámetros de secado de la fase 1 en conjunto con la metodología de uso de un horno al vacío, por su eficiencia en eliminar agua del producto (Nielsen 2004). Para el análisis de los resultados, el método describe el comportamiento de la combinación de las variables independientes ( $X_k$ ) y la respuesta ( $Y_i$ ). La respuesta fue una función de los niveles que fueron combinadas (Box y Draper 1959), como se detalla en la ecuación 4.

$$Y_i = F(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad [4]$$

Las respuestas se ajustaron mediante un análisis de regresión lineal con un polinomio cuadrático con las variables independientes ( $X_k$ ) para cada variable de respuesta ( $Y_i$ ). Para predecir el comportamiento de cada respuesta se presenta la ecuación 5.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X^1 + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad [5]$$

Dónde:

$Y_i$ = Función respuesta;

$X_1, X_2, X_3$ = Valores de las variables independientes;

$\beta_0$ = Coeficiente relativo a la interpretación del plan con la respuesta en el eje;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Coeficientes lineales estimados por el mínimo cuadrado;

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ = Coeficientes de variables cuadráticas;

$\beta_{12}$ = Coeficiente de interacción entre las variables independientes;

$\varepsilon$ = Error experimental.

Los niveles codificados (-1, 0, +1) y los valores axiales (-  $\alpha$  y +  $\alpha$ ) de las variables independientes de la investigación se obtuvieron en base a pruebas preliminares y literatura (Cuadro 2).

Cuadro 2. Niveles codificados de las variables independientes de la investigación.

	Niveles				
	- $\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
Temperatura (°C)	62.0	65.0	70.0	75.0	78.0
Tiempo (minutos)	209.7	246.3	300.0	353.7	390.3
Presión (inHg)	20.0	22.0	25.0	28.0	30.0

Los valores codificados se interpretaron en valores reales para los veinte tratamientos con las tres variables independientes (Cuadro 3). Las variables dependientes medidas partir de esta experimentación fueron: humedad, rendimiento y proteína, todas expresadas en porcentajes.

Cuadro 3. Composición de los tratamientos del diseño experimental.

TRT	Niveles Codificados			Niveles reales de las variables independientes		
	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Presión (inHg)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Presión (inHg)
1	-1	-1	-1	65	246.3	22
2	1	-1	-1	75	246.3	22
3	-1	1	-1	65	353.7	22
4	1	1	-1	75	353.7	22
5	-1	-1	1	65	246.3	28
6	1	-1	1	75	246.3	28
7	-1	1	1	65	353.7	28
8	1	1	1	75	353.7	28
9	-1.682	0	0	62	246.3	25
10	1.682	0	0	78	246.3	25
11	0	-1.682	0	70	209.7	25
12	0	1.682	0	70	390.3	25
13	0	0	-1.682	70	300.0	20
14	0	0	1.682	70	300.0	30
15 C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25
16 C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25
17 C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25
18 C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25
19 C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25
20 C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25

C<sup>r</sup>: Punto central del experimento y control.

TRT: Tratamientos

**Análisis estadístico.** Las variables independientes codificadas se evaluaron en el programa Statistica 7.0 para obtener los coeficientes de regresión y los valores para la elaboración de los gráficos superficie respuesta, con una probabilidad  $\leq 0.1$ .

### Fase 3. Caracterización de la harina de lombriz optimizada.

**Análisis químicos.** La normativa utilizada para la obtención de las características nutricionales fue bajo la metodología de la AOAC. Los parámetros evaluados y la metodología se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Análisis químicos realizados a la harina de lombriz.

Parámetro	Método
Proteína cruda	AOAC 2001.11
Extracto etéreo	AOAC 991.36
Fibra Cruda	AOAC 962.09
Humedad	AOAC 952.08
Cenizas	AOAC 923.03
Extracto libre de nitrógeno	Por diferencia

Fuente: (Latimer y Cunniff 2016)

### Análisis físicos.

**Granulometría.** El parámetro físico de granulometría en la harina de lombriz se determinó bajo la metodología AOAC 965.22 y una muestra de 50 g de harina de lombriz con tres repeticiones. Se agitó durante 5 minutos cada repetición y se pesó la harina que se retuvo en cada tamiz (Latimer y Cunniff 2016).

**Índice de solubilidad y absorción de agua.** Índice de solubilidad en agua (ISA) e Índice de absorción de agua (IAA) se realizó de acuerdo a la metodología Anderson *et al.* 1969 modificada (Anderson 1982). El análisis se realizó por triplicado con 1 g de muestra en base húmeda, pesado en tubos de centrifugación tarados. Se adicionó 10 ml de agua destilada y luego los tubos fueron agitados mecánicamente por medio de un agitador para garantizar la homogeneidad. Posterior se sometió a baño maría a una temperatura de 30 °C con una agitación constante a 200 rpm durante 30 minutos. Luego los tubos se sometieron a centrifugación durante 15 minutos a 6000 rpm. El gel sedimentado, se separó por decantación, vaciando el sobrenadante en un plato Petri de vidrio. Se anotó el peso del tubo con el gel; por último, se evaporó el sobrenadante durante 4 h a 105 °C en un horno (Torres 2007).

El valor del ISA se obtuvo con la siguiente ecuación.

$$ISA (\%) = \frac{\text{Peso del residuo de evaporación (g)}}{\text{Peso seco de la muestra (g)}} \times 100 \quad [6]$$

El valor del IAA se obtuvo con la siguiente ecuación.

$$IAA = \frac{\text{Peso del residuo de centrifugación (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} \quad [7]$$

#### **Fase 4. Evaluación de parámetros productivos en los alevines con el balanceado a base de harina de lombriz.**

La eficiencia proteica de la harina de lombriz se evaluó en un balanceado, en alevines salidos de la reversión sexual al día 28. Los alevines se escogieron con un peso inicial de  $0.2 \pm 0.05$  g, alimentados durante un mes. El experimento se realizó bajo condiciones controladas de temperatura a 25 °C, oxígeno disuelto > 3 ppm, pH de 7 (Meyer y Triminio 2007).

**Tratamientos.** Se utilizaron 60 alevines para la experimentación divididos en 10 alevines por repetición con tres repeticiones para cada tratamiento. Se alojaron en seis acuarios de vidrio con dimensiones de 30 cm de ancho × 70 cm de largo × 45 cm de profundidad. Los dos tratamientos fueron:

**Control.** El alimento balanceado control fue el de 45% de proteína de la marca comercial ALCON.

**Balanceado Harina de Lombriz (BHL).** El BHL se basó en suplir los requerimientos de los alevines con una dieta de 45% de proteína (NRC 2011).

#### **Variables evaluadas.**

**Ganancia diaria de peso (GDP).** Los alevines se pesaron semanalmente, durante un mes para calcular su ganancia de peso diaria. El dato se obtuvo pesando los 10 alevines de manera grupal.

**Índice de conversión Alimenticia (ICA).** El ICA se obtuvo mediante la ecuación 8, que relaciona el consumo de alimento por alevín con la ganancia diaria de peso.

$$ICA = \frac{\text{Consumo diario de alimento}}{\text{Ganancia diaria de peso}} \quad [8]$$

**Diseño experimental.** Para evaluar la fase 4 se utilizó un diseño completamente al azar (DCA), con dos tratamientos y tres repeticiones. El análisis estadístico se hizo a través de un análisis de varianza (ANDEVA) y una separación de medias Duncan. Los resultados se evaluaron con el software estadístico “Statistica Analysis System” (SAS Versión 9.4®)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Fase 1. Comparación del secado con horno al vacío y horno de convección mecánica.

La comparación de secados con diferentes hornos provee información acertada de qué tanto se conservan los parámetros que se evaluaron en la elaboración de la harina de lombriz. El comportamiento de cada horno durante el secado se evaluó en base a la humedad, rendimiento y proteína en base húmeda de la harina de lombriz (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación de secado en horno al vacío y horno de convección mecánica sobre los parámetros de humedad (%), rendimiento (%) y proteína (%).

Horno	Humedad (%) Media ± DE	CV (%)	Rendimiento (%) Media ± DE	CV (%)	Proteína (%) Media ± DE	CV (%)
HV	2.44 ± 0.71 b	29.43	17.40 ± 0.87 b	5.04	54.66 ± 1.70 a	3.12
HCM	10.36 ± 1.30 a	12.59	20.44 ± 0.41 a	2.01	45.09 ± 0.72 b	1.61

a-b: Letras diferentes entre columna presentan diferencias significativas a  $P < 0.05$

HV: Horno al vacío; HCM: Horno de convección mecánica

DE: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación

Se encontraron diferencias significativas entre los secados con una  $P < 0.05$ . Esto se debe a que los hornos ayudan a mantener ciertas características en el producto como disminuir pérdidas de vitaminas, proteína y acelerar el secado (Guevara y Rovira 2012). El usar un vacío permite que el agua se evapore a una menor temperatura conservando así la proteína. El rendimiento es menor en el secado al vacío que en el de convección mecánica debido que al evaporar más agua en el mismo lapso de tiempo disminuye la humedad; por ende, el rendimiento obtenido.

El tipo de secado afecta la cantidad de proteína en base húmeda obtenida por la relación de tiempo y temperatura. Los secados con y sin circulación de aire tienen valores de 61.20% de proteína (Alcívar *et al.* 2016). Se obtuvieron valores en promedio de 54.66% de proteína con el horno al vacío y 45.09% para el horno de convección mecánica. Por lo tanto, el secado con horno al vacío fue sometido a un proceso de optimización por su capacidad de retener mayor porcentaje de proteína.

Los valores obtenidos de proteína van directamente relacionados con el tipo de crianza y alimentación que se les brindan a las lombrices (Dávila 1996). Es por esto que los valores en otras investigaciones varían en rangos de 54 a 82% de proteína. Por otro lado, el rendimiento de la harina de lombriz es de 15.7% (Dávila 1996). En esta investigación se obtuvo un rendimiento de 17.4% para el secado con horno al vacío y 20.44% en el secado con horno de convección mecánica.

Estos rendimientos van ligados a la cantidad de humedad final obtenida en el producto. La humedad para el secado con horno al vacío fue de 2.44% y para el horno de convección mecánica de 10.36%. Se observó que el parámetro de humedad fue el que presentó mayor coeficiente de variación para ambos hornos. Esto es posiblemente por la manipulación de la muestra, ya que a mayor tiempo de almacenado ocurría una liberación de líquido y posible proteína soluble.

### **Fase 2. Optimización en la elaboración de harina de lombriz.**

La optimización por el método de superficie respuesta se realizó en el secado con horno al vacío por presentar los mayores porcentajes de proteína en el estudio. En base a esto se evaluaron los parámetros de humedad, rendimiento y proteína, pero en diferentes combinaciones de las variables temperatura, tiempo y presión (Cuadro 6).

**Humedad.** La humedad de la harina de lombriz es un atributo clave para tomar decisiones en el procesamiento. Una humedad baja permite un mejor mezclado de los ingredientes en la línea de proceso. Los resultados obtenidos variaron entre tratamientos (Cuadro 6).

Este parámetro en las harinas para balanceados se toma en cuenta para medir la vida anaquel y estimar el tiempo de crecimiento de hongos o toxinas en las materias primas almacenadas. Es la variable más delicada en cuanto a la manipulación y distribución del producto final, ya que todos los productores manejan distintos métodos de almacenamiento para conservar su producto final como cámaras climatizadas, galeras y bodegas (Asencio 2010).



Cuadro 6. Resultados de humedad en los tratamientos de la elaboración de harina de lombriz.

TRT	Niveles Codificados			Niveles reales de las variables independientes			Humedad (%)
	T° (°C)	t (minutos)	P (inHg)	T° (°C)	t (minutos)	P (inHg)	
1	-1	-1	-1	65	246.3	22	3.30
2	1	-1	-1	75	246.3	22	1.91
3	-1	1	-1	65	353.7	22	3.25
4	1	1	-1	75	353.7	22	3.65
5	-1	-1	1	65	246.3	28	2.00
6	1	-1	1	75	246.3	28	1.72
7	-1	1	1	65	353.7	28	3.26
8	1	1	1	75	353.7	28	3.18
9	-1.682	0	0	62	246.3	25	2.01
10	1.682	0	0	68	246.3	25	1.06
11	0	-1.682	0	70	209.7	25	1.33
12	0	1.682	0	70	390.3	25	0.44
13	0	0	-1.682	70	300.0	20	3.17
14	0	0	1.682	70	300.0	30	0.83
15C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	2.71
16C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	3.01
17C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	2.84
18C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	3.36
19C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	3.11
20C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	2.48

C<sup>r</sup>: Punto central del experimento y control.

TRT: Tratamientos

T°: Temperatura

t: Tiempo

P: Presión

Las variables lineales temperatura ( $X_1$ ) y presión ( $X_3$ ) presentaron un efecto negativo (Cuadro 7). Esto indica, que, al incrementar la temperatura y la presión en el secado, la harina de lombriz presentará una disminución en la humedad. La variable lineal de tiempo ( $X_2$ ) presentó un efecto positivo lo que indica que un incremento del tiempo en el secado presentará un mayor valor en la humedad.

El  $R^2$  indica que el 42% de los datos se ajustan al modelo de superficie de respuesta y el 58% de los datos no se ajustaron. La falta de ajuste fue significativa con  $P > 0.10$  y el valor F. calculado (18.16) fue mayor al F. tabular (2.54) lo que indica que este modelo es tendencioso.

Cuadro 7. Coeficientes de regresión, probabilidades (P) de un modelo de regresión polinómico, valores F y R<sup>2</sup> para humedad (%) en función de temperatura (X<sub>1</sub>), tiempo (X<sub>2</sub>) y presión (X<sub>3</sub>) en la elaboración de harina de lombriz.

<b>Factor</b>	<b>Coefficiente de regresión</b>	<b>P</b>
Intercepto	2.87E+00	3.00E-06 μ
X <sub>1</sub>	-2.16E-01	5.01E-02 μ
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-1.94E-01	6.36E-02 μ
X <sub>2</sub>	2.13E-01	5.20E-02 μ
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-4.24E-01	3.51E-03 μ
X <sub>3</sub>	-4.31E-01	3.68E-03 μ
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	-2.98E-02	7.31E-01
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	2.49E-01	7.28E-02 μ
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	7.88E-02	5.05E-01
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	1.29E-01	2.94E-01
Falta de ajuste		2.65E-03 μ
R <sup>2</sup>	0.42643	
F. Calculado	18.1634	
F. Tabular	2.54	

μ=significativo

En base a los resultados del Cuadro 7 se tomaron las variables significativas para elaborar la ecuación 9 y predecir el valor sobre la variable de humedad del modelo.

$$\text{Humedad} = 2.87 - 0.216X_1 - 0.194X_1^2 + 0.213X_2 - 0.424X_2^2 - 0.431X_3 + 0.249X_1X_2 \quad [9]$$

Tomando el modelo matemático de la ecuación 9 se creó el gráfico (Figura 1) de superficie respuesta, para la variable de humedad.

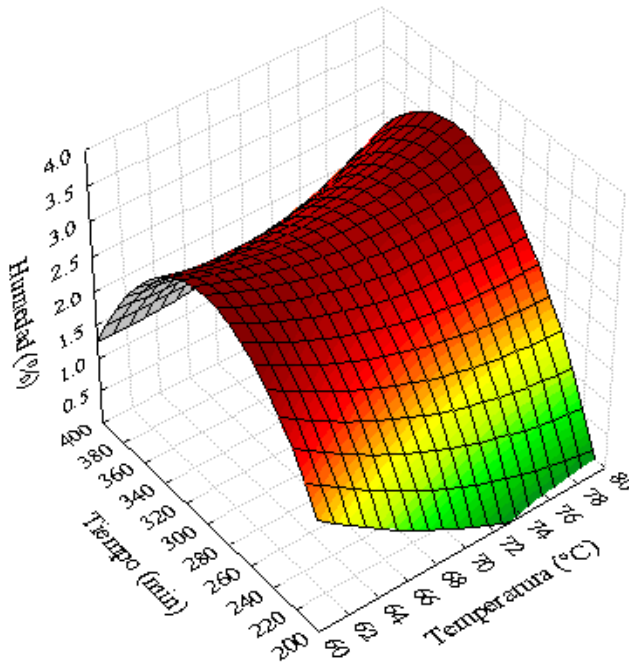


Figura 1. Efecto de la temperatura (°C) y tiempo (minutos) sobre la humedad (%) en la elaboración de harina de lombriz.

El aumento de temperatura y tiempo promueve la remoción de agua en el alimento, dando un porcentaje de humedad bajo (0.44 - 3.65%) como lo muestra la figura 1. El rango de humedad en este experimento se debió a la poca cantidad de muestra colocada en el horno al vacío. La humedad con la que se trabajan las harinas para alimentos balanceados oscila entre un 12 a 16% (Dávila 1996).

Conocer el valor de humedad que requiere el producto final promueve un procesamiento eficiente al reducir tiempo, ya que ésta es una de las variables que elevan costos. En este estudio la variable de humedad se ve afectada con límites de temperatura, ya que se evita volatilizar y desnaturalizar componentes que son clave en la alimentación de los alevines. La temperatura y el tiempo son medidas utilizadas para determinar la composición del material (Lucas *et al.* 2013). Para una humedad del 12% utilizaron temperaturas de 80 y 100 °C con tiempos de 80 y 70 minutos respectivamente (Boulogne *et al.* 2008). Estos resultados apoyan la afirmación de bajar tiempos para reducir costos, pero a 100 °C desnaturalizaron la proteína de la harina de lombriz, perdiendo así calidad nutricional.

El secado con horno al vacío permite con una temperatura máxima de 78 °C seguir obteniendo valores de proteínas mayores a 50% con una humedad menor al 12%. La temperatura máxima registrada en un secado sin circulación de aire, para mantener valores de proteína promedio de 60% máximo anda en 90 °C por 450 minutos antes de que esta inicie a desnaturalizarse y cumpla con una humedad en la harina menor al 12% (Alcívar *et al.* 2016). Esto indica que el tipo de secado con horno al vacío permite obtener una humedad menor al 12% sin arriesgar el contenido de proteína de la harina de lombriz en el procesamiento con temperaturas máximas de 78 °C.

**Rendimiento.** El rendimiento que se obtiene al secar las lombrices es un atributo relacionado directamente a la eficiencia del secado y a costos. Entre mayor rendimiento, mayores componentes permanecerán en la harina. Un rendimiento mayor permite aliviar los costos fijos porque producimos más con los mismos recursos. Los rangos de rendimiento en porcentajes obtenidos fueron de 8.08 a 16.92% (Cuadro 8).

Cuadro 8. Resultados de rendimiento en los tratamientos de la elaboración de harina de lombriz.

TRT	Niveles Codificados			Niveles reales de las variables independientes			Rendimiento (%)
	T° (°C)	t (minutos)	P (inHg)	T° (°C)	t (minutos)	P (inHg)	
1	-1	-1	-1	65	246.3	22	16.92
2	1	-1	-1	75	246.3	22	13.60
3	-1	1	-1	65	353.7	22	14.18
4	1	1	-1	75	353.7	22	12.88
5	-1	-1	1	65	246.3	28	14.83
6	1	-1	1	75	246.3	28	8.61
7	-1	1	1	65	353.7	28	12.63
8	1	1	1	75	353.7	28	13.24
9	-1.682	0	0	62	246.3	25	15.05
10	1.682	0	0	68	246.3	25	15.09
11	0	-1.682	0	70	209.7	25	13.02
12	0	1.682	0	70	390.3	25	13.64
13	0	0	-1.682	70	300.0	20	15.13
14	0	0	1.682	70	300.0	30	15.36
15C <sup>o</sup>	0	0	0	70	300.0	25	8.66
16C <sup>o</sup>	0	0	0	70	300.0	25	8.08
17C <sup>o</sup>	0	0	0	70	300.0	25	9.75
18C <sup>o</sup>	0	0	0	70	300.0	25	13.27
19C <sup>o</sup>	0	0	0	70	300.0	25	14.38
20C <sup>o</sup>	0	0	0	70	300.0	25	12.96

C<sup>o</sup>: Punto central del experimento y control.

TRT: Tratamientos

T°: Temperatura

t: Tiempo

P: Presión

La variable lineal  $X_1$  (temperatura) presentó un efecto negativo (Cuadro 9). Esto indica que, al incrementar la temperatura en el secado, la harina de lombriz presentará una disminución en el rendimiento. Debido a esto, al eliminar la humedad por calor, el rendimiento disminuye porcentualmente.

El  $R^2$  indica que el 62% de los datos se ajustan al modelo de superficie de respuesta y el 38% de los datos no se ajustaron al modelo. La falta de ajuste no fue significativa a una probabilidad de 0.10 y el valor F. calculado (3.88) fue mayor al F. tabular (2.73) lo que indica que este modelo es tendencioso.

Cuadro 9. Coeficientes de regresión, probabilidades (P) de un modelo de regresión polinomial, valores F y  $R^2$  para rendimiento (%) en función de temperatura ( $X_1$ ), tiempo ( $X_2$ ) y presión ( $X_3$ ) en la elaboración de harina de lombriz.

<b>Factor</b>	<b>Coefficiente de regresión</b>	<b>P</b>
Intercepto	1.36E+01	9.97E-04 $\mu$
$X_1$	- 7.44E-01	6.65E-02 $\mu$
$X_1^2$	2.65E-01	3.55E-01
$X_2$	9.40E-04	9.97E-01
$X_2^2$	- 3.50E-01	2.56E-01
$X_3$	- 5.77E-01	1.04E-01
$X_3^2$	3.27E-01	2.79E-01
$X_1X_2$	1.11E+00	5.25E-02 $\mu$
$X_1X_3$	- 1.24E-01	6.85E-01
$X_2X_3$	7.36E-01	1.08E-01
Falta de ajuste		1.41E-01
$R^2$		0.62179
F. Calculado		3.8890
F. Tabular		2.73

$\mu$ =significativo

En base a los resultados del Cuadro 9 se tomaron las variables significativas para elaborar la ecuación 10 y predecir el valor sobre la variable de rendimiento del modelo.

$$\text{Rendimiento} = 13.6 - 0.744X_1 + 1.11X_1X_2 \quad [10]$$

Tomando el modelo matemático de la ecuación 10 se creó el gráfico (Figura 2) de superficie respuesta, para la variable de rendimiento.

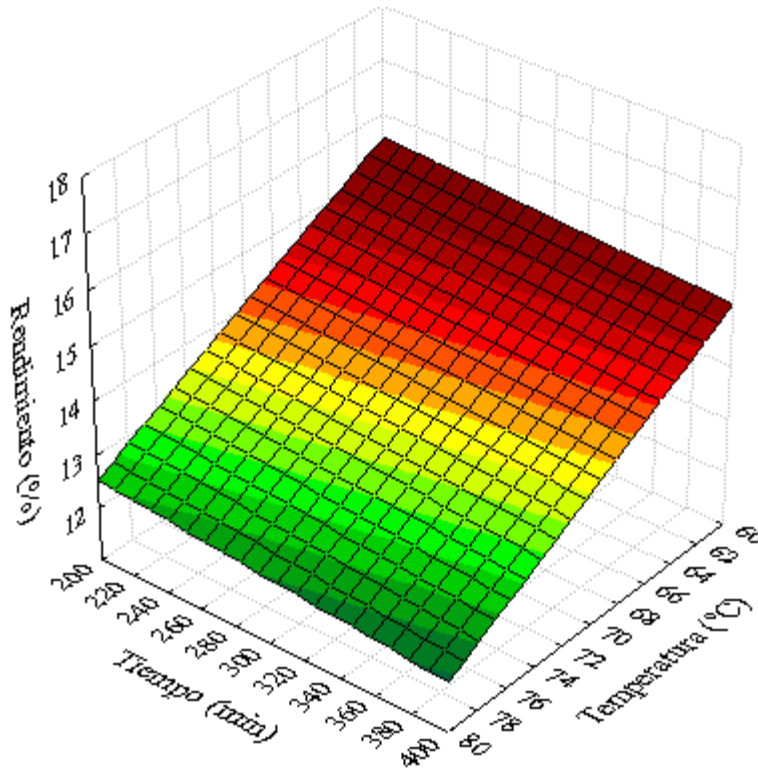


Figura 2. Efecto de tiempo (minutos) y temperatura (°C) sobre el rendimiento (%) en la elaboración de harina de lombriz.

La rentabilidad es un parámetro muy cuestionado al momento de obtener un nuevo producto y la harina de lombriz no es la excepción. Una limitante de la elaboración de harina de lombriz es su rendimiento. La Figura 2 muestra como con menor temperatura con menor tiempo se obtiene un mayor rendimiento.

En este estudio se obtuvieron rendimientos de 8.08% hasta 16.92% en el secado con horno al vacío. Luego de realizar el tratamiento con los valores óptimos (Figura 6) se obtuvo un rendimiento de 18%. Otros estudios han obtenido rendimientos de hasta 20% (García *et al.* 2005). Debido a que los tratamientos pierden humedad por la evaporación del agua, durante el secado en el horno hacen que el rendimiento disminuya (Solís 2013).

Por otro lado, se muestra que el secado con el horno de convección mecánica sí logró este porcentaje de rendimiento como lo declararon García *et al.* (2005) (Cuadro 5). La principal razón por la que el secado con horno al vacío reporta menor rendimiento es por su eficiencia en eliminar humedad. El secado con horno al vacío mantiene ventaja contra el secado en horno a 105 °C con tiempos de 360 minutos a 480 minutos donde reporta rendimiento de 15.74% (Dávila 1996). Al tener rendimientos similares a los de Dávila (1996) con parámetros más eficientes en cuanto a temperaturas y tiempos, podemos reducir costos en energía y mano de obra. Debido a esto el secado con horno al vacío sigue manteniendo ventaja contra secados tradicionales con y sin circulación de aire para obtener harina de lombriz.

**Proteína.** El valor proteico de la harina de lombriz es un indicador de la calidad nutricional que ésta puede aportar en las diferentes formulaciones para uso animal. Los resultados obtenidos de proteína con los diferentes secados utilizados para elaborar la harina de lombriz presentaron rangos de 51.23 a 80.89% (Cuadro 10).

Cuadro 10: Resultados de proteína en los tratamientos de la elaboración de harina de lombriz.

TRT	Niveles Codificados			Niveles reales de las variables independientes			Proteína (%)
	T° (°C)	t (minutos)	P (inHg)	T° (°C)	t (minutos)	P (inHg)	
1	-1	-1	-1	65	246.3	22	54.64
2	1	-1	-1	75	246.3	22	54.98
3	-1	1	-1	65	353.7	22	56.95
4	1	1	-1	75	353.7	22	55.37
5	-1	-1	1	65	246.3	28	60.86
6	1	-1	1	75	246.3	28	61.78
7	-1	1	1	65	353.7	28	54.20
8	1	1	1	75	353.7	28	51.23
9	-1.682	0	0	62	246.3	25	51.32
10	1.682	0	0	68	246.3	25	53.38
11	0	-1.682	0	70	209.7	25	53.86
12	0	1.682	0	70	390.3	25	55.81
13	0	0	-1.682	70	300.0	20	52.91
14	0	0	1.682	70	300.0	30	54.01
15C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	79.91
16C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	77.76
17C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	80.89
18C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	65.13
19C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	76.01
20C <sup>r</sup>	0	0	0	70	300.0	25	66.83

C<sup>r</sup>: Punto central del experimento y control

TRT: Tratamientos

T°: Temperatura; t: Tiempo

P: Presión

Las variables cuadráticas  $X_1^2$ ,  $X_2^2$ ,  $X_3^2$  presentaron un efecto negativo (Cuadro 11). Esto indica que, al incrementar la temperatura, el tiempo y la presión en el secado, la harina de lombriz presentará una disminución en la proteína. El  $R^2$  indica que el 84% de los datos se ajustan al modelo de superficie de respuesta y el 16% de los datos no se ajustaron al modelo. La falta de ajuste no fue significativa a una probabilidad de 0.10 y el valor F. calculado fue mayor (26.68) al F. tabular (2.46) lo que indica que este modelo es predictivo.

Cuadro 11. Coeficientes de regresión, probabilidades (P) de un modelo de regresión polinomial, valores F y R<sup>2</sup> para proteína (%) en función de temperatura (X<sub>1</sub>), tiempo (X<sub>2</sub>) y presión (X<sub>3</sub>) en la elaboración de harina de lombriz.

<b>Factor</b>	<b>Coefficiente de regresión</b>	<b>P</b>
Intercepto	7.43E+01	1.00E-06 μ
X <sub>1</sub>	1.28E-02	9.95E-01
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-6.97E+00	1.14E-02 μ
X <sub>2</sub>	-8.22E-01	6.73E-01
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-6.09E+00	1.90E-02 μ
X <sub>3</sub>	5.84E-01	7.63E-01
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	-6.57E+00	1.42E-02 μ
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-7.26E-01	7.74E-01
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	-1.01E-01	9.68E-01
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	-2.49E+00	3.47E-01
Falta de ajuste		8.81E-01
R <sup>2</sup>	0.8421	
F. Calculado	26.6800	
F. Tabular	2.46	

μ=significativo

En base a los resultados del cuadro 11 se tomaron las variables significativas para elaborar la ecuación 11 y predecir el valor sobre la variable de proteína del modelo.

$$\text{Proteína} = 74.3 - 6.97X_1^2 - 6.09X_2^2 - 6.57X_3^2 \quad [11]$$

Tomando el modelo matemático de la ecuación 11 se crearon los gráficos (Figuras 3, 4 y 5) de superficie respuesta, para la variable de proteína.



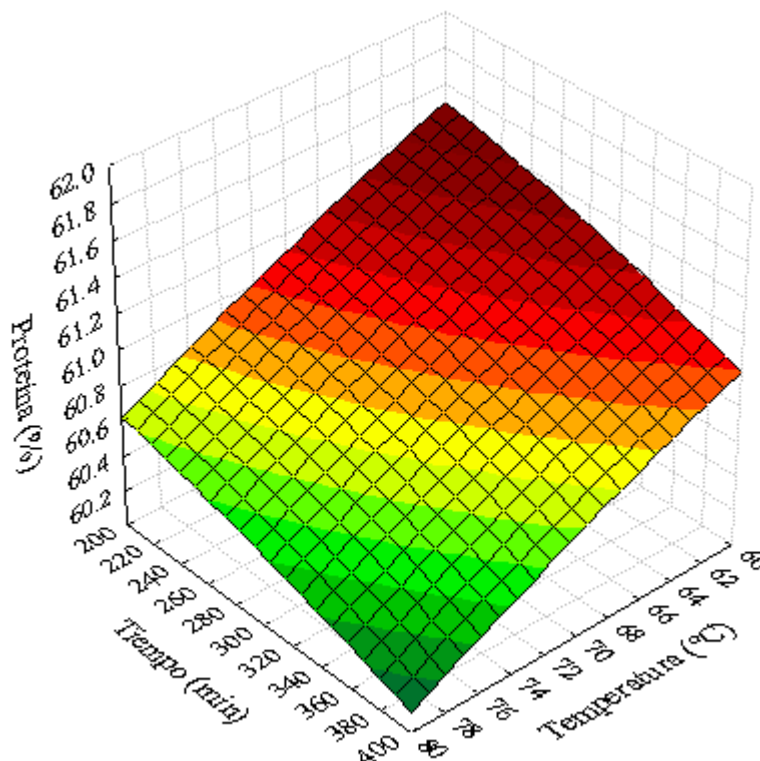


Figura 3. Efecto de la temperatura (°C) y el tiempo (minutos) sobre la proteína (%) en la elaboración de harina de lombriz.

Al disminuir la temperatura y el tiempo podemos obtener un mayor porcentaje de proteína como lo muestra la figura 3. Estas variables están relacionadas por los cambios químicos que sufren las proteínas al someterse a temperaturas alta. Uno de los fenómenos más comunes es la desnaturalización de esta. Un secado sin circulación de aire a 90 °C por 450 minutos es lo máximo reportado para no desnaturalizar la proteína, a 120 °C se han reportado los porcentajes más bajos para la harina de lombriz siendo estos de 23.38% (Alcívar *et al.* 2016).

En este estudio se usaron rangos de tiempo de 209.7 minutos hasta 390.3 minutos, mientras que en otro estudio se usaron tiempos de 360 minutos hasta 540 minutos. Adriano *et al.* (2013) utilizaron temperaturas de 70 y 90 °C para los tiempos de 360 minutos y 540 minutos respectivamente donde reportó porcentajes de proteína de 62%, mientras que este estudio reportó rangos de 51.23 hasta 80.89%.

El tener en cuenta los rangos de porcentajes obtenidos da una idea clara de cuánto es lo máximo y mínimo a obtener de proteína y en base a esto utilizar el modelo con tiempos y temperaturas con el que se cumple los requerimientos básicos de la harina de lombriz de acuerdo al uso dado. Los secados con circulación de aire son más ineficientes para poder conservar la proteína debido a que se desnaturaliza fácilmente por la poca uniformidad para eliminar humedad (Alcívar *et al.* 2016).

La combinación de presión y temperatura es quizás la más notoria para mantener la calidad proteica de la harina de lombriz como lo muestra la Figura 4. El aplicar un vacío por presión como variable en el secado hace que los componentes se volatilicen a una menor temperatura. La Figura 4 muestra que a mayor presión y menor temperatura obtenemos un mayor porcentaje de proteína.

En este secado no solamente el agua se evapora rápido si no también componentes que pueden perjudicar la cantidad y calidad de nutrientes. El utilizar una menor temperatura también obliga a que exista mayor área metálica en el horno para transmitir mejor el calor debido a la baja temperatura que usamos. El beneficio de esto es que la proteína de la harina de lombriz conserva su estructura y mantiene su calidad porque no hay una circulación de aire que promueva desnaturalización (Alcívar *et al.* 2016) .

Incluir la variable de presión en el secado permite conservar propiedades similares a otros tratamientos como la liofilización. Debido a esta variable se logra mantener el perfil de amino ácidos presentes en la harina de lombriz para satisfacer la necesidad de amino ácidos esenciales tanto en humanos como en animales (Vielma *et al.* 2003a). Los valores de presión utilizados van en el rango de 20 inHg a 30 inHg siendo 25 inHg el punto medio, el cual es el utilizado para determinar humedad en un horno al vacío (Nielsen 2004).

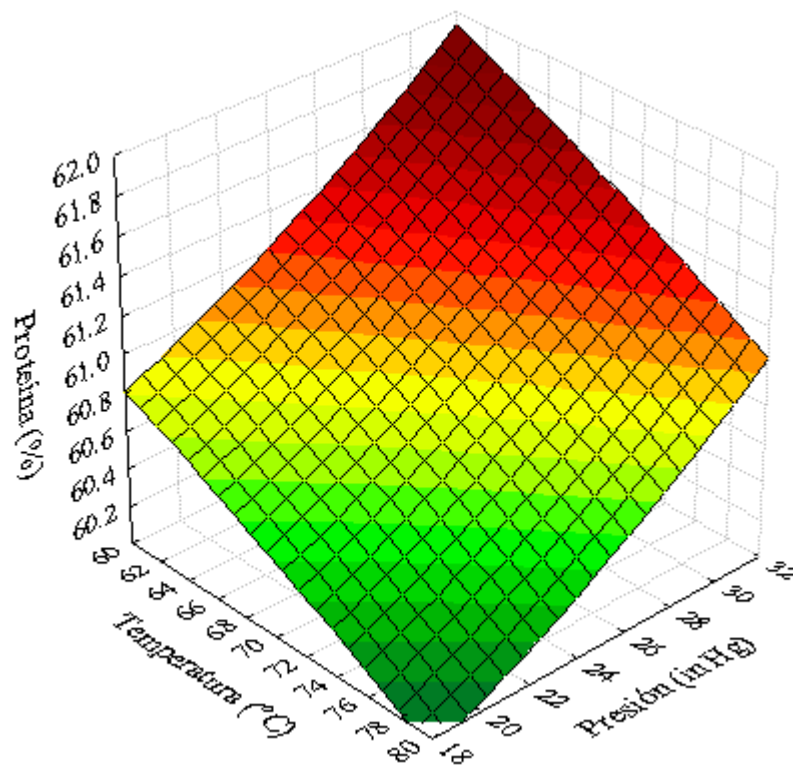


Figura 4. Efecto de la temperatura (°C) y presión (inHg) sobre la proteína (%) en la elaboración de harina de lombriz.

La interacción de presión y tiempo muestra que el mayor porcentaje de proteína se obtiene al aumentar la presión y disminuir el tiempo (Figura 5). Anteriormente, se discutió en base a la Figura 4 que la presión es una variable relacionada directamente a los costos por su interacción con la variable de temperatura. Por otro lado, al interactuar esta variable con la de tiempo se puede priorizar en base a costos disminuir el tiempo de secado para ahorrar energía. Entre menor sea el tiempo de exposición de las lombrices a altas temperaturas podemos conservar mejor la calidad proteica de la harina. Aun cuando el tiempo que usemos sea poco y logremos conservar altos valores de proteína esta duración no es recomendable que sean menor a 200 minutos.

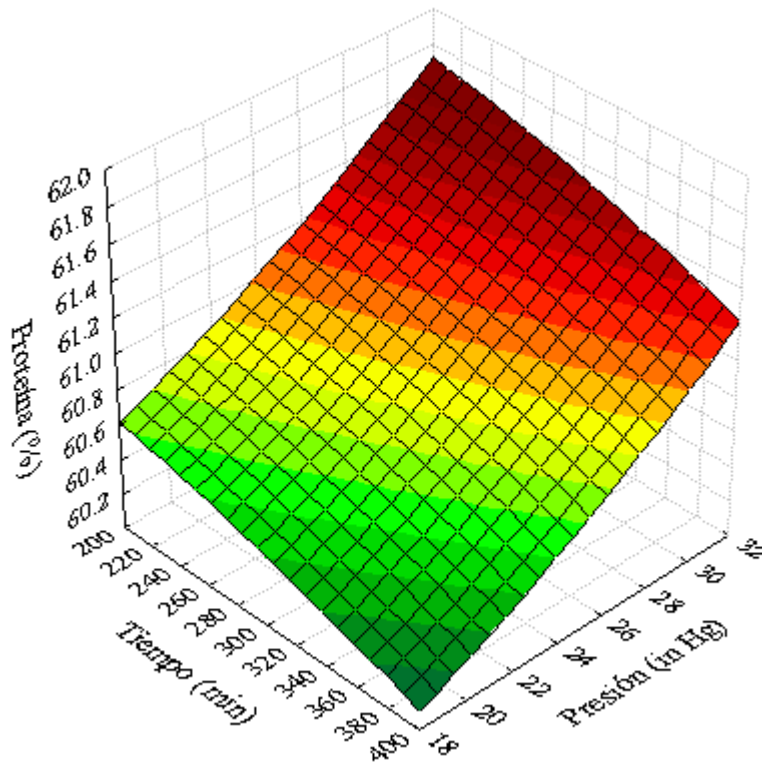


Figura 5. Efecto de tiempo (minutos) y presión (inHg) sobre la proteína (%) en la elaboración de harina de lombriz.

Esto es debido a que se podría tener una humedad por arriba del 12% la cual no es adecuada para este tipo de productos. A temperaturas de 60 °C por tiempos menores a los 540 minutos sin tomar en cuenta la presión se pueden obtener valores 13.5% para humedad, siendo estos no aceptados para una harina, aun cuando estos conservan valores de proteína de 60% aproximadamente (Vielma y Medina 2006). Estos resultados no concuerdan con los obtenidos para el horno de convección mecánica (Cuadro 5), donde la humedad sin incluir la variable de presión fue de 10.36% y el de proteína fue de 45.09. El poder incluir la presión, con temperaturas media de 70 °C permite utilizar tiempos de 250 minutos a 300 minutos sin exceder el 12% de humedad y conservar la proteína en rango de 50 a 80%.

La Figura 6 muestra los valores óptimos en el secado con horno al vacío para obtener el mayor rendimiento, mayor porcentaje de proteína y menor humedad. En base a esto se obtuvo que la combinación de 69.2 °C, 230.77 minutos y 26.333 inHg de vacío logran cumplir estos parámetros y optimizan el secado. Se realizó un secado bajo esta combinación de valores y obtuvimos un 18% de rendimiento, 11.19% de humedad y 51.22% de proteína.

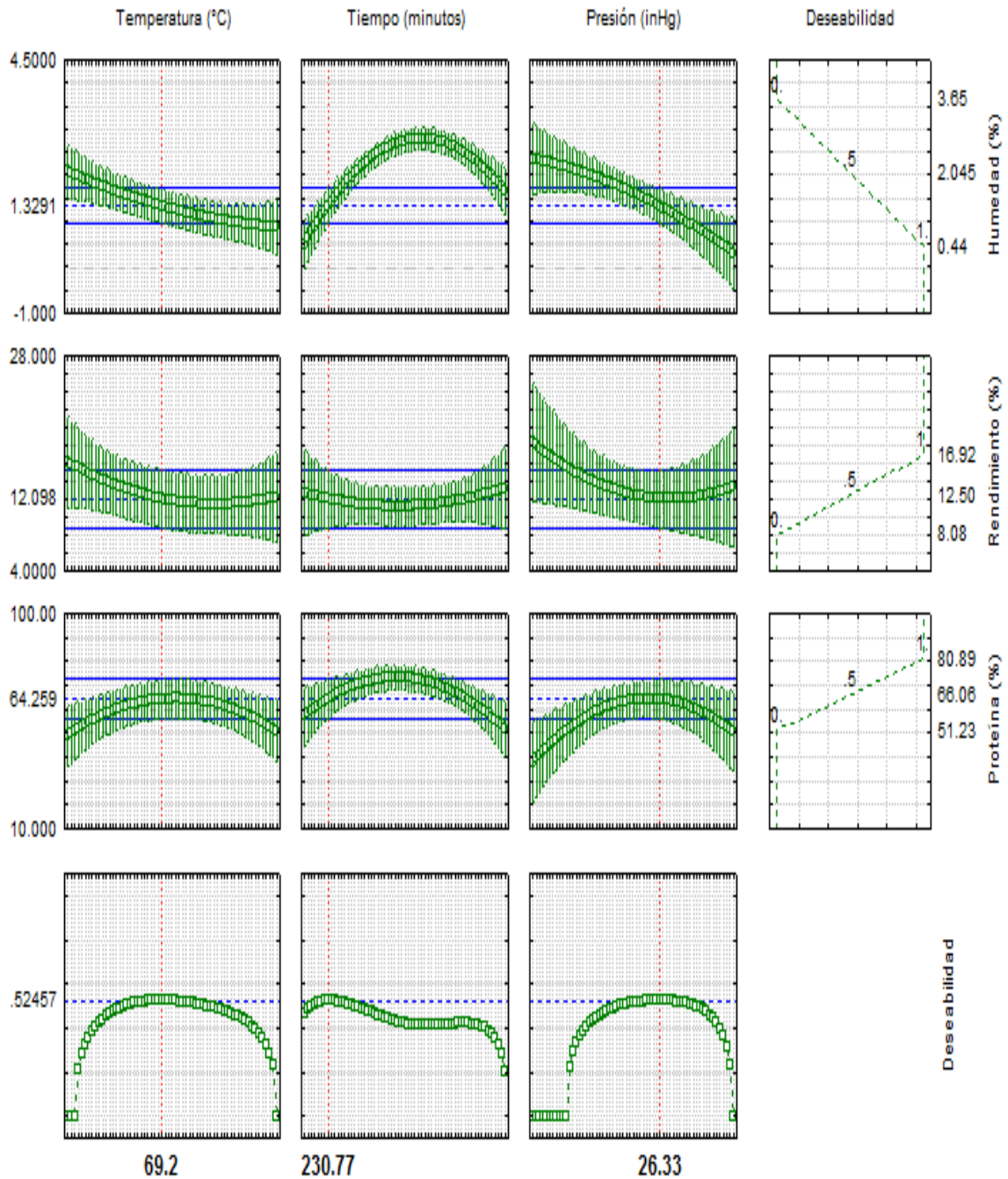


Figura 6. Valores óptimos de las variables independientes sobre las propiedades en la elaboración de harina de lombriz.

### Fase 3. Caracterización de la harina de lombriz optimizada.

**Análisis químicos.** La caracterización de la harina de lombriz se realizó con el resultado obtenido de la fase 2 que se muestra en la Figura 6. El saber la composición química de la harina de lombriz brinda la información necesaria de lo que aporta la materia prima nutricional para poder ser utilizada en la formulación de alimentos balanceados. Los resultados de la composición química de la harina de lombriz fueron expresados en base húmeda (Cuadro 12).

Cuadro 12. Composición química de la harina de lombriz.

Componente de la Harina de Lombriz	Porcentaje (%)
Humedad	11.19
Proteína bruta	51.22
Grasa	8.30
Cenizas	14.27
<b>Carbohidratos totales</b>	
Fibra cruda	5.87
Carbohidratos solubles	9.15

Al momento de formular un balanceado es necesario conocer su composición química. Los datos del análisis proximal de la harina de lombriz presentaron el contenido nutricional que se obtuvo del secado con horno al vacío usando los valores del tratamiento óptimo (Cuadro 12). El contenido de proteína fue de 51.22% donde Adriano *et al.* (2013) en su estudio reportaron un valor de 62%.

El valor para fibra cruda fue de 5.87%, carbohidratos solubles de 9.15% y humedad de 11.19% distintos a los de Vielma y Medina (2006) en su estudio donde reportó 2% de fibra cruda, 8.3% de carbohidratos solubles y 11.6% de humedad. Esto se pudo deber al tipo de alimentación, ya que las lombrices usadas en estudio en su mayoría fueron alimentadas por desechos de la planta de pos cosecha y planta hortofrutícola de Zamorano altos en fibra y carbohidratos. Además, esta variación en la composición nutricional está asociada con la ecología-específica, alimento, temporada, etapa reproductiva y ciclo de vida de la lombriz (Hasanuzzaman *et al.* 2010).

El contenido de grasa fue de 8.30% el cual también fue distinto al reportado por Vielma *et al.* (2003b) que fue de 7.9%; además, mencionan que este contenido de grasa posee una fuente de ácidos grasos esenciales que enriquecen la dieta. El contenido de cenizas de la harina de lombriz es alto con un valor de 14.27% el cual fue distinto al reportado por Vielma y Medina (2006) el cual fue de 7.9%.

Los niveles en los que se pueden utilizar la harina de lombriz son de acuerdo a la afinidad del productor ya que no producen efectos toxicológicos por sus bajos niveles de mercurio y plomo (Vielma *et al.* 2007). No se encuentran metales pesados por el tipo de alimento utilizado y las cantidades presentes en la metodología que estén por debajo del límite detectable del análisis proximal (Alcívar *et al.* 2015).

En base a esta información se tomaron las decisiones de cuanto sería el nivel a utilizar de harina de lombriz en el balanceado a utilizar en los alevines salidos de la reversión sexual y la formulación a utilizar (Cuadro 13).

Cuadro 13. Formulación del balanceado a base de harina de lombriz.

<b>Ingrediente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>L./kg</b>
Harina de lombriz	70.50	21.23
Harina de soya	19.00	14.03
Maíz	4.65	7.41
Biofos	3.20	20.37
Lisina	1.03	69.93
Treonina	0.89	113.21
Metionina	0.76	121.17
<b>Total</b>	<b>100.03</b>	

**Análisis físicos.** Tomar en cuenta las características físicas de la harina de lombriz ayuda a manejar el producto final y destinarlo a especies específicas en base a cómo deben de ofrecerse para su alimentación. Entre los parámetros físicos evaluados en la harina de lombriz se encuentra granulometría e índice de solubilidad y absorción de agua.

**Granulometría.** La granulometría de la harina de lombriz se muestra en el cuadro 14 donde analizamos los porcentajes de retención en cada tamiz. El saber la granulometría de la harina permite tomar la decisión de ofrecerla a los alevines o no. El tamaño de partícula necesario para el alimento de los alevines con pesos de 0.5 g a 10 g van desde 0.6 mm hasta 2 mm (Balbuena 2011).

Cuadro 14. Distribución granulométrica de la harina de lombriz.

<b>Número de tamiz</b>	<b>Apertura en micrones</b>	<b>Retención (%)</b>
20	850	15.04
30	600	24.76
40	425	42.40
60	250	15.24
100	150	2.56

En base al Cuadro 13 se elaboró la Figura 7 para visualizar mejor la distribución porcentual del tamaño de partícula de la harina de lombriz.

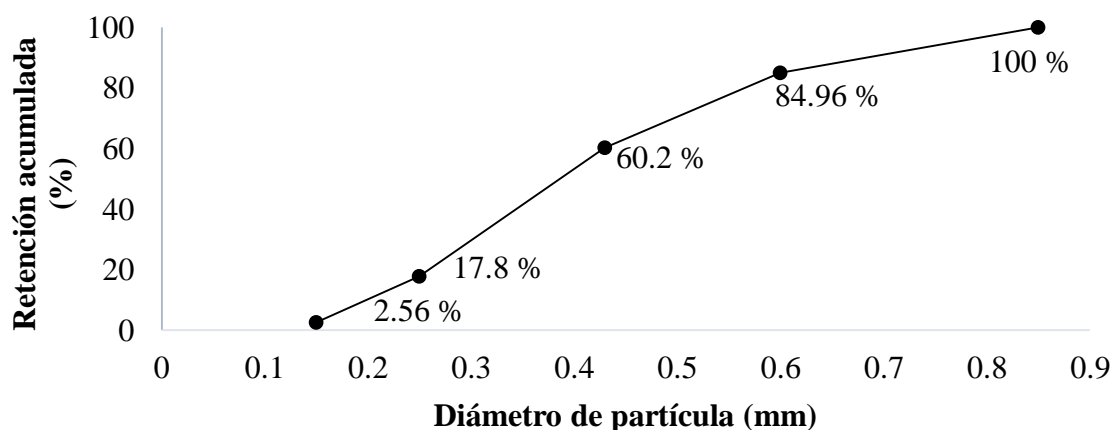


Figura 7. Granulometría presentada en la harina de lombriz en porcentajes acumulados.

La gran parte de la harina de lombriz se concentró en tamaños de 0.43 mm a 0.6 mm en un 67.16%. Los resultados obtenidos de granulometría son buenos, ya que los alevines que se van a alimentar presentan pesos de 0.2 g promedio al momento de la siembra. La harina de lombriz logra con estos tamaños ser usada incluso en alimentación durante la reversión sexual con pesos de alevines menores a 0.5 g (Balbuena 2011). Además, tamaño de partícula de 0.5 mm para alevines de 0.6 g de peso promedio brindan una alimentación mejor distribuida y eficiente (Kaushik 2013).

**Índice de solubilidad en agua (ISA) e Índice de absorción de agua (IAA).** El ISA de la harina de lombriz fue de 25.86% con coeficiente de variación de 0.443%. Esta característica da a conocer cuánto tiempo puede mantenerse la harina en el agua hasta ser aprovechable por el alevín. Para que el alimento logre flotar más tiempos su densidad aparente debe ser menor, aun cuando presenta mayor humedad (Fernández 2007). La solubilidad en agua determina factores para la aplicación en base a su estabilidad y flotabilidad. Entre mayor sea el ISA mayor contaminación habrá presente en el espejo de agua, debido a la hidroestabilidad del alimento donde se esparcirían en pocos segundos (Talavera *et al.* 1998).

El IAA de la harina de lombriz fue de 2.38 con coeficiente de variación de 1.045%. Alimentos extruidos para tilapia reportaron rangos de IAA de 2.61 a 3.37 siendo estos mayores al obtenido (Pantoja *et al.* 2011). Esto se debe a que la humedad es el componente que tiene una relación inversa al IAA, por lo que a mayor humedad tendremos menor IAA. Los factores de ISA y IAA son determinantes en la efectividad de la aplicación del alimento. Estos determinan la frecuencia de alimentación, ya que si no son estables y no flotan el tiempo necesario habría que dividir la ración diaria e incrementar la frecuencia de alimentación. Al realizar esto podríamos utilizar el alimento sin desperdiciarlo y contaminar de manera innecesaria el espejo de agua.

#### **Fase 4. Evaluación de parámetros productivos en los alevines con el balanceado a base de harina de lombriz.**

La eficiencia con la que ganan peso los alevines se basa en una buena formulación con una dieta que cumpla todos los requerimientos necesarios para el organismo. Los parámetros de ganancia diaria de peso (GDP) e índice de conversión alimenticia son los que se evaluaron en los alevines durante un mes (Cuadro 15).

Cuadro 15. Efecto del balanceado a base de harina de lombriz y el balanceado ALCON de 45% en la GDP e ICA de los alevines salidos de la reversión sexual.

<b>Tratamiento</b>	<b>GDP<sup>(NS)</sup></b>	<b>ICA<sup>(NS)</sup></b>
Harina de lombriz	0.15	1.53
Control	0.12	1.93
Coefficiente de variación (%)	9.07	10.27
Desviación estándar	0.01	0.17

NS: No existe diferencia significativa entre tratamientos con una  $P > 0.05$

GDP: Ganancia diaria de peso, ICA: Índice de conversión alimenticia

Los dos tratamientos estadísticamente son iguales en la ganancia de peso diaria e índice de conversión alimenticia en los alevines de tilapia roja en un período de un mes. El que no existiera diferencia significativa se pudo dar por diversas razones como lo fue el cambio de densidad a medida se completaba el ensayo. Esto es debido a que el tratamiento control presentó una mortalidad mayor a la del balanceado con harina de lombriz, al haber menos peces es más fácil que se mantenga el pre engorde. Alimentos a partir de carne pueden ser considerados como alternativas para alimentación acuícola y se espera una menor mortalidad usando los porcentajes de proteína apropiadas y un mejor rendimiento en crecimiento (Siddika *et al.* 2012).

La sobrevivencia al final del mes fue de 96.66% para el balanceado con harina de lombriz y del 50% para el balanceado ALCON de 45%. Pudiendo ser esto un factor a evaluar en una investigación con mayor número de alevines con distintas densidades. La GDP del tratamiento control fue de 0.12 g/día y el del balanceado con harina de lombriz fue de 0.15 g/día siendo mayores a 0.03 g/día en alevines de tilapia roja. Mientras que el ICA en el control fue de 1.93 y el del balanceado con harina de lombriz fue 1.53 siendo similar a 1.60 en alevines de tilapia roja cultivadas en Zamorano en el 2013 (Forestieri 2013).

Las GDP de la investigación fueron mayores y esto se debe a que las densidades de nuestro ensayo fueron menores. A pesar que estadísticamente son iguales los tratamientos, puede ser más rentable utilizar el balanceado con harina de lombriz porque utilizaríamos menos cantidad de alimento por los mismos resultados de peso, ahorrando así dinero en la producción. Por otro lado, los costos del balanceado a base de harina de lombriz son de L.967.23 para 45.45 kg, mientras que el balanceado comercial ALCON de 45% es de L.1200.84 para 45.45 kg. Esto da a entender que es de mayor beneficio utilizar el balanceado a base de harina de lombriz en base a su relación costo-beneficio.



La Figura 8 muestra la curva de crecimiento de los alevines durante el ensayo con los dos programas de alimentación. Se puede inferir de esto que a medida transcurre el tiempo el balanceado con harina de lombriz pudiera ganar más peso, llegando así a ser estadísticamente diferente al balanceado ALCON de 45%.

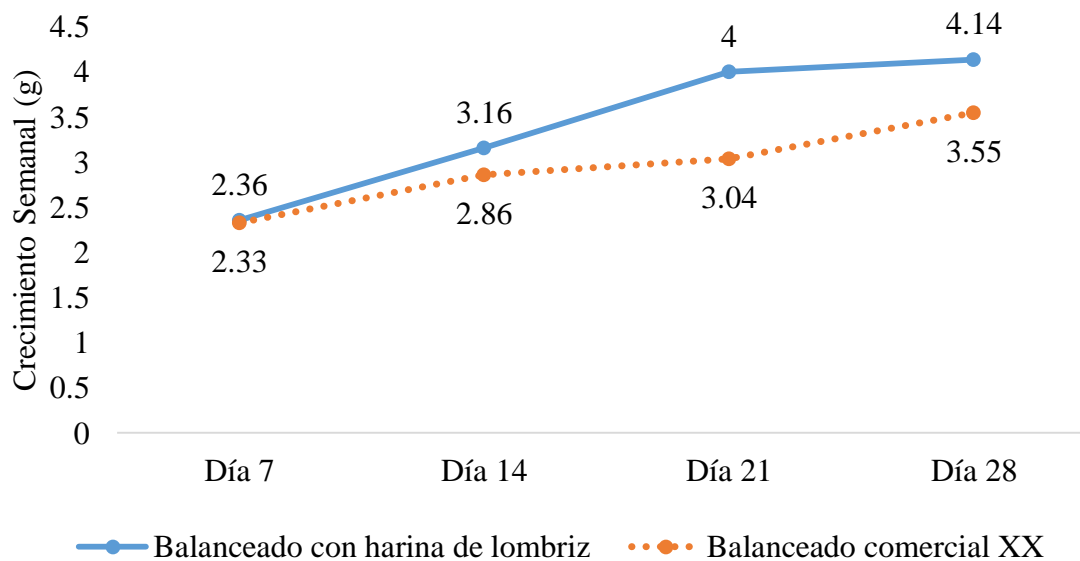


Figura 8. Curva de crecimiento de los alevines de tilapia semanalmente.

Al final de las cuatro semanas el mayor peso promedio fue de 4.14 g con el balanceado a base de harina de lombriz. En México se han reportado pesos a los 30 días salidos de la reversión sexual de 5.70 g para la especie *Oreochromis niloticus* siendo estos mayores a los obtenidos (Castro *et al.* 2004). Los pesos menores en este estudio se pueden deber a la temperatura utilizada, la cual fue de 25 °C donde lo óptimo sería llegar a los 28 °C para obtener un rendimiento mayor en la ganancia diaria de peso de los alevines.

Se infiere que las condiciones de producción deben cambiar, ya que la formulación a base de harina de lombriz con harina de soya es una buena dieta para el pre engorde de alevines (Morillo *et al.* 2013). El usar la temperatura óptima de crecimiento con una fuente de proteína animal completa como la harina de lombriz, se esperarían mejores pesos al día 28. Esto es debido a que la tilapia aun cuando posee hábitos herbívoros, logra ganar más peso con proteína animal (Chamorro 2013).

## 4. CONCLUSIONES

- El secado con horno al vacío es más eficiente en la elaboración de la harina de lombriz roja californiana debido a que se conserva mejor la calidad proteica.
- La humedad, rendimiento y proteína se optimizan con la combinación de 69.2 °C, 230.77 minutos y 26.33 inHg en el secado con horno al vacío.
- La harina de lombriz es un buen sustituto proteico para la elaboración de balanceados acuícolas por su contenido de 51.22% de proteína cruda.
- El uso del balanceado a base de harina de lombriz proporciona las mismas ganancias diarias de peso e índice de conversión alimenticia en alevines, pero a un menor costo de producción en comparación al balanceado comercial ALCON de 45%.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Estandarizar la alimentación de las lombrices para determinar su efecto específico en la composición nutricional.
- Evaluar el secado con horno al vacío con una capacidad instalada mayor a dos libras por tanda para visualizar mejor su aplicación industrial y la calidad del producto final.
- Optimizar otros tipos de secado para la elaboración de la harina de lombriz e incluir la optimización de la variable costos.
- Determinar el perfil de aminoácidos y de ácidos grasos esenciales para elaborar una dieta más específica para los alevines de tilapia.
- Aplicar el balanceado de harina de lombriz en la etapa de reversión sexual de los alevines.
- Peletizar y utilizar el balanceado de harina de lombriz en otras etapas y especies para medir su aplicabilidad.

## 6. LITERATURA CITADA

Adriano MdL, Gyves Córdova MG, Vázquez Ovando JA, López García JA, Jiménez Silvano E. 2013. Efecto del proceso de secado de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en sus características nutricionales. *Quehacer Científico en Chiapas*. 8(2):44–50.

Alcívar U, Dueñas A, Olazábal E, Cortés R. 2015. Selenio incorporado en material vegetal para la obtención de harina de lombriz y humus. *Centro Agrícola*. 42(2):85–90.

Alcívar U, Dueñas A, Sacon Vera E, Bravo Sánchez L, Villanueva Ramos G. 2016. Influencia de los tipos de secado para la obtención de harina de Lombriz Roja californiana (*Eisenia foetida*) a escala piloto. *Tecnología Química*. XXXVI(2):225–236.

Anderson R. 1982. Water absorption and solubility and dmylograph characteristics of roll-cooked small grain products. *Cereal Chemistry*. 59(4):265–269.

Asencio L. 2010. Desarrollo de una metodología para la cuantificación de mermas en plantas de alimentos balanceados de Zamorano [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-San Antonio de Oriente. 48 p.

Balbuena E. 2011. Manual básico de piscicultura para Paraguay. Paraguay: FAO. 52 p.

Bastardo H, Medina A, Bianchi G. 2008. Utilización de proteína no convencional en dietas para iniciador de trucha arcoiris, *Oncorhynchus mykiss*. [internet]. Venezuela: Instituto Nacional de Investigación Agrícolas; [accesado 2017 jun 7]. <http://albeitar.portalveterinaria.com/noticias/3623/articulos-otro-temas-archivo/utilizacion-de-proteina-no-convecional-en-dietas-para-iniciador-de-truchas-arcoiris-oncorhynchus-mykuss.html>.

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.

Box G, Draper N. 1959. A Basis for the selection of a response surface design. *Journal of the American Statistical Association*. 54(287):622–654.

Bustamante L. 2016. La lombricultura como alternativa en la producción agrícola utilizando la lombriz roja californiana [Tesis]. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Coahuila-México. 55 p.

Castro R, De la Paz J, Aguilar G. 2004. Evaluación del crecimiento de alevines de tres especies de tilapia (*Oreochromis* sp.) en aguas duras, en la región de la Cañada, Oaxaca, México. *Revista AquaTIC*. (20):38–43.

Chamorro J. 2013. Comparación de la sobrevivencia y ganancia de peso de alevines de tilapia roja (*Oreochromis* sp.) alimentados con dietas conteniendo 21, 42 y 64% de harina de pescado [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-San Antonio de Oriente. 20 p.

Dávila FS. 1996. Harina de lombriz, alternativa proteica en trópico y tipos de alimento. *Folia Amazónica*. 8(2):77–90.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2017. Tilapia del Nilo - *Oreochromis niloticus*: Formulación y preparación/producción de alimentos. [internet]. Roma, Italia: FAO; [accesado 2017 jun 7]. <http://www.fao.org/fishery/affris/perfiles-de-las-especies/nile-tilapia/formulacion-y-preparacion-produccion-de-alimentos/es/>.

Fernández A. 2007. Optimización del proceso de extrusión para la elaboración de pelets para alimentación de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en Zamorano [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-San Antonio de Oriente. 35 p.

Forestieri D. 2013. Comparación de la sobrevivencia y ganancia de peso de alevines de tilapia roja (*Oreochromis* sp.) sembrados a 1000, 3000 y 5000/m<sup>3</sup> de agua durante 30 días [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-San Antonio de Oriente. 23 p.

García MD, Oruña L, Domínguez H, Martínez V. 2005. Evaluación de la calidad proteica de harina de lombriz (*Eisenia foetida*) en ratas en crecimiento. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 39(3):333–338.

Guevara J, Rovira M. 2012. Caracterización de tres extractos de *Moringa oleifera* y evaluación de sus condiciones de infusión en sus características fisicoquímicas [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-San Antonio de Oriente. 28 p.

Hasanuzzaman A, Hossain S, Das M. 2010. Nutritional potentiality of earthworm (*Perionyx excavatus*) for substituting fishmeal used in local feed company in Bangladesh. *Mesopotamian J. of Marine Science*. 25(2):134–139.

Kaushik S. 2013. Feed management and on-farm feeding practices of temperate fish with special reference to salmonids. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. (583):519–551.

Latimer G, Cunniff P. 2016. Official methods of analysis of AOAC International. 20th edition. Gaithersburg, Md.: AOAC International. 3172 p.

Lucas J, Quintero V, Cárdenas C. 2013. Caracterización de harina y almidón obtenidos a partir de plátano guineo AAAea (*Musa sapientum* L.). *Acta Agronómica*. 62(2):83–96.

Meyer D, Triminio S. 2007. Reproducción y cría de alevines de tilapia: Manual Práctico. 1ra. Honduras: Zamorano Academic Press. 51p.

Morillo M, Visbal T, Altuve D, Ovalles F, Medina A. 2013. Valoración de dietas para alevines de *Colossoma macropomum* utilizando como fuentes proteicas harinas: de lombriz (*Eisenia foetida*), soya (*Glycine max*) y caraotas (*Phaseolus vulgaris*). Revista Chilena de Nutrición. 40(2):147–154.

Nielsen SS. 2004. Food Analysis. 4th ed. West Lafayette, IN, USA: Springer. 585 p. ISBN: 978-1-4614-2589-2.

NRC (National Research Council). 2011. Nutrient requirements of fish and shrimp. Washington, D.C.: National Academies Press. 392 p. ISBN: 978-0-309-16338-5.

Pantoja J, Sanchez S, Hoyos J. 2011. Obtención de un alimento extruído para tilapia roja (*Oreochromis* sp) utilizando ensilaje biológico de pescado. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. 9(2):178–187.

Pineda JA. 2006. Lombricultura. 1a. ed. Tegucigalpa: Instituto Hondureño de Café. 38 p.

Rodrigues MI, Iemma AF. 2014. Experimental design and process optimization. Boca raton, Florida: CRC Press. 324 p. ISBN: 9781482299557.

SAG (Secretaría de Agricultura y Ganadería). 2016. Honduras mantiene liderazgo en exportación de tilapia fresca. Honduras: Secretaría de Agricultura y Ganadería; [accesado 2017 jun 7]. <http://www.sag.gob.hn/sala-de-prensa/noticias/ano-2016/abril-2016/honduras-mantiene-liderazgo-en-exportacion-de-tilapia-fresca/>.

Siddika I, Das M, Sumi K. 2012. Effect of isoproteinous feed on growth and survival of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. Journal of the Bangladesh Agricultural University. 10(1):169–174.

Solís K. 2013. Efecto del uso de lactosuero dulce en el rendimiento y en las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de pan blanco [Tesis]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano-San Antonio de Oriente. 23 p.

Talavera V, Sánchez D, Zapata L. 1998. Costo-efectividad y calidad de alimentos balanceados para camarón. Boletín nicovita: Camarón de mar. 3(8):1–3.

Torres K. 2007. Optimización de la etapa de hidrólisis ácida en el proceso de fosfatación de almidón por extrusión para la encapsulación de aceite esencial de naranja [Tesis]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. 101 p.

Vielma R, Ovalles Durán J, León Leal A, Medina A. 2003a. 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). Revista de Facultad de Farmacia. 44(1):43–58.

Vielma RA, Usubillaga A, Medina AL. 2003b. Estudio preliminar de los niveles de ácidos grasos de la harina de lombriz (*Eisenia foetida*) mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Revista de Facultad de Farmacia. 45(2):39–44.

Vielma RA, Carrero P, Rondón C, Medina AL. 2007. Comparación del contenido de minerales y elementos trazas en la harina de lombriz de tierra (*Eisenia foetida*) utilizando dos métodos de secado. Revista de Facultad de Farmacia. 19(1):83–89.

Vielma RA, Medina AL. 2006. Determinación de la composición química y estudios de solubilidad en la harina de lombriz *Eisenia foetida*. Revista de Facultad de Farmacia. 48(1):2–8.

## 7. ANEXOS

**Anexo 1.** Requerimientos suplidos en el balanceado de harina de lombriz zamorano.

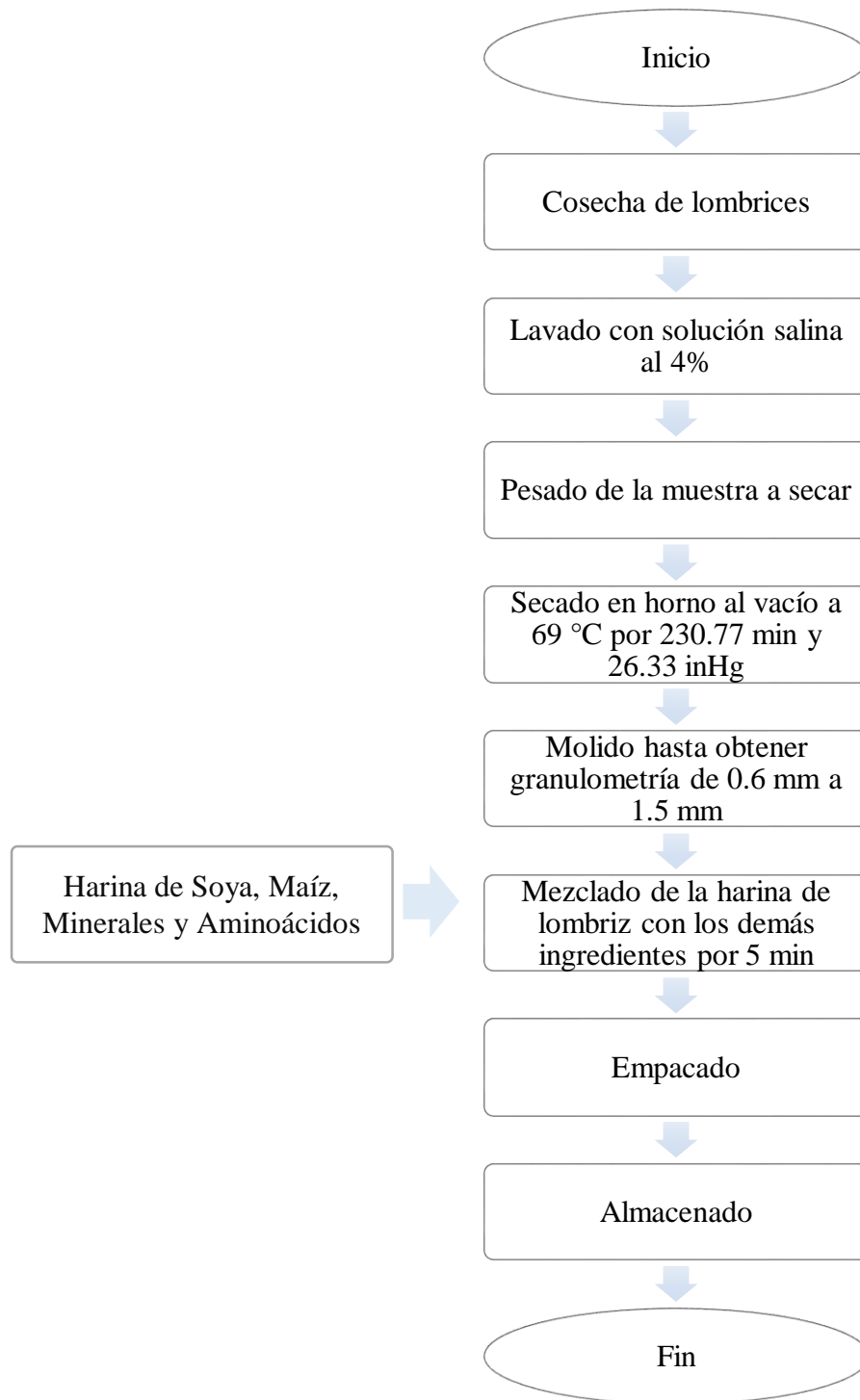
<b>CALCULADO EN BASE A DATOS DEL NRC</b>				
<b>NUTRIENTE</b>	<b>REST.</b>	<b>REQUER.</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>% SUPLIDO</b>
Materia Seca	MIN	91.50	%	100%
Proteina	MIN	45.00	%	100%
EM Alevin	MIN	3155.00	Kcal/Kg	100%
Ca	MIN	0.56	%	100%
P total	MIN	0.80	%	100%
Ca/P Total	MAX			0.70
Ca/P Disp.	MAX			2.34
Fibra	MAX	5.54	%	100%
Lisina	MIN	1.43	%	100%
Met+Cist	MIN	0.75	%	100%
Treonina	MIN	1.05	%	100%

**Anexo 2.** Costos de elaboración de la harina de lombriz.

<b>Costos</b>	<b>Secado</b>	<b>Molido</b>	<b>Mano de Obra</b>
Costo unitario (L.)	7.50	3.50	10.23
Costo total L./kg	21.23		



**Anexo 3.** Flujo de proceso final para la elaboración del balanceado de harina de lombriz.



**Anexo 4.** Costos del balanceado a base de harina de lombriz para un quintal.

<b>Ingrediente</b>	<b>Costo unitario por kilogramo (L.)</b>	<b>Costo total (L.)</b>
Harina de lombriz	21.23	680.32
Harina de soya	14.03	121.22
Harina de maíz	7.41	15.67
Biofos	20.37	29.63
Lisina	69.93	32.74
Treonina	113.21	45.79
Metionina	121.17	41.86
<b>Total</b>		<b>967.23</b>

**Anexo 5.** Granulometría presentada en el alimento comercial ALCON de 45%.

