

2022



De:
Planeta Formación y Universidades

SISTEMA DE MONITOREO E IDENTIFICACION DE LAS CONDICIONES DE REPRODUCCIÓN DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA COMO ESTRATEGIA PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE PRODUCTOS EN BASE AL ANELIDO

**KARLA YOHANA SÁNCHEZ MOJICA
JULIAN GUTIERREZ
LUIS ASUNCIÓN PEREZ DOMINGUEZ
DARWIN ORLANDO CARDOZO S.**

**Programas TI
Facultad de Ingeniería
Corporación Universitaria
Iberoamericana**



De:
Planeta Formación y Universidades

Sistema de monitoreo e identificación de las condiciones de reproducción de la lombriz roja californiana como estrategia para la diversificación de productos en base al anélido

System of monitoring and identification of the conditions of reproduction of the Californian red worm as a strategy for the diversification of products based on the annelid

Karla Yohana Sánchez Mojica

Corporación Universitaria Iberoamericana

Julián Gutiérrez

Corporación Universitaria Iberoamericana

Luis Asunción Pérez Domínguez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Darwin Orlando Cardozo Sarmiento

Fundación de Estudios Superiores Comfanorte FESC

Noviembre, 10 del 2022

Agradecimientos

Agradecemos a las instituciones participantes en este proyecto y al empresario dueño de Productos de la Hacienda por la disposición al trabajo conjunto y por la prestación de los espacios para la experimentación en el marco de la investigación; el señor Alfonso Parra, quien trabajo de la mano con los investigadores para la gestión de los resultados.

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitoreo y mejoramiento de las condiciones de reproducción de la lombriz roja californiana como estrategia para la diversificación de productos en base al anélido. Se busca aumentar la producción de este animal para que exista la posibilidad de generar más productos que surgen de la lombriz roja californiana. La metodología empleada obedece a un proyecto de tipo exploratorio con un enfoque experimental para la obtención de datos partiendo de unas condiciones de variables especificadas por la revisión bibliográfica; el análisis de los datos permitirá identificar los niveles de los factores que permitan optimizar la producción y al mismo tiempo realizar una plataforma web donde se puedan hacer estimaciones de la producción. La ejecución de este proyecto pretende que se facilite el monitoreo de las variables que intervienen en el proceso de reproducción de la lombriz y que su control aumente la producción del anélido en busca de la diversificación de productos.

Palabras Clave: lombriz, monitoreo, optimización, reproducción, sistema.

Abstract

This research aims to identify the optimal conditions for the reproduction of the Californian red worm, the automation of measurements and the development of a monitoring system in search of the prediction of the behavior of the animal as a strategy for product diversification based on to the annelid. Earthworm beds are used in the city of Cúcuta in Colombia for the automation of the measurement of the determining variables in the reproduction of the Californian red worm for data collection; its subsequent exploratory analysis with the R-Studio software and estimation of the reproduction behavior model with regression. Hence, a contrast of the results is made with the TODIM (an acronym in Portuguese for Iterative Multi-criteria Decision Making) method and the web platform is implemented using the libraries proposed by TTGO for real-time monitoring.

Taking into account the analysis of variance and regression applied to the data collected statistically, the optimal conditions for the reproduction of the Californian red worm are validated, defining the temperature at 20 degrees Celsius, humidity at 80%, diet with two

significant options: bagasse or coffee pulp and bovine waste. These results coincide in the predictive analysis as with the TODIM method and two mathematical models of the behavior of earthworm reproduction depending on the diet are established. Estimating the behavior of the reproduction of the Californian red worm depending on the food resources that the entrepreneurs have allows the production of organic fertilizer and humus to be estimated as the main export products for Colombia; the real-time verification of the variables and their automation guarantee the quality of the production system.

Keywords: earthworm, monitoring, optimization, reproduction, system

Tabla de Contenido

Introducción

Capítulo 1 - Fundamentación conceptual y teórica

Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

2.2 Población o entidades participantes

2.3 Definición de Variables o Categorías

2.4 Procedimiento e Instrumentos

2.5 Alcances y limitaciones

Capítulo 3 - Resultados

Capítulo 4 - Discusión

Capítulo 5 - Conclusiones

5.1 Cumplimiento de objetivos y aportes

5.2 Producción asociada al proyecto

5.3 Líneas de trabajo futuras

Anexos

Referencias

Índice de Tablas

Tabla 1. Identificación de factores que inciden en la reproducción o tasa de mortalidad de la lombriz roja californiana. H: Humedad, T: Temperatura y A: Tipo de alimentación.

Tabla 2. Identificación de niveles trabajados en diferentes estudios para cada factor. H: Humedad y T: Temperatura

Tabla 3. Alimentación de la lombriz roja californiana según la revisión bibliográfica

Tabla 4. Niveles escogidos para cada factor y su convención

Tabla 5. Tratamientos en cada fracción de forma aleatoria

Tabla 6. Tabla para la recopilación de datos

Tabla 7. Matriz de decisiones

Tabla 8. Matriz de normalización

Tabla 9. Cálculo de grado de dominancia por combinaciones

Tabla 10. Cálculo de grado de dominancia general

Índice de Figuras

- Figura 1. Oferta de residuos sólidos y productos residuales en Colombia 2012-2019
- Figura 2. UPA que desarrollan procesos de gestión de los residuos
- Figura 3. Uso de fertilizantes en kilogramos por hectárea cultivada (promedio mundial 1976 – 2018)
- Figura 4. Precio mundial de fertilizantes en dólares por tonelada corta
- Figura 5. Cantidad de UPA que realizaron procesos de innovación en el 2019
- Figura 6. Esquema general del diseño del experimento de lombrices californianas
- Figura 7. Ruta de análisis de datos
- Figura 8. Análisis de las dietas
- Figura 9. Suma de los cuadrados del factor dieta
- Figura 10. Promedio de valores de humedad
- Figura 11. Suma de cuadrados de la diferencia con la media global
- Figura 12. Promedio de los valores de temperatura
- Figura 13. Suma de los cuadrados de la diferencia con la media global
- Figura 14. Promedio de los valores de dieta vs humedad
- Figura 15. Promedio de los valores de dieta (café) vs humedad
- Figura 16. Interacción dieta (café) vs humedad
- Figura 17. Promedio dieta (Ovino) vs humedad
- Figura 18. Interacción dieta (Ovino) vs humedad
- Figura 19. Promedio (Bovino) vs humedad
- Figura 20. Interacción dieta (Bovino) vs humedad
- Figura 21. Promedio de niveles de humedad (70) vs dieta
- Figura 22. Interacción humedad (70) vs dieta
- Figura 23. Promedio humedad (80) vs dieta
- Figura 24. Interacción humedad (80) vs dieta
- Figura 25. Promedio humedad (89) vs dieta
- Figura 26. Interacción humedad (89) vs dieta
- Figura 27. Promedio temperatura (15) vs dieta
- Figura 28. Promedio dieta (café) vs Temperatura
- Figura 29. Interacción dieta (café) vs Temperatura
- Figura 30. Promedio dieta (Ovino) vs Temperatura
- Figura 31. Interacción dieta (Ovino) vs Temperatura
- Figura 32. Promedio dieta (Bovino) vs Temperatura
- Figura 33. Interacción dieta (Bovino) vs Temperatura
- Figura 34. Promedio temperatura (15) vs dieta
- Figura 35. Interacción temperatura (15) vs dieta
- Figura 36. Promedio temperatura (20) vs dieta
- Figura 37. Interacción temperatura (20) vs dieta
- Figura 38. Promedio temperatura (25) vs dieta
- Figura 39. Interacción temperatura (25) vs dieta

Figura 40. Promedio Humedad (70) vs Temperatura
Figura 41. Interacción Humedad (70) vs Temperatura
Figura 42. Promedio Humedad (80) vs Temperatura
Figura 43. Interacción Humedad (80) vs Temperatura
Figura 44. Promedio Humedad (89) vs Temperatura
Figura 45. Interacción Humedad (89) vs Temperatura
Figura 46. Promedio Temperatura (15) vs Humedad
Figura 47. Interacción Temperatura (15) vs Humedad
Figura 48. Promedio Temperatura (20) vs Humedad
Figura 49. Interacción Temperatura (20) vs Humedad
Figura 50. Promedio Temperatura (25) vs Humedad
Figura 51. Interacción Temperatura (25) vs Humedad
Figura 52. 27 posibles combinaciones del modelo 3^3
Figura 53. Construcción de la triple interacción
Figura 54. Número de tratamientos por fracción
Figura 55. Elección de la fracción a desarrollar en el experimento
Figura 56. Formato de inspección de camas para experimento
Figura 57. Histograma de los datos del peso (variable respuesta)
Figura 58. Comportamiento del factor temperatura y humedad con respecto al peso de las camas
Figura 59. Interacción entre factor temperatura y humedad con respecto al peso de las camas
Figura 60. Efecto del tiempo hacia la variable respuesta del factor temperatura
Figura 61. Efecto del tiempo hacia la variable respuesta del factor humedad
Figura 62. Regresión Lineal Múltiple
Figura 63. Regresión Lineal Múltiple con logaritmo
Figura 64. Análisis de residuales
Figura 65. Matriz de correlación
Figura 66. Ranking según dominancia general
Figura 67. Esquema del sistema implementado en el lombricultivo
Figura 68. Prueba de funcionamiento de la programación de la tarjeta TTGO y periféricos
Figura 69. Instalación y resguardo de la caja de control del sistema
Figura 70. Prueba del sistema de riego automatizado para el control de las variables humedad y temperatura
Figura 71. Prueba de conexión y lectura de los valores de la humedad y temperatura en tiempo real

Introducción

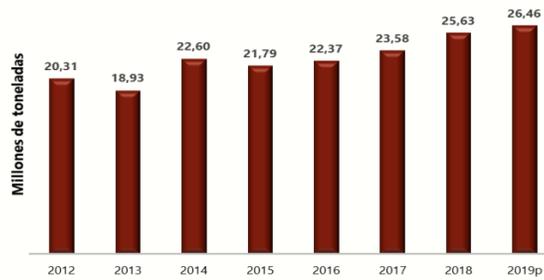
El desarrollo tecnológico hoy en día es una de las mayores fuentes de riqueza de las naciones, siempre y cuando esta sea aplicada al servicio de las soluciones a problemáticas sociales, económicas y ambientales (Castaldi & Dosi, 2009), es por ello que la carencia de los sistemas tecnológicos representa un problema que tiene múltiples dimensiones. Para el caso de la producción de lombriz roja californiana esta no es la excepción ya que la falta de herramientas tecnológicas que permitan controlar las variables más importantes que afectan el crecimiento de los cultivos lo cual genera una pérdida de la oportunidad de suplir el mercado con suficiente volumen de lombrices.

A su vez constituye una limitante en la reducción del impacto en el tratamiento de residuos sólidos, lo que conlleva al vertimiento de los residuos en vertederos o depósitos de basura, también se tiene la pérdida de oportunidad de cubrir el mercado de alimentos para la alimentación de ganado y animales de cría, al igual que la reducción del uso de fertilizantes químicos por sustitución con lombricompost como parte del abastecimiento para el sector agrícola y como resultado global de todas las variables anteriores un efecto negativo en la seguridad alimentaria de la población.

Durante los últimos años por ejemplo la producción de residuos sólidos por parte de la población colombiana ha ido en aumento, esto se debe principalmente a dos causas fundamentales, las cuales son el crecimiento de la población y el incremento de residuos sólidos per cápita dando como resultado un aumento superior al 25% tomando desde el año 2012 al 2019 (Hernandez, 2021).

Adicional al incremento de los desperdicios, se tiene el bajo nivel de aprovechamiento de los residuos sólidos de tipo orgánico los cuales representan el 55% del volumen total de los materiales desechados estos se pueden usar para compostaje, fabricación de biocombustibles y otros tipos de tratamientos, de la totalidad del material orgánico solo el 27% es utilizado de forma efectiva, mientras el resto es enviado a rellenos sanitarios (Cardenas, 2021), lo que implica que existe una carencia en el manejo de los residuos orgánicos producidos en los diferentes estamentos lo que está fuertemente relacionado a una baja producción de lombricompost ya que por medio de este es posible desarrollar un aprovechamiento de los residuos y transformarlos en abono para los cultivos.

Figura 1. Oferta de residuos sólidos y productos residuales en Colombia 2012-2019



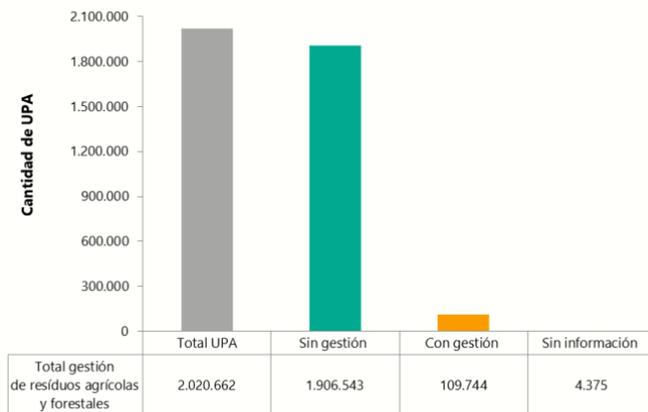
Fuente: DANE. (2022). *Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – residuos sólidos (CAEFM-RS)*. Bogotá: DANE.

De lo anterior se deriva otra problemática la cual es la incorporación de residuos en los vertederos de basura que tiene un efecto importante en el desarrollo de las emisiones de gases de efecto invernadero generando un alto impacto en el cambio climático a nivel mundial, en el caso local Colombia es responsable del 0.46% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial (Trujillo & Armas, 2021), por otro lado la incorporación de materiales sólidos orgánicos en los rellenos sanitarios genera la degradación de la masa en combinación con las lluvias produciendo lixiviados que contaminan las fuentes de aguas subterráneas y los cuerpos de agua que se encuentran cerca de los rellenos sanitarios (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2017).

Una forma de abordar la problemática ambiental que representa la disposición y aprovechamiento de los residuos sólidos es por medio del uso de las lombrices capaces de degradar los residuos en material utilizable como abono como también el uso de las propias lombrices para el desarrollo de fuentes proteicas para la alimentación de animales de granja. Una de las ventajas del uso del vermacompostaje (Olle, 2019.) para el tratamiento de los residuos sólidos es la baja emisión de CO₂, como también el mejoramiento de los abonos en comparación con otras metodologías tradicionales de compostaje ya que incrementan la fertilidad de los suelos al tener mayor porosidad y retención de agua e incluso generan abonos con composiciones similares a los elementos mejor asimilables por las plantas (Medina-Sauza, 2019).

En el sector agrícola la gestión de los residuos es muy deficiente a pesar de que en su mayoría son útiles para el desarrollo de las actividades de compostaje, según la encuesta nacional agropecuaria realizada en el 2019, tan solo el 4.5% de las unidades de producción agrícola realizan actividades de compostaje como parte de la gestión de los residuos de la producción agrícola (DANE, 2020).

Figura 2. UPA que desarrollan procesos de gestión de los residuos



Fuente: (DANE, 2020)

En sí el aprovechamiento de los residuos orgánicos mencionados anteriormente puede usarse en la producción de alimentos para animales por ello la producción de lombrices es de gran importancia para el desarrollo de la ganadería, la piscicultura y otras prácticas de producción alimenticia debido a que la calidad de la carne y los productos derivados de la crianza de animales domésticos depende directamente de la forma en que fueron alimentados los animales, de manera que la mejora en la calidad de la alimentación de los animales lo que puede derivar en una reducción de la desnutrición que impacta negativamente la salud de los consumidores (Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP, 2014), de esta manera se puede inferir que mejorar la condiciones de calidad de la alimentación de los animales permite desarrollar mejoras globales en la calidad y disponibilidad de los alimentos de consumo humano, además que se mejoran las condiciones de tenencia de los animales destinados para engorde.

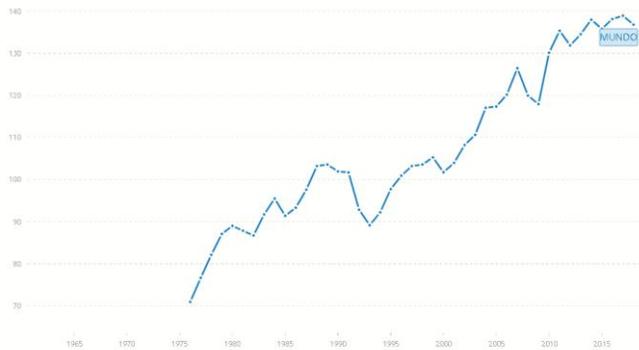
Por las anteriores razones la calidad de los nutrientes que componen los alimentos hechos a base de lombrices rojas californianas genera un especial interés ya que su contenido proteico es superior al de otras fuentes llegando hasta un 60% de proteínas de alta calidad para la alimentación de animales (Campoverde , Velasco, & Acurio, 2020) el uso de este tipo de alimento redundo en una mejor disponibilidad de nutrientes para los animales. Sin embargo la producción de lombrices requiere el desarrollo de mejores técnicas de producción debido a que a la fecha se tienen rangos de variables como la temperatura, la humedad, el pH el tipo de dieta, entre otras que hacen difícil la optimización de los recursos en los cultivos de lombrices.

Al igual que en el campo de la alimentación animal el cultivo de lombrices tiene una fuerte aplicación en el campo de los fertilizantes los cuales son fundamentales para la producción de alimentos de origen vegetal. Con el desarrollo de la actividad agrícola en

Colombia se inició un uso extensivo de fertilizantes químicos, en promedio en Colombia se usan 499.4kg de fertilizante por hectárea en comparación con América Latina en la cual el promedio es de 106.9kg por hectárea (Universidad Nacional de Colombia, 2013), es importante mencionar que el uso excesivo de fertilizantes químicos provoca agotamiento del suelo; este problema es generado por la falta de capacitación de los campesinos como también la tecnificación y estandarización de los procesos de abonado del suelo.

El fenómeno inicia con el agotamiento del suelo el cual se da por el desarrollo de cultivos exclusivos de un tipo de producto el cual reduce la biodisponibilidad de nutrientes de manera que la fertilidad del suelo se va reduciendo con el paso del tiempo, de manera que lo anterior conduce a un incremento en el uso de fertilizantes por parte de los cultivadores en la búsqueda de la recuperación de los nutrientes, sin embargo el incremento de fertilizantes genera mayores niveles de salinidad y desequilibrio de micro y macro nutrientes (Ricse & Pinche, 2020).

Figura 3. Uso de fertilizantes en kilogramos por hectárea cultivada (promedio mundial 1976 – 2018)



Fuente: (Banco Mundial, 2022)

Para los agricultores la pérdida de fertilidad del suelo es un problema de mucha gravedad ya que entre el 30% y el 40% de los costos de producción es generado por los fertilizantes, de los cuales solo se aprovecha un 40% mientras que el restante se pierde como contaminante (Red de desarrollo sostenible, 2014). Adicionalmente a la problemática del uso extensivo de los fertilizantes en el país se suma la poca disponibilidad de los mismos ya que en la medida en que la demanda crezca a nivel mundial (tal como lo indica la figura uso de fertilizantes en kilogramos por hectárea cultivada) los costos de producción de alimentos se incrementarán, en especial si se tiene en cuenta los posibles cambios económicos y sociales debidos al conflicto entre Rusia y Ucrania los cuales son grandes productores de fertilizantes a nivel mundial, tan solo en los últimos 6 meses se ha presentado un incremento global del precio de los fertilizantes que pone en riesgo la seguridad alimentaria de nuestro país debido al

incremento de los costos tanto de la producción nacional como de la producción de otros países con los cuales Colombia tiene vínculos comerciales (FAO, 2022).

La dependencia de fertilizantes provenientes de otros países pone en juego la producción de alimentos ya que las importaciones de fertilizantes obligan a los productores a manejar precios internacionales en los insumos agroindustriales sin mayor protección sobre el mercado, el campesino promedio no tiene una planeación financiera que le permita afrontar la volatilidad del mercado, la necesidad de generar una producción de insumos en forma doméstica es de alta importancia para el aseguramiento de los insumos y la estabilidad en los precios internos de los mismos, partiendo de lo anterior se puede inferir que la producción de compost es una opción que es muy necesaria para hacer frente a la problemática de los insumos agropecuarios, también se puede decir que el desarrollo de técnicas que permitan el mejoramiento de la producción de lombrices puede ser de gran ayuda para enfrentar la problemática agrícola.

Figura 4. Precio mundial de fertilizantes en dólares por tonelada corta

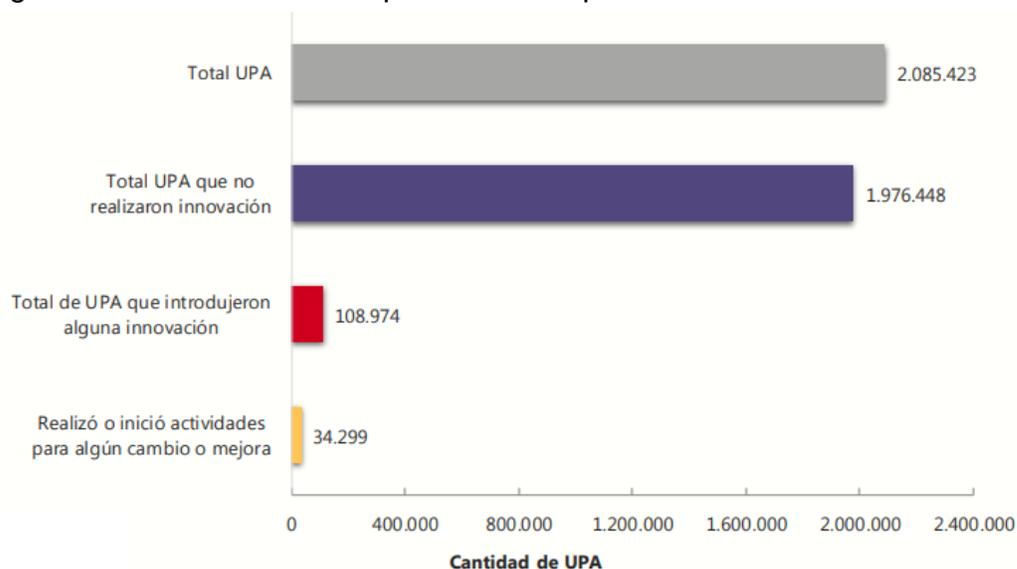


Como se ha ilustrado anteriormente hay múltiples problemas asociados a la producción de lombrices con el agro de forma directa o indirecta, de hecho en Colombia el desarrollo de la agricultura tiene muchas más problemáticas, que van desde las dificultades relacionadas con el transporte de los productos e insumos hasta carencias en tecnología para el desarrollo de insumos y el procesamiento de los productos agropecuarios, estos problemas generan un impacto elevado en el aseguramiento alimentario de la población colombiana más aún si tenemos en cuenta que al menos el 30% de la población no alcanza a tener 3 comidas al día y al menos el 1.2% no alcanza más de una comida al día (DANE, 2021), es por ello que los esfuerzos en mejorar los niveles productivos de los diferentes estamentos del sector primario de la economía dedicado a la producción agropecuaria son de alta importancia para la población nacional.

El desarrollo de las importaciones de alimentos en Colombia muestran un crecimiento del 16.5% en el sector de alimentos en comparativa del primer semestre del año 2020 respecto del mismo periodo del año 2021 (Analdex, 2021), con un valor para el primer semestre del 2021 de 3390.2 millones de dólares en comparación con las exportaciones de alimentos las cuales sumaron 234.5 millones de dólares para el mismo periodo (Analdex, 2021), en comparativa la balanza tiene un saldo negativo en donde las exportaciones no representan ni el 10% de las importaciones. La causa fundamental de la baja producción de alimentos está relacionada con la poca tecnificación de los procesos productivos en las unidades de producción agrícola (UPA), lo anterior deriva en la poca eficiencia y eficacia de los cultivos.

El mejoramiento de la tecnología en la producción alimentaria es fundamental para desarrollar dos de las cuatro dimensiones de la seguridad alimentaria, las cuales son la disponibilidad física de los alimentos y el acceso económico y físico a los alimentos (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011), sin embargo esta política no se ha aplicado de forma extensiva en Colombia, de acuerdo a los resultados obtenidos en la encuesta nacional agrícola desarrollada por el DANE en 2019 menos del 6% de las UPA realizaron actividades de innovación de las cuales alrededor del 2.8% de todas las UPA del país se enfocaron en mejorar sus procesos agrícolas (DANE, 2020).

Figura 5. Cantidad de UPA que realizaron procesos de innovación en el 2019



Fuente: (DANE, 2020)

La importancia en el desarrollo de técnicas de análisis de la producción de lombrices es sumamente relevante ya que como se ha mencionado los desarrollos que se puedan

hacer en este campo impactan todas las problemáticas mencionadas anteriormente mejorando desde distintos enfoques como lo son la alimentación animal, el desarrollo de compost de alta calidad, la gestión de residuos orgánicos que a su vez reduce la contaminación atmosférica y de los suelos. De esta manera se concluye que el mejoramiento de técnicas productivas de lombrices es una necesidad importante ya que puede tener un impacto altamente positivo en el aseguramiento de la alimentación de la población colombiana afectando de manera indirecta tanto la disponibilidad de los alimentos por incremento de la producción como la reducción de los costos de los insumos.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se determinan los objetivos de la investigación:

Objetivo general: Desarrollar un sistema de monitoreo y mejoramiento de las condiciones de reproducción de la lombriz roja californiana como estrategia para la diversificación de productos en base al anélido.

Objetivos específicos:

- Identificar a través de la revisión bibliográfica los niveles de los factores que afectan la reproducción de la lombriz roja californiana.
- Analizar el efecto de los factores y sus niveles en la reproducción de la lombriz roja californiana.
- Establecer un modelo que pueda usarse para la predicción del comportamiento de la reproducción de lombrices rojas californianas.
- Crear un sistema de monitoreo de la producción en lombricultivos con base en el modelo estimado.

Capítulo 1 – Fundamentación conceptual y teórica

Existen muchos estudios que permiten identificar los diferentes tipos de lombrices que se utilizan en la actividad de la lombricultura donde se evidencia que la especie más adecuada para este tipo de actividad es la lombriz roja californiana (Domínguez & Brandón, 2010) (Feijoo, Quintero, & Moreno, 2004) (Domínguez, Aira, & Brandón, 2009) (Fragoso, 2001). En diferentes partes del mundo se ha venido estudiando la lombriz roja californiana por ser una especie que tiene alta concentración de nutrientes y su reproducción es alta comparada con otros tipos de lombrices (Feijoo, Quintero, & Moreno, 2004) (Fragoso, 2001).

Muchos de los estudios que se analizaron muestran el comportamiento de la lombriz en diferentes temperaturas y niveles de humedad, pocos registran el comportamiento del pH y una gran variedad estudian la posibilidad de mejorar las condiciones de reproducción bajo diferentes tipos de alimentación (Murguía, Mamani, Tancara, Tintaya, Osorio, & Palero, 2010) (Toccalino, Roux, & Agüero, 2004) (Rodríguez, 2012) (Vázquez, Caratachea, Mondragón, & Sandoval, 2007). De igual manera se registran estudios relacionados con la reproducción de este tipo de lombriz en diferentes escenarios y controlando variables como la temperatura, humedad, pH y alimentación, como variables independientes, sin sus combinaciones (Toccalino, Agüero, Serebrinsky, & Roux, 2004) (Lolita Durán, 2009) (Paco, Murguía, Mamani, & Sainz, 2011).

Otra fuente de información del estudio tiene que ver con las investigaciones realizadas en torno a la importancia de la reproducción de la lombriz roja californiana para mejorar la calidad de productos a base del anélido (García, Espinosa, López, & López, 2013) (Yagüe, 2000) (Hleap, González, & F.Mora, 2012) (Dimas, y otros, 2008). El principal uso de la lombricultura ha sido por años la generación de abono orgánico (Domínguez & Brandón, 2010) y la harina de lombriz como alimento para animales (Domínguez, Aira, & Brandón, 2009), muy pocas empresas utilizan esta actividad para la fabricación de otros productos, debido a la gran cantidad de lombrices que se requieren para procesarlos.

La lombricultura es una actividad agropecuaria alternativa y es la lombriz roja californiana la más adecuada para la cría en cautiverio (Toccalino, Agüero, Serebrinsky, & Roux, 2004). Cualquier actividad que resulte de la crianza de lombrices, sea abono o alimentación animal, requiere que la reproducción de los animales se realice en las mejores condiciones para que se reproduzcan más rápido y en mayor cantidad.

Es a través de muchos estudios que se ha descubierto que hay variables que afectan la reproducción de la lombriz roja californiana, por ejemplo, la humedad, la temperatura y la alimentación (Lolita Durán, 2009). La mayoría de las investigaciones tienden a identificar el tipo de alimentación que aumenta su reproducción, muy pocos estudian el comportamiento de la temperatura y la humedad, y ninguno en la combinación de los tres factores.

La reproducción controlada de la lombriz roja californiana en la lombricultura es el principal objetivo porque de esto depende la calidad y cantidad de los productos que de esta actividad deriva. Hoy en día, el cultivo de lombriz roja californiana se realiza con mayor frecuencia en el mundo gracias a que han descubierto grandes beneficios para la agricultura, el suelo, la generación de productos, entre otras razones (Paco, Murguía, Mamani, & Sainz, 2011).

Por ejemplo, en Estados Unidos es una actividad que se realiza desde hace 50 años, en México también es una actividad de gran importancia (Fragoso, 2001), Argentina es otro de los países que centra su atención en este tipo de actividades. En Colombia, a pesar de tener gran diversidad de anélidos que se prestan para realizar diferentes actividades con la lombricultura (Feijoo, Quintero, & Moreno, 2004), se reportan muy pocas iniciativas.

Según los datos de la Asociación Colombiana de Compostadores (Asocompost), la producción de lombrices es muy importante para las actividades económicas relacionadas con la explotación del suelo por su contribución a la recuperación y la posibilidad de obtener mayores rendimientos con los cultivos en las fases de fertilización. *Asocompost* señala que en la actualidad Colombia hay un promedio de aplicación de abonos orgánicos que no supera los 300 kilos y que se debería pensar en por lo menos una tonelada cada año (LR, 2015); lo anterior, evidencia la necesidad de aumentar la producción de lombriz roja californiana para que también se aumente la producción de compost y humus o lombrinaza.

Dentro de la proyección de la asociación Asocompost, se encuentra buscar alternativas que aumente la producción de abonos orgánicos en el país actualmente, que está alrededor de las 800.000 toneladas por año; de esta cantidad 700.000 son compost y sólo 100.000 lombrinaza. Este último producto es el que refleja mejores ganancias por sus características de exportación para industrias como los cosméticos, pero que es más difícil de producir por necesitar mayor cantidad de lombrices.

La gran parte de los resultados de los lombricultivos en Colombia se centran en la extracción de humus y creación de abono orgánico, pero no se realiza gran explotación de esta actividad para la creación de otros productos que puedan tener mayor valor

comercial. Una de las principales limitaciones de la lombricultura tiene que ver con la reproducción de los anélidos y sus condiciones óptimas.

En el departamento de Norte de Santander, existen unas algunas unidades productivas asociadas que se dedican a la lombricultura y que presentan la necesidad de aumentar la producción para cubrir la demanda departamental y abrir mercados nacionales e internacionales. Partiendo de una evaluación de oportunidades de mejora de las fincas, surge la necesidad de identificar las condiciones óptimas para lograr que la lombriz roja californiana se reproduzca en mayor cantidad en el tiempo bajo las condiciones actuales de ciudad, lo que permitiría pensar en nuevos emprendimientos y ser más competitivos.

Actualmente, las camas de lombrices se encuentran con automatización de riego y medición de la temperatura, sin embargo, variables como la humedad y alimentación no ha sido tenidas en cuenta, siendo estas variables de estudio que se referencian en la literatura (Murguía, Mamani, Tancara, Tintaya, Osorio, & Palero, 2010) (Toccalino, Roux, & Agüero, 2004) (Toccalino, Roux, & Agüero, 2004). La alimentación de las lombrices se realiza sin ningún control, se suministran diferentes alimentos de residuos alimenticios mezclados en algunas veces con excremento de bovinos, sin registro de mediciones dietarios.

De igual forma, no se conocen los valores de dichas variables para que la tasa de mortalidad de las lombrices sea baja y se reproduzcan con mayor facilidad. Lo que se busca con este experimento es identificar si los niveles de temperatura, humedad y alimentación que se encuentran en la literatura permiten la reproducción de la lombriz roja californiana con mayor efectividad en el tiempo y así lograr maximizar la producción de este tipo de anélido.

Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

2.1.1. Unidad experimental, variable de respuesta y diagrama del experimento

La unidad experimental es la lombriz roja californiana y la variable de respuesta es el peso de las camas en kg. El diagrama genérico del experimento se puede ver en la figura 6.

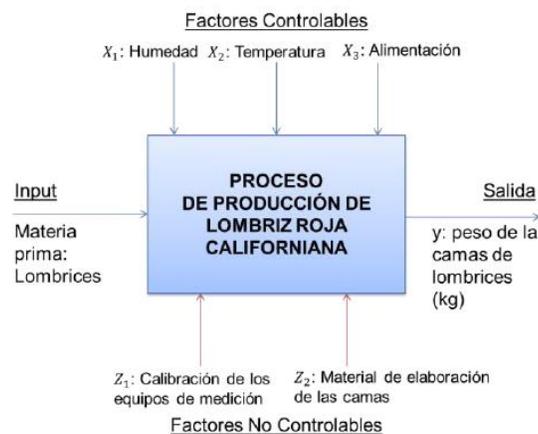


Figura 6. Esquema general del diseño del experimento de lombrices californianas

2.1.2. Principios básicos del experimento

El operador de las camas de lombrices de la asociación será el encargado de tomar los datos en los tiempos establecidos por el equipo de trabajo. Durante la recolección de datos se garantizará los principios básicos del diseño de experimentos de la siguiente manera:

- Aleatorización: Con la ayuda del software R se obtiene el orden en que se asigna la configuración de los niveles de los factores entre las 36 camas, el cual se realiza aleatoriamente, lo anterior garantizará la independencia de las observaciones.
- Replicación: Según los datos del enunciado del problema el factor X_1 tiene 3 niveles, así mismo los factores X_2 y X_3 , lo que arroja que el cálculo del total de observaciones se muestre en la ecuación 1, donde n es el número de réplicas el

cual es 4; en este experimento es posible encontrar un error experimental para cada muestra y las fuentes de variabilidad se encuentran en cada réplica tomada por combinación. De esta forma se garantiza la replicación como principio.

$$N = 3^3 * n = 27 * 4 = 108 \quad \text{eq. 1}$$

- Bloqueo: Para garantizar el principio de bloqueo se deben tener en cuenta aspectos como la especie de las lombrices debe ser la misma (roja californiana), mantener el mismo proveedor de las lombrices, conservar el mismo proveedor de alimento para cada tipo seleccionado, el agua que se suministra a las camas debe obtenerse del mismo lugar y garantizar que será el mismo proveedor de los equipos de medición instalados en cada cama.

2.1.3. Tipo de investigación:

Esta investigación es de alcance exploratorio con enfoque experimental porque no se altera el estado de la lombriz para obtener datos, se observan las variables como se generan para validar un modelo en tiempo real, se cuenta con el aval de una de las empresas de Lombricultivos en el departamento Norte de Santander, quien presta algunas camas para la medición de las variables. El alcance es descriptivo con uso de teorías cuantitativas para la modelación matemática del sistema; se pretende describir el estado óptimo de las variables observables para lograr maximizar la producción de la lombriz roja californiana.

2.2 Población o entidades participantes

Las entidades participantes del proyecto son:

- Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, con el investigador Luis Pérez
- Fundación de Estudios Superiores Comfanorte FESC, con el investigador Darwin Cardozo
- Corporación Universitaria Iberoamericana, con los investigadores Karla Sánchez y Julián Gutiérrez
- Empresario líder de lombricultivos, empresa Productos de la Hacienda, Alfonso Parra

2.3 Procedimiento e Instrumentos

2.3.1. Instrumento de recolección de información:

Para la recolección de los datos, se implementarán sensores de temperatura, humedad y basculas para el peso. Las mediciones las realizará un mismo operario diariamente y se consignaran en una ficha técnica diseñada por los autores.

2.3.2. Análisis de los datos

Para el análisis de los datos recolectados se pretende ejecutar la siguiente ruta (figura 7), que se alinea a los objetivos del proyecto y que permite obtener los resultados esperados:



Figura 7. Ruta de análisis de datos

2.4 Alcances y limitaciones

De acuerdo con la Resolución 008430 de 1993 – artículo 11 del Ministerio de Salud, contempla una clasificación de los riesgos de una investigación en: sin riesgo, riesgo mínimo y riesgo alto. Esta investigación se clasifica dentro de los proyectos sin riesgo, debido a que no se trabaja sobre el ser humano, tampoco se realiza ninguna intervención o modificación intencionada de las variables biológicas, fisiológicas, psicológicas o sociales de los individuos que participan en el estudio.

De acuerdo con el artículo 87, de esta misma resolución, se especifica que los animales que serán tenidos en cuenta para este proyecto no sufrirán alteraciones físicas ni se procederá a intervenirlos en su cuerpo para obtener información. Se realizará una observación en variables como la temperatura, que no son letales o causen episodios de angustia al animal.

Bajo el principio de 3R de Russel y Burch, esta investigación se acoge a las **alternativas de reducción** que aluden a cualquier estrategia que tenga como resultado el uso de un menor número de animales para obtener datos suficientes que respondan a la cuestión investigada, que este caso es la maximización de la reproducción, para así limitar o evitar potencialmente el uso posterior de otros animales, sin comprometer el bienestar animal. Teniendo en cuenta la ley 84 de 1989, este proyecto no causa daño a un animal ni contempla conductas consideradas como crueles para con las lombrices objeto de estudio, tampoco se practicarán acciones de sacrificio de animales puesto que solo se observa su comportamiento en su estado natural.

De igual forma, teniendo en cuenta la política de ética de investigación e integridad científica expuesta en la Resolución 0314 de 2018, garantizando las buenas prácticas y la divulgación de los resultados teniendo en cuenta los derechos de autor, siempre con un manejo ético de la información. Sin embargo, la investigación requiere el aval de un comité de ética de las instituciones vinculadas o en colaboración externa para la reflexión del trabajo con seres vivos y la finalidad del estudio como actores centrales del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación, para obtener el acta que sustente que el proyecto no atenta contra ningún ser vivo.

Capítulo 3 - Resultados

3.1. Análisis exploratorio

3.1.1. Identificación de los principales factores

En la revisión bibliográfica se encontró que los factores identificados por los lombricultores han sido estudiados por separado, muchos estudios se centran en tres de ellos: temperatura, humedad y la alimentación. El pH se encuentra como un factor importante pero no se encuentran estudios que los profundicen, de igual forma tampoco se evidenciaron estudios donde se analicen las interacciones de los factores.

En la tabla 1 se puede ver la revisión de algunos estudios y un resumen de los principales factores estudiados porque afectan de alguna manera la tasa de mortalidad de las lombrices o su reproducción.

Tabla 1. Identificación de factores que inciden en la reproducción o tasa de mortalidad de la lombriz roja californiana. H: Humedad, T: Temperatura y A: Tipo de alimentación.

Autores	Título del Artículo	Factor Estudiado			
		H	T	pH	A
Toccalino, Agüero, Serebrinsky, & Roux	Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>) según estación del año y tipo de alimentación.	X	X		X
Lolita Durán	Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (<i>Eisenia foetida</i>) en cinco sustratos orgánicos.	X	X		X
Domínguez & Brandón	Ciclos de vida de las lombrices de tierra aptas para el vermicompostaje.	X	X		
Feijoo, Quintero, & Moreno	Patrón de distribución y listado de especies de las lombrices de tierra (annelida, oligochaeta) en Colombia.			X	
Domínguez, Aira, & Brandón	El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes.				X

Autores	Título del Artículo	Factor Estudiado			
		H	T	pH	A
Fragoso	Las lombrices de tierra de México (Annelida, Oligochaeta): diversidad, ecología y manejo.				X
Paco, Murguía, Mamani, & Sainz	Efecto de la Lombriz Roja Californiana (<i>Eisenia foetida</i>) durante el composteo y vermicomposteo en predios de la estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa.	X	X	X	
Murguía, Mamani, Tancara, Tintaya, Osorio, & Palero	Comportamiento de lombriz roja californiana y lombriz silvestre en bosta bovina y rumia bovina como sustrato.	X	X	X	X
Toccalino, Roux, & Agüero	Comportamiento reproductivo de <i>Eisenia foetida</i> (Lombriz roja de California) durante las cuatro estaciones del año y alimentadas con distintos compostajes.	X	X	X	X
Rodríguez	Producción y Calidad de Abono Orgánico por Medio de la Lombriz Roja Californiana (<i>Eisenia Foetida</i>) y su Capacidad Reproductiva.	X	X	X	X
Vázquez, Caratachea, Mondragón, & Sandoval	Dinámica poblacional de la lombriz <i>Eisenia foetida</i> en estiércol composteado y fresco de bovino y Ovino.	X	X	X	X
García, Espinosa, López, & López	Elaboración de abono orgánico a base de lombriz roja californiana.				X
Dimas, y otros	Producción de tomate en invernadero con humus de lombriz como sustrato	X			

3.1.2. Identificación de niveles de los factores

Teniendo en cuenta que la revisión de la literatura permitió identificar los factores que influyen en la tasa de mortalidad y el proceso de reproducción de la lombriz roja californiana, también permite estimar algunos valores de los niveles de cada factor. En la tabla 2 se muestra por cada artículo revisado los valores de trabajo de cada factor (humedad y temperatura).

Tabla 2. Identificación de niveles trabajados en diferentes estudios para cada factor. H: Humedad y T: Temperatura

Autores	Título del Artículo	Factor Estudiado		
		H	T	pH
Toccalino, Agüero, Serebrinsky, & Roux	Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>) según estación del año y tipo de alimentación.	80%	19°C	No registra
Lolita Durán	Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (<i>Eisenia foetida</i>) en cinco sustratos orgánicos.	70 – 80%	15 – 25 °C	No registra
Domínguez & Brandón	Ciclos de vida de las lombrices de tierra aptas para el vermicompostaje.	80 -85%	25°C	No registra
Feijoo, Quintero, & Moreno	Patrón de distribución y listado de especies de las lombrices de tierra (annelida, oligochaeta) en Colombia.	No registra	No registra	4.4 - 7.2
Domínguez, Aira, & Brandón	El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes.	No registra	No registra	No registra
Fragoso	Las lombrices de tierra de México (Annelida, Oligochaeta): diversidad, ecología y manejo.	No registra	No registra	No registra
Paco, Murguía, Mamani, & Sainz	Efecto de la Lombriz Roja Californiana (<i>Eisenia foetida</i>) durante el composteo y vermicomposteo en predios de la estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa.	77 - 89%	17 – 22 °C	7.17-8.2
Murguía, Mamani, Tancara, Tintaya, Osorio, & Palero	Comportamiento de lombriz roja californiana y lombriz silvestre en bosta bovina y rumia bovina como sustrato.	75%	17 – 22 °C	7 – 7.58
Toccalino, Roux, & Agüero	Comportamiento reproductivo de <i>Eisenia foetida</i> (Lombriz roja de California) durante las cuatro estaciones del año y alimentadas con distintos compostajes.	80%	18.1 – 20.4 °C	6.31 – 6.88
Rodríguez	Producción y Calidad de Abono Orgánico por Medio de la Lombriz Roja Californiana (<i>Eisenia Foetida</i>) y su Capacidad Reproductiva.	80%	10 – 25 °C	7.09 a 8.17
Vázquez, Caratachea, Mondragón, & Sandoval	Dinámica poblacional de la lombriz <i>Eisenia foetida</i> en estiércol composteado y fresco de bovino y Ovino.	80%	24 a 26 °C	El pH no afecta
García, Espinosa,	Elaboración de abono orgánico a base de	No	No	No

<i>Autores</i>	<i>Título del Artículo</i>	<i>Factor Estudiado</i>		
		<i>H</i>	<i>T</i>	<i>pH</i>
López, & López	lombriz roja californiana	registra	registra	registra

El factor de la alimentación en cada uno de los artículos varía, cada experimento utilizó dietas diferentes y concluían si eran satisfactorias o no. La tabla 3 muestra las diferentes opciones de alimentación encontradas.

Tabla 3. Alimentación de la lombriz roja californiana según la revisión bibliográfica

<i>Autores</i>	<i>Título del artículo</i>	<i>Alimentación de la lombriz</i>
Toccalino, Agüero, Serebrinsky, & Roux	Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>) según estación del año y tipo de alimentación	La reproducción de lombrices en lechos tratados con compostaje proveniente de estiércol bovino produjo los más altos valores de crías (expresados en número de crías a los 14 y 21 días y por el total de crías por ooteca).
Lolita Durán	Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (<i>Eisenia foetida</i>) en cinco sustratos orgánicos	Se encontró que los tratamientos con menor peso promedio fueron los que produjeron una mayor cantidad de cápsulas (estiércol, ornamental y broza).
Domínguez & Brandón	Ciclos de vida de las lombrices de tierra aptas para el vermicompostaje	Lo más mencionado es hojarasca, heces y materia orgánica en descomposición (no analiza cuál es la mejor).
Feijoo, Quintero, & Moreno	Patrón de distribución y listado de especies de las lombrices de tierra (annelida, oligochaeta) en Colombia	No se registra por ser un estudio de las especies en diferentes regiones.
Domínguez, Aira, & Brandón	El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes.	Algunos se alimentan fundamentalmente de microbios (microbívoros), otros de materia orgánica en descomposición (detritívoros), otros de una mezcla de materia orgánica y microbios (microbi-detritívoros), sin embargo no se realiza una comparación de alimentación.
Murguía, Mamani, Tancara, Tintaya, Osorio, & Palero	Comportamiento de lombriz roja californiana y lombriz silvestre en bosta bovina y rumia bovina como sustrato	Se muestra la relación del peso de la población de lombrices en bosta bovina se observa que su peso va disminuyendo paulatinamente a medida que aumenta la densidad, esto indica que el alimento es una condicionante para que el peso del individuo se vea afectado.

<i>Autores</i>	<i>Título del artículo</i>	<i>Alimentación de la lombriz</i>
Toccalino, Roux, & Agüero	Comportamiento reproductivo de <i>Eisenia foetida</i> (Lombriz roja de California) durante las cuatro estaciones del año y alimentadas con distintos compostajes.	La producción en cautiverio de lombrices alimentadas con estiércol bovino origina ooteca más prolífica ya que las mismas originan mayor número de crías por ooteca.
Rodríguez	Producción y Calidad de Abono Orgánico por Medio de la Lombriz Roja Californiana (<i>Eisenia Foetida</i>) y su Capacidad Reproductiva	Se detectó que la vacaza es el mejor para la reproducción de lombrices con un promedio de 17,471 por m ³ y una relación de 50:1. Se recomienda utilizar la vacaza y pulpa de café para la reproducción de la lombriz así como también para obtención rápida de bioabono.
Vázquez, Caratachea, Mondragón, & Sandoval	Dinámica poblacional de la lombriz <i>Eisenia foetida</i> en estiércol compostado y fresco de bovino y Ovino	En el estiércol compostado de bovino fue en donde se presentaron mayor número de cocones (201.75±94.46), lombrices jóvenes (3.25±2.50) y la viabilidad de lombrices adultos (45.25±15.19), en comparación con el estiércol compostado de ovino que presentó menor número de cocones (89.0±11.74), no presentó ninguna lombriz joven, sin embargo, tuvo mayor viabilidad de lombrices adultos (81.75±16.47). Los resultados indicaron que los estiércoles compostados son los mejores en cuanto a la dinámica poblacional de las lombrices, en comparación con los estiércoles frescos.

En resumen, la tabla 4 define los niveles a evaluar en el experimento teniendo en cuenta los resultados presentados en cada estudio de la revisión bibliográfica, la experiencia del animalista de la asociación de lombricultores y la repetición de estos valores.

Tabla 4. Niveles escogidos para cada factor y su convención.

<i>Convención</i>	<i>Humedad</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Alimento</i>
Bajo; 0	70%	15°C	Compostaje proveniente de estiércol bovino
Medio; 1	80%	20°C	Vacaza y pulpa de café
Alto; 2	89%	25°C	Estiércol compostado de ovino

3.1.3. Análisis por factores

El análisis a continuación será ejecutado teniendo en cuenta los factores que se usaron para el diseño del experimento. Los factores son:

Humedad: este factor contiene 3 niveles los cuales son 70, 80 y 89

Temperatura: este factor contiene 3 niveles los cuales son 15, 20 y 25

Dieta: este es un factor de tipo categórico el cual tiene 3 niveles Café, Ovino y Bovino

Promedios

Promedios Réplica 1				
Humedad	Temperatura	Dieta		
		Café	Ovino	Bovino
70	15	4920.1		
70	20	4911.1		
70	25			5078.2
80	15	5296.0		
80	20			5475.3
80	25		5342.0	
89	15			5110.1
89	20		5283.0	
89	25	4903.1		
Promedios Réplica 2				
Humedad	Temperatura	Dieta		
		Café	Ovino	Bovino
70	15	4993.1		
70	20	5024.0		
70	25			6099.4
80	15	5925.0		
80	20			6234.5
80	25		6136.4	
89	15			5416.3
89	20		5403.1	
89	25	5910.1		
Promedios Globales				
Humedad	Temperatura	Dieta		
		Café	Ovino	Bovino
70	15	4956.6		
70	20	4967.5		
70	25			5588.8
80	15	5610.5		
80	20			5854.9
80	25		5739.2	
89	15			5263.2
89	20		5343.1	
89	25	5406.6		

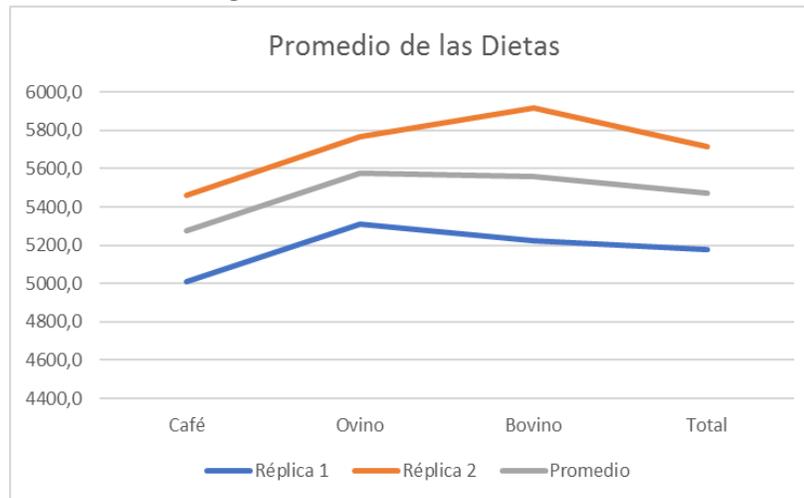
Para iniciar se realiza la graficación de los promedios y se establece la sumatoria de las diferencias de la media de los tratamientos con la media global.

Factor Dieta

Sea i el elemento de iteración entre los niveles del factor “dieta” entonces tenemos que la diferencia de los promedios de los tratamientos agrupados que incluyen cada tipo de dieta es:

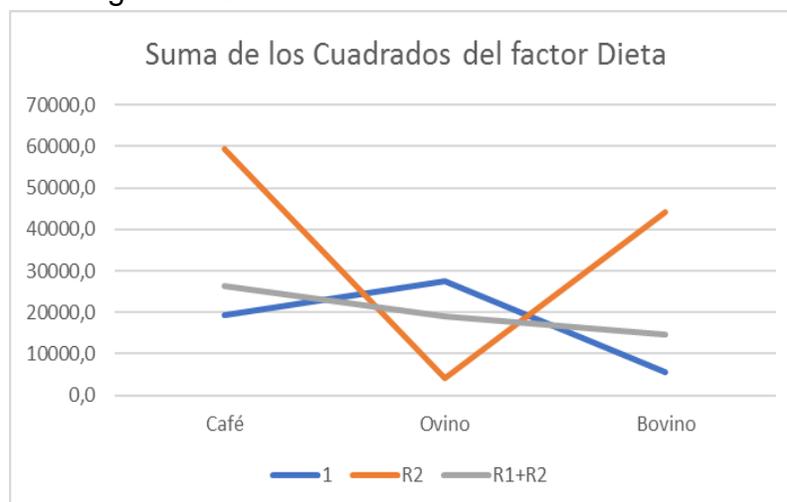
$$\alpha = \bar{Y}_{i...} - \bar{Y}_{...}$$

Figura 8. Análisis de las dietas



Promedios				
	Café	Ovino	Bovino	Total
Réplica 1	5007.6	5312.5	5221.2	5180.4
Réplica 2	5463.0458	5769.75	5916.7333	5716.5
Promedio	5275.9	5576.2	5559.0	5470.4

Figura 9. Suma de los cuadrados del factor dieta



Cuadrado diferencia con la media global				
	Café	Ovino	Bovino	SCDieta
1	19312.7	27551.4	5570.5	629215.7
R2	59276.2	3998.9	44192.7	1289613.3

R1+R2	26194.1	19162.2	14718.2	1501861.6
-------	---------	---------	---------	-----------

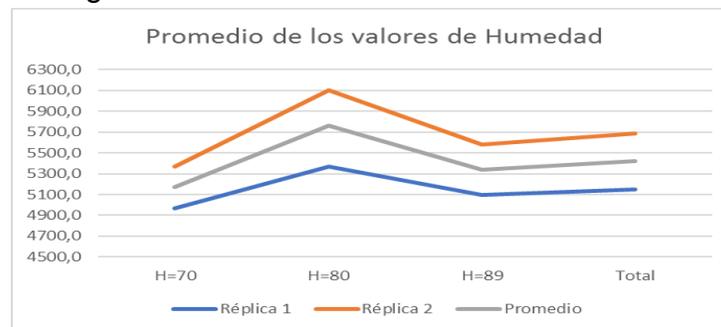
Al realizar un análisis de los promedios y de la suma de la diferencia de cuadrados con la media se observa que la réplicas tienen niveles diferentes de resultados en su relación con la variable peso, siendo las dietas “ovino” y “bovino” las que presentan un promedio mayor, observando, la suma de cuadrados de la diferencia con la media global de los datos permite identificar efectos importantes, esto es visible en el resultado del efecto de los promedios de la dieta al compararla con el promedio global.

Factor Humedad

Sea j el elemento de iteración entre los niveles del factor “humedad” entonces tenemos que la diferencia de los promedios de los tratamientos agrupados que incluyen cada tipo de humedad es:

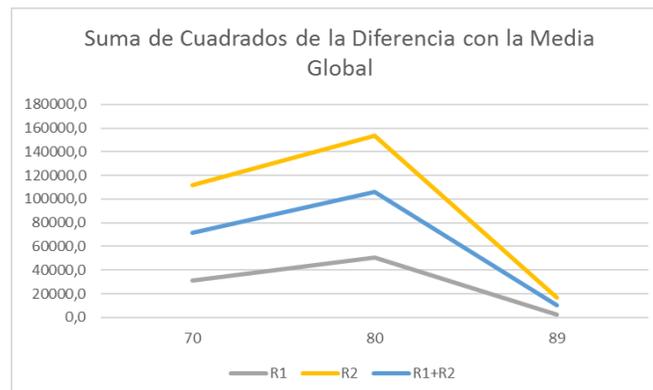
$$\beta = \bar{Y}_{.j.} - \bar{Y}_{....}$$

Figura 10. Promedio de valores de humedad



Promedios				
	H=70	H=80	H=89	Total
Réplica 1	4969.8	5371.1	5098.7333	5146.5
Réplica 2	5372.1417	6098.6528	5576.5	5682.4
Promedio	5171.0	5763.8	5337.6	5424.1

Figura 11. Suma de cuadrados de la diferencia con la media global



Cuadrado diferencia con la media global				
	70	80	89	SCHumedad
R1	31242.5	50427.7	2285.4	1007467.1
R2	111804.1	153773.7	16903.3	3389773.8
R1+R2	71162.4	106346.4	10021.7	4688264.6

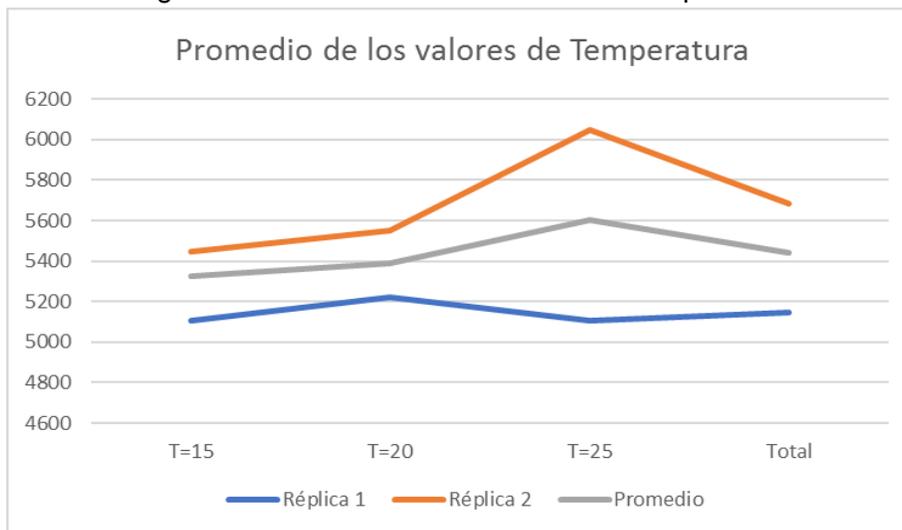
En el caso de los niveles de la humedad se percibe una variación de los promedios de cada tratamiento con respecto a la media global de los datos el cual se confirma con la suma de la diferencia de cuadrados con la media de los datos, este primer dato hace referencia a la importancia de la humedad como factor del experimento en el cual afecta el resultado, en este caso los promedios más grandes se obtuvieron con la humedad en 80%, este efecto se comprueba con la suma de la diferencia de cuadrados con la media la cual tiene valores que se diferencian del cero.

Factor Temperatura

Sea j el elemento de iteración entre los niveles del factor “Temperatura” entonces tenemos que la diferencia de los promedios de los tratamientos agrupados que incluyen cada tipo de humedad es:

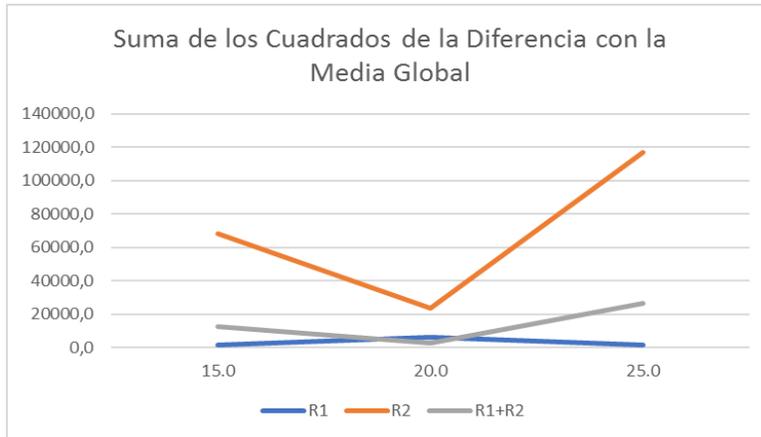
$$\gamma = \bar{Y}_{..k} - \bar{Y}_{....}$$

Figura 12. Promedio de los valores de temperatura



Promedios				
	T=15	T=20	T=25	Total
Réplica 1	5108.7167	5223.1167	5107.7833	5146.5
Réplica 2	5444.8111	5553.875	6048.6083	5682.4
Promedio	5326.6	5388.5	5600.5	5438.6

Figura 13. Suma de los cuadrados de la diferencia con la media global



Cuadrado diferencia con la media global				
	15.0	20.0	25.0	SCTemperatura
R1	1430.5	5864.2	1502.0	105560.0
R2	68487.8	23298.3	117029.3	2505785.1
R1+R2	12342.0	2423.5	26503.4	1031723.8

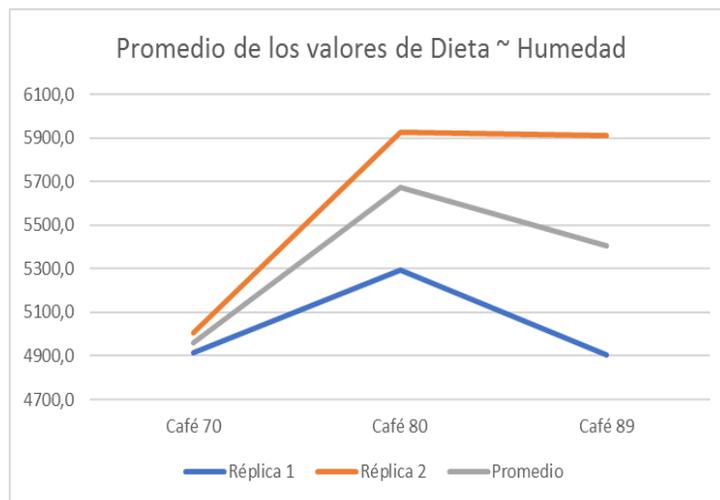
Interacción entre los factores

Interacción Dieta ~ Humedad

Se define como el componente de interacción entre la “dieta” i y la “humedad” j

Factor Dieta “ovino” - humedad

Figura 14. Promedio de los valores de dieta vs humedad



Promedios				
	Café 70	Café 80	Café 89	Promedio
Réplica 1	4915.6	5296.0	4903.1	5038.2
Réplica 2	5008.5	5925.0	5910.1	5614.5
Promedio	4962.1	5673.4	5406.6	5347.4

Figura 15. Promedio de los valores de dieta (café) vs humedad

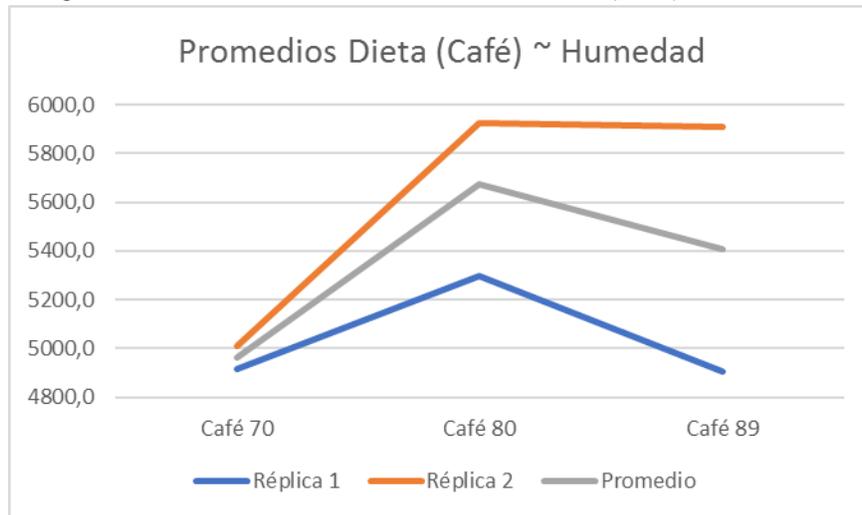
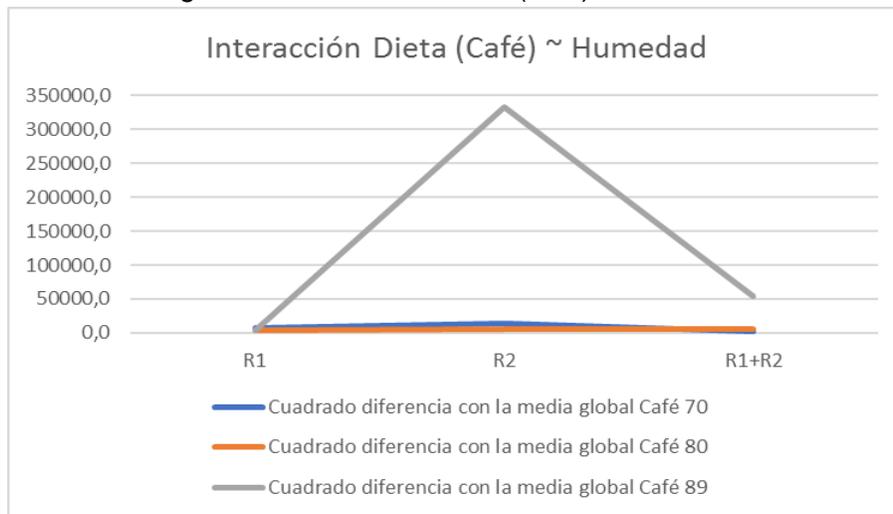


Figura 16. Interacción dieta (café) vs humedad

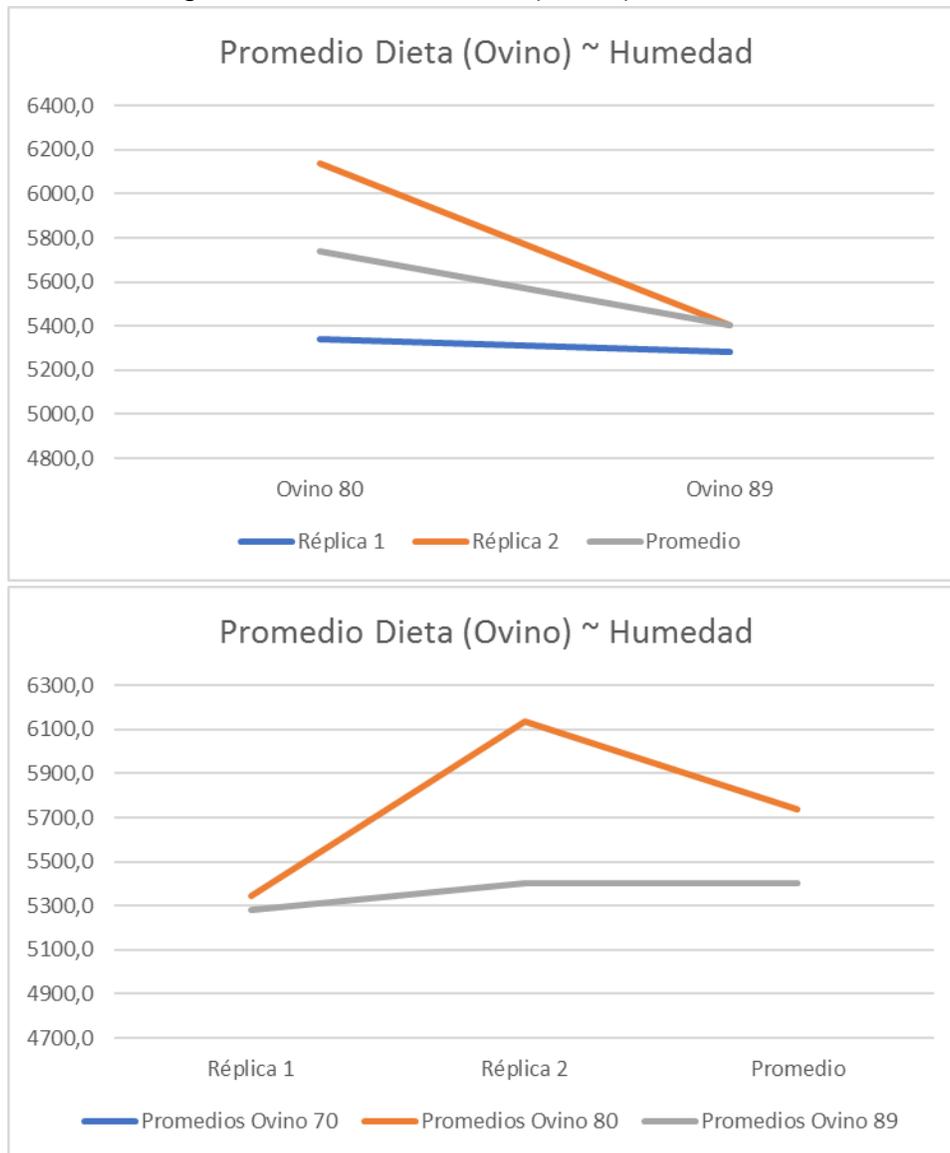


Cuadrado diferencia con la media global				
	Café 70	Café 80	Café 89	SCDieta~Humedad
R1	7184.6	4079.4	3207.9	86625.6
R2	14432.9	4878.7	332977.5	1466888.1
R1+R2	2214.7	5102.6	53282.1	502512.9

En las gráficas anteriores se observa que la dieta “Café” y la humedad interactúan de forma que la combinación entre el café y la humedad en 80% tienen valores superiores, sin embargo, el resultado no es concluyente ya que la diferencia de cuadrados con el promedio global tiene valores cercanos a cero, lo que indica poca diferenciación.

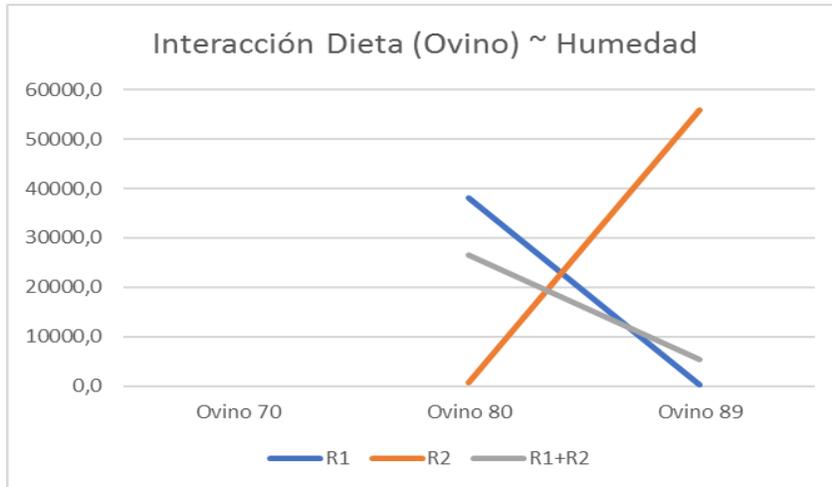
Factor Dieta “ovino” – humedad

Figura 17. Promedio dieta (Ovino) vs humedad



Promedios				
	Ovino 70	Ovino 80	Ovino 89	Promedio
Réplica 1	0.0	5342.0	5283.0	3541.7
Réplica 2	0.0	6136.4	5403.1	3846.5
Promedio	0.0	5739.2	5403.1	3714.1

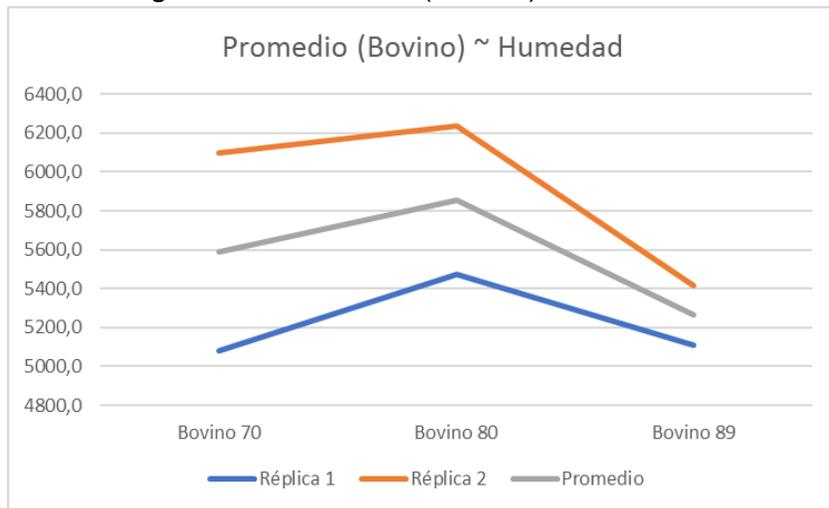
Figura 18. Interacción dieta (Ovino) vs humedad



Cuadrado diferencia con la media global				
	Ovino 70	Ovino 80	Ovino 89	SCDieta~Humedad
R1		38048.8	335.1	153535.7
R2		649.7	55997.2	226587.6
R1+R2		26584.8	5320.9	255245.3

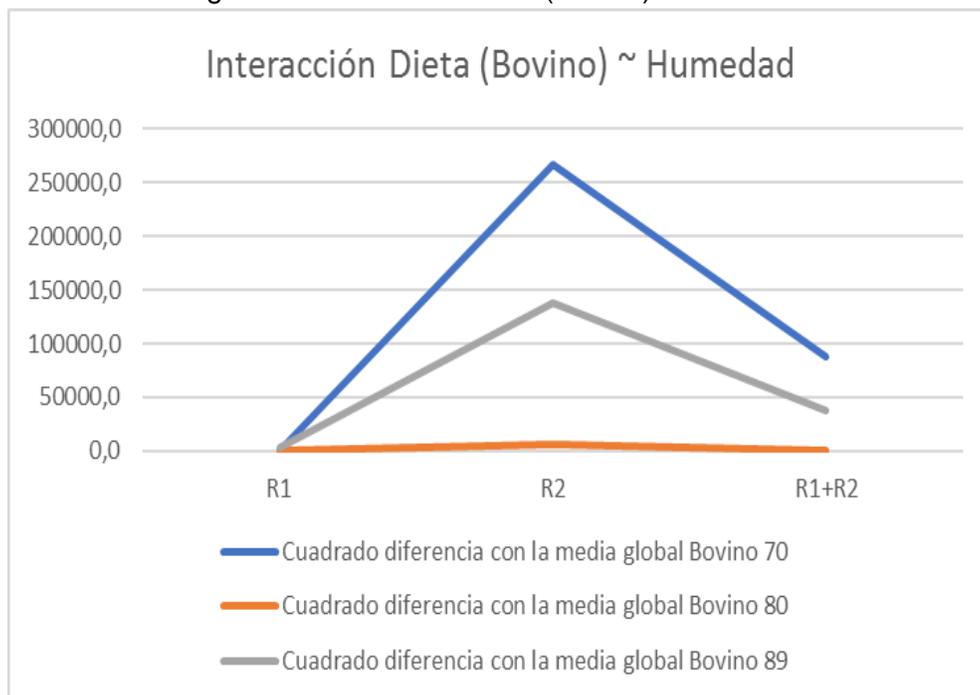
Revisando las gráficas anteriores es posible identificar diferencias entre los promedios de los valores en el tratamiento aplicado especialmente para la combinación de Ovino y humedad 80, lo cual se confirma con la suma de los cuadrados de las diferencias con la media global la cual se diferencia ampliamente del cero lo que implicaría que los tratamientos con dieta ovino y las distintas humedades si tienen efecto sobre la variable de interés.

Figura 19. Promedio (Bovino) vs humedad



Promedios				
	Bovino 70	Bovino 80	Bovino 89	Promedio
Réplica 1	5078.2	5475.3	5110.1	5221.2
Réplica 2	6099.4	6234.5	5416.3	5916.7
Promedio	5588.8	5854.9	5263.2	5569.0

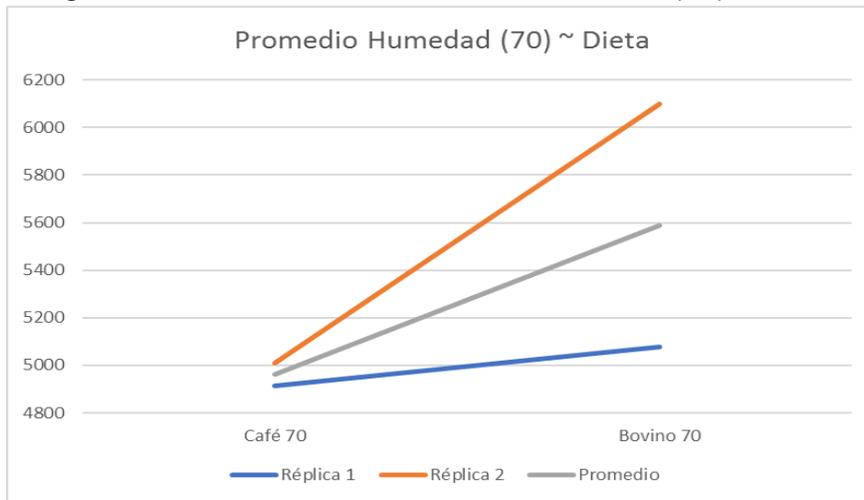
Figura 20. Interacción dieta (Bovino) vs humedad



Cuadrado diferencia con la media global				
	Bovino 70	Bovino 80	Bovino 89	SCDieta~Humedad
R1	1141.1	872.5	4009.4	24092.1
R2	267276.4	5527.7	137192.8	1639987.6
R1+R2	87908.7	915.2	38317.1	508564.1

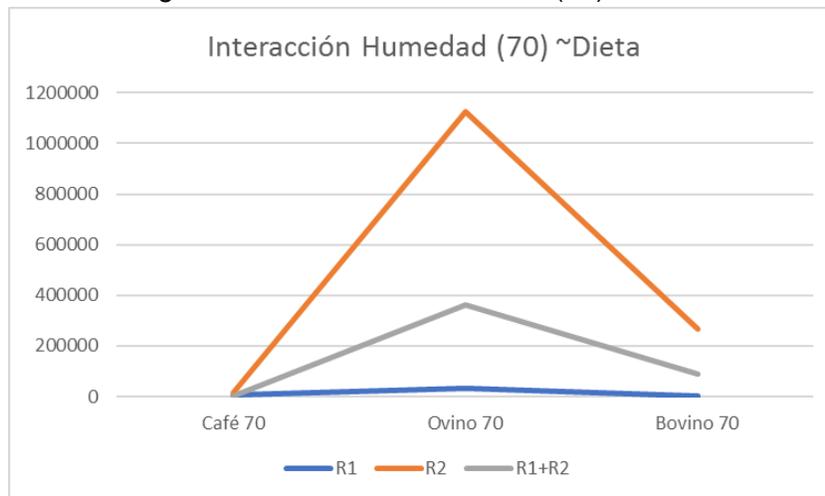
Al igual que en el tratamiento de ovino con humedad 80, en la dieta de bovino con humedad 80 se encuentran valores promedio superiores en comparación con las combinaciones bovino-humedad 70 y bovino-humedad 89, respecto a la suma de la diferencia de cuadrados se puede observar que hay una gran diferenciación entre el cero y los tratamientos lo cual implicaría que los resultados obtenidos por la combinación tienen un efecto relevante en la variable de salida.

Figura 21. Promedio de niveles de humedad (70) vs dieta



Promedio				
	Café 70	Ovino 70	Bovino 70	Promedio
Réplica 1	4915.575		5078.2	4996.8875
Réplica 2	5008.5375		6099.35	5553.9438
Promedio	4962.0563		5588.775	5275.4156

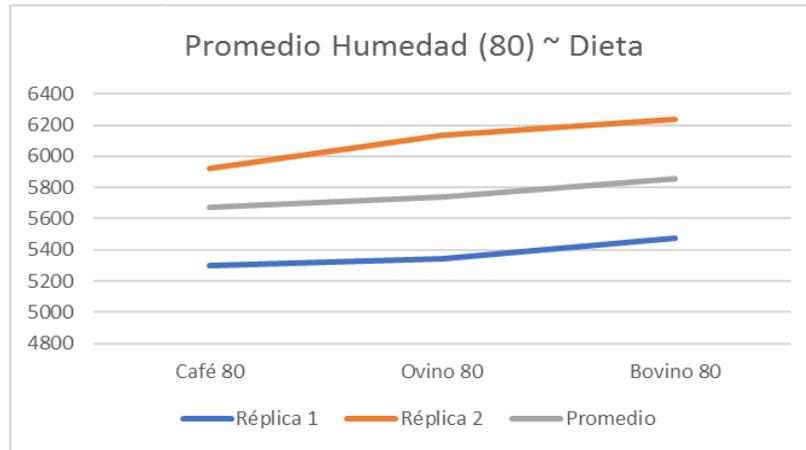
Figura 22. Interacción humedad (70) vs dieta



Cuadrado diferencia con la media global			
	Café 70	Ovino 70	Bovino 70
R1	7184.5637	33302.8	1141.1259
R2	14432.942	1126837.4	267276.41
R1+R2	2214.6745	360493.7	87908.741

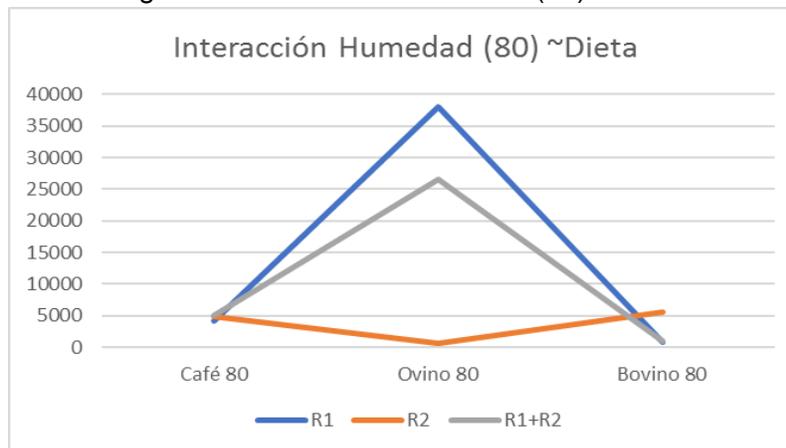
Realizando una comparación entre la humedad y la dieta manteniendo la humedad constante se observa que la dieta Bovino tiene un valor superior en los resultados de las dos réplicas, revisando los datos de las sumas de los cuadrados de la diferencia se puede observar una diferenciación de los mismos con el cero relevante en todos los tratamientos.

Figura 23. Promedio humedad (80) vs dieta



Promedios				
	Café 80	Ovino 80	Bovino 80	Promedio
Réplica 1	5296	5342.025	5475.275	5371.1
Réplica 2	5925.0333	6136.4	6234.525	6098.652778
Promedio	5673.42	5739.2125	5854.9	5755.844167

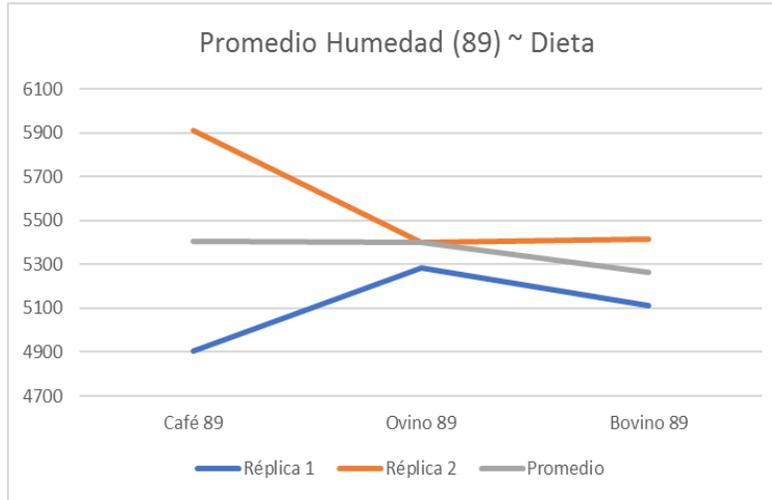
Figura 24. Interacción humedad (80) vs dieta



Cuadrado diferencia con la media global	Café 80	Ovino 80	Bovino 80
R1	4079.3946	38048.837	872.54596
R2	4878.6792	649.73792	5527.6683
R1+R2	5102.6147	26584.794	915.16838

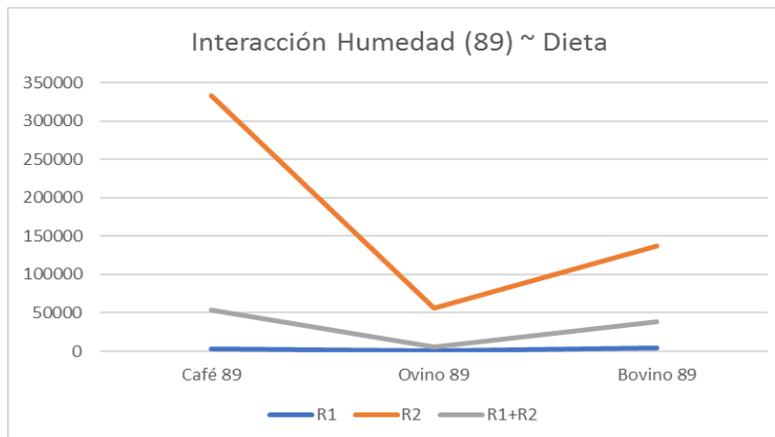
En la revisión de los promedios de los tratamientos de humedad 80% en combinación con las diferentes dietas no se observan diferencias relevantes entre las dietas sin embargo si se tiene una diferenciación importante en la suma de los cuadrados de las diferencias con la media respecto a la media global si existe una diferenciación en la combinación humedad 80% dieta ovino

Figura 25. Promedio humedad (89) vs dieta



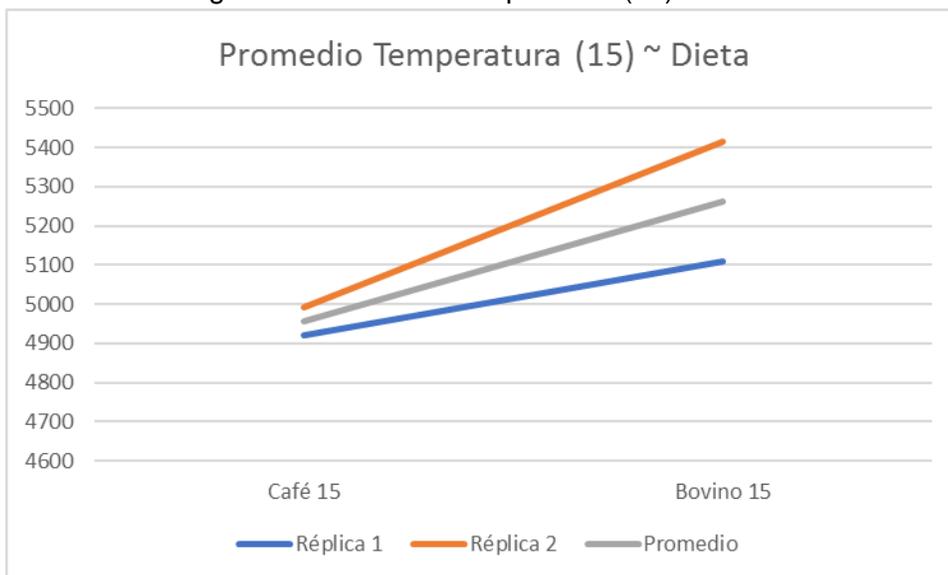
	Café 89	Ovino 89	Bovino 89	Promedio
Réplica 1	4903.125	5283.025	5110.05	5098.733333
Réplica 2	5910.075	5403.1	5416.325	5576.5
Promedio	5406.6	5403.1	5263.1875	5357.629167

Figura 26. Interacción humedad (89) vs dieta



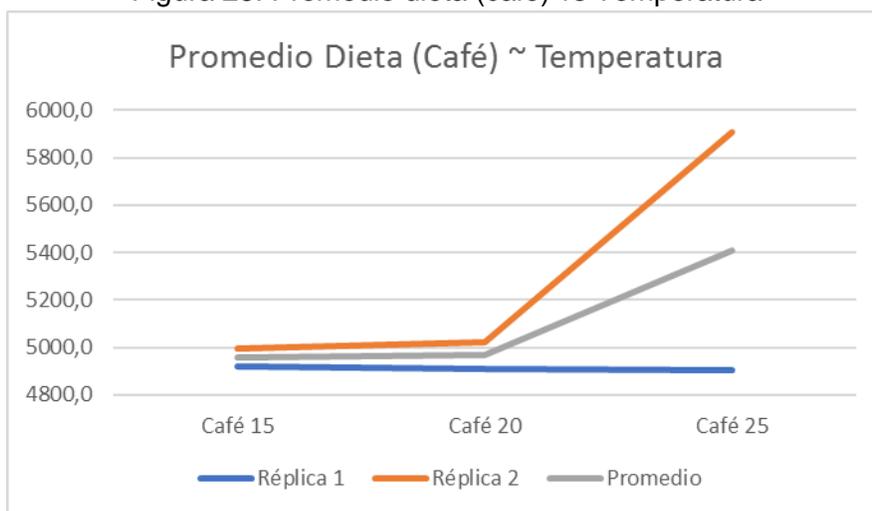
Cuadrado diferencia con la media global				
	Café 89	Ovino 89	Bovino 89	
R1	3207.8851	335.09336	4009.352	
R2	332977.45	55997.155	137192.84	
R1+R2	53282.145	5320.8672	38317.116	

Figura 27. Promedio temperatura (15) vs dieta



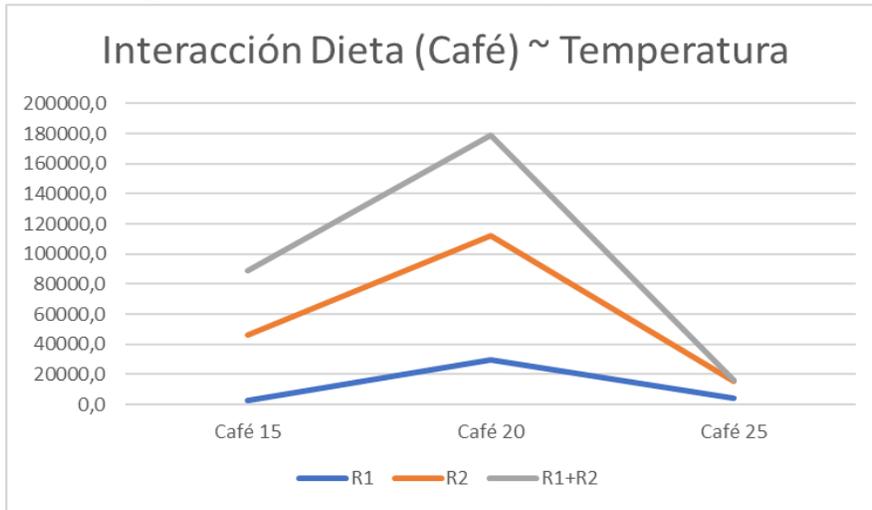
Promedio			
	Café 15	Bovino 15	Promedio
Réplica 1	4920.1	5110.05	5015.075
Réplica 2	4993.075	5416.325	5204.7
Promedio	4956.5875	5263.1875	5109.8875

Figura 28. Promedio dieta (café) vs Temperatura



Promedios				
	Café 15	Café 20	Café 25	Promedio
Réplica 1	4920.1	4911.1	4903.1	4911.4
Réplica 2	4993.1	5024.0	5910.1	5309.1
Promedio	4956.6	4967.5	5406.6	5110.2

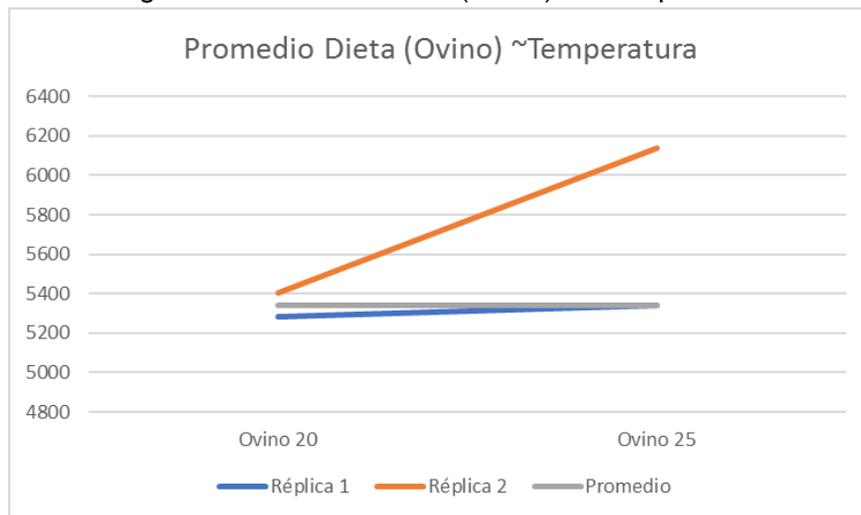
Figura 29. Interacción dieta (café) vs Temperatura



Cuadrado diferencia con la media global				
	Café 15	Café 20	Café 25	SCDieta~Temperatura
R1	2464.8	29962.4	4314.9	156827.6
R2	43376.0	82029.5	11011.1	719170.7
R1+R2	43346.1	67145.7	1029.0	1238936.0

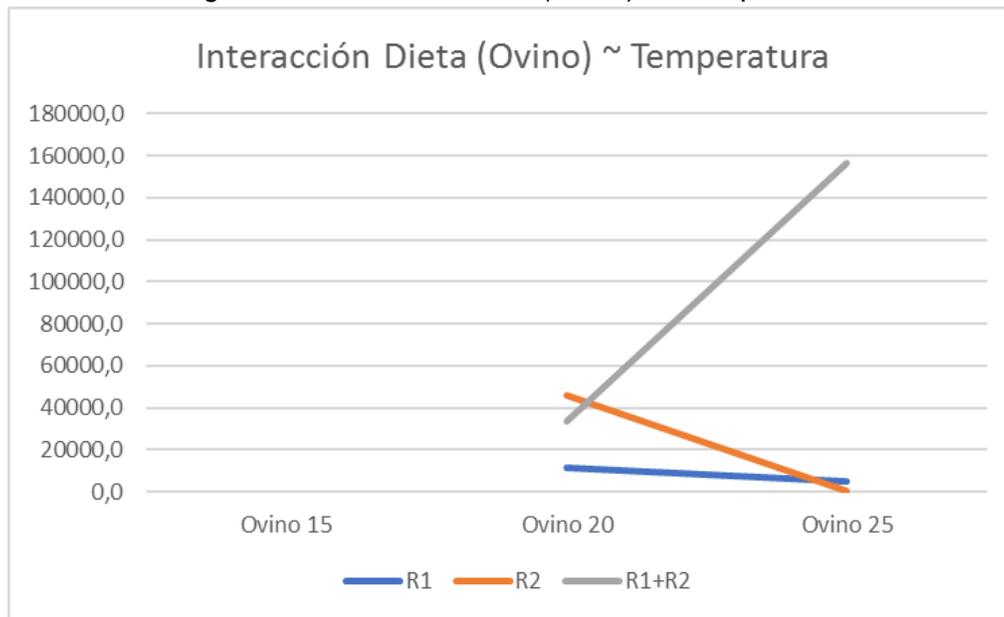
Al observar las gráficas el lector podrá identificar fácilmente las diferencias entre los tratamientos la combinación entre la temperatura (20) y la dieta (café) tiene una suma total de la diferencia de cuadrados con respecto a la media mayor en comparación con los otros tratamientos con diferente temperatura.

Figura 30. Promedio dieta (Ovino) vs Temperatura



Promedios				
	Ovino 15	Ovino 20	Ovino 25	Promedio
Réplica 1	0	5283.025	5342.025	5312.525
Réplica 2	0	5403.1	6136.4	5769.75
Promedio	0	5343.0625	5343.0625	5343.0625

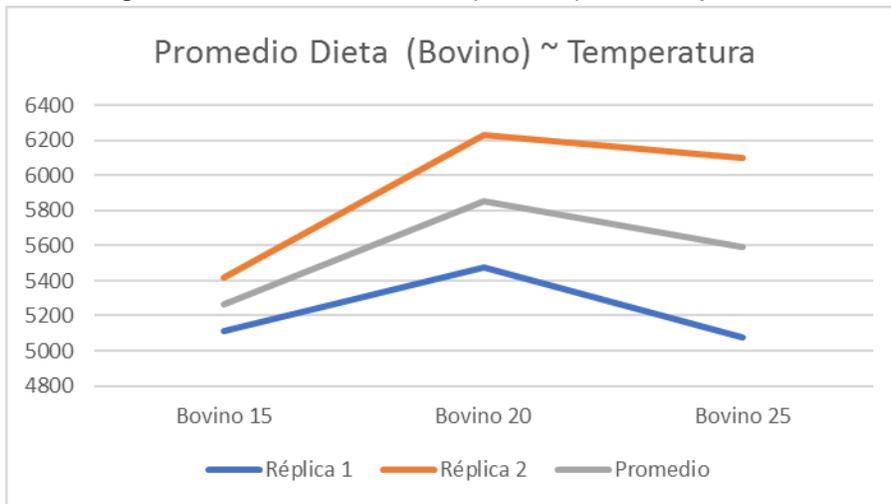
Figura 31. Interacción dieta (Ovino) vs Temperatura



Cuadrado diferencia con la media global				
	Ovino 15	Ovino 20	Ovino 25	SCDieta~Temperatura
R1		11252.5	4658.8	63645.3
R2		45801.2	602.9	185616.5
R1+R2		33804.8	156728.2	1524264.3

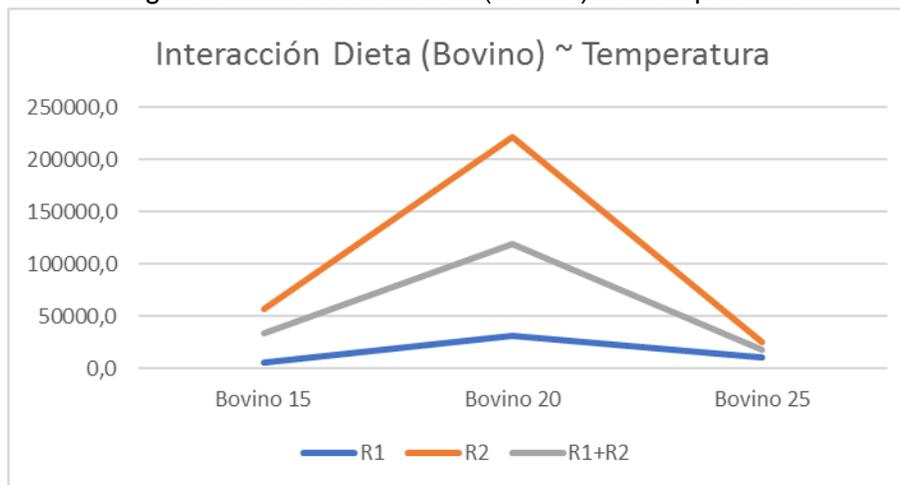
En la revisión de las gráficas los promedios entre la dieta ovino y la temperatura 25 presenta mayor valor promedio, sin embargo al revisar la suma de los cuadrados de las diferencias de las medias muestra como más relevante los tratamientos realizados con la dieta café y la temperatura 20°C

Figura 32. Promedio dieta (Bovino) vs Temperatura



Promedios				
	Bovino 15	Bovino 20	Bovino 25	Promedio
Réplica 1	5110.05	5475.275	5078.2	5221.175
Réplica 2	5416.325	6234.525	6099.35	5916.733333
Promedio	5263.1875	5854.9	5588.775	5568.954167

Figura 33. Interacción dieta (Bovino) vs Temperatura

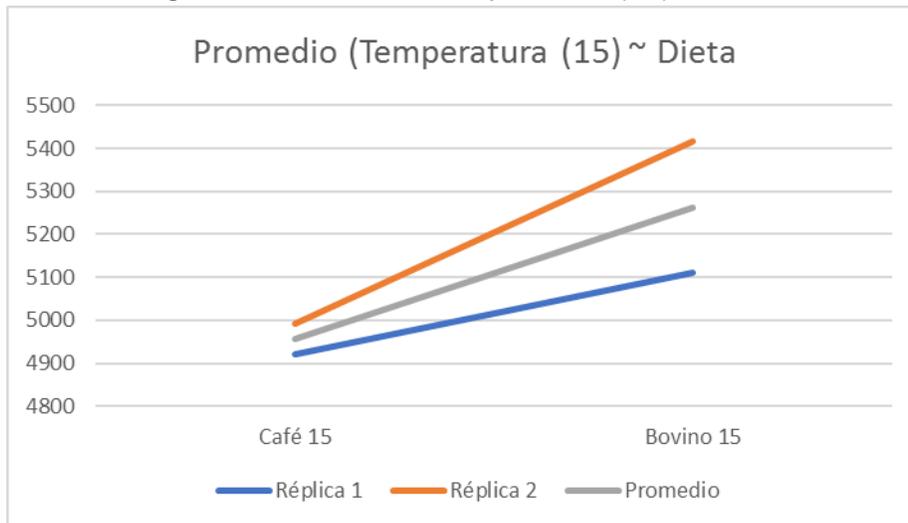


Cuadrado diferencia con la media global				
	Bovino 15	Bovino 20	Bovino 25	SCDieta~Temperatura
R1	5373.3	31514.1	10861.7	190996.5
R2	56980.9	221303.9	25433.5	1214873.0
R1+R2	34136.9	119084.2	17706.9	683712.0

En la revisión de las gráficas del tratamiento de la temperatura con la dieta bovino se encuentra un mayor promedio de la combinación bovino – 20°C, dicha interacción tiene también el mayor valor de la sumatoria de cuadrados de la diferencia de medias.

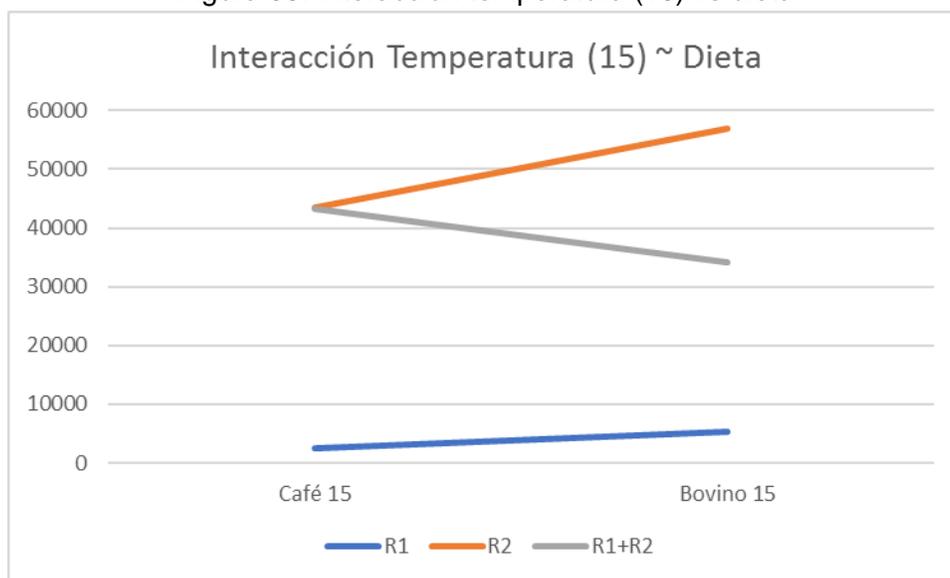
Interacción Temperatura ~ Dieta

Figura 34. Promedio temperatura (15) vs dieta



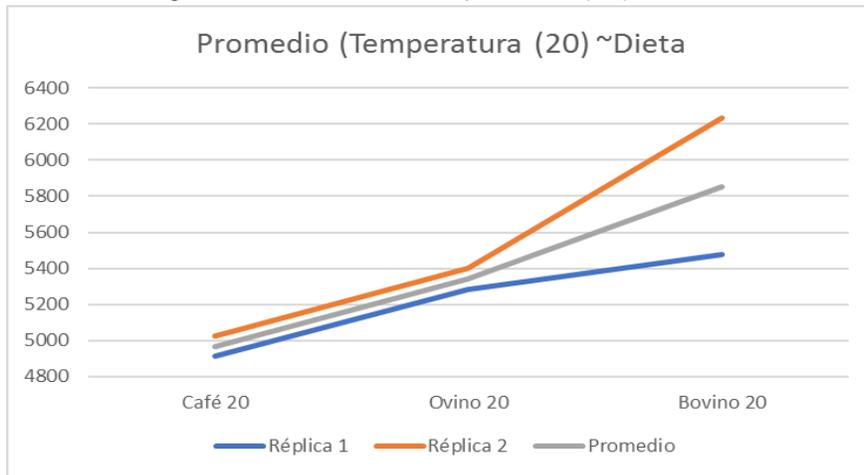
Promedio			
	Café 15	Bovino 15	Promedio
Réplica 1	4920.1	5110.05	5015.075
Réplica 2	4993.075	5416.325	5204.7
Promedio	4956.5875	5263.1875	5109.8875

Figura 35. Interacción temperatura (15) vs dieta



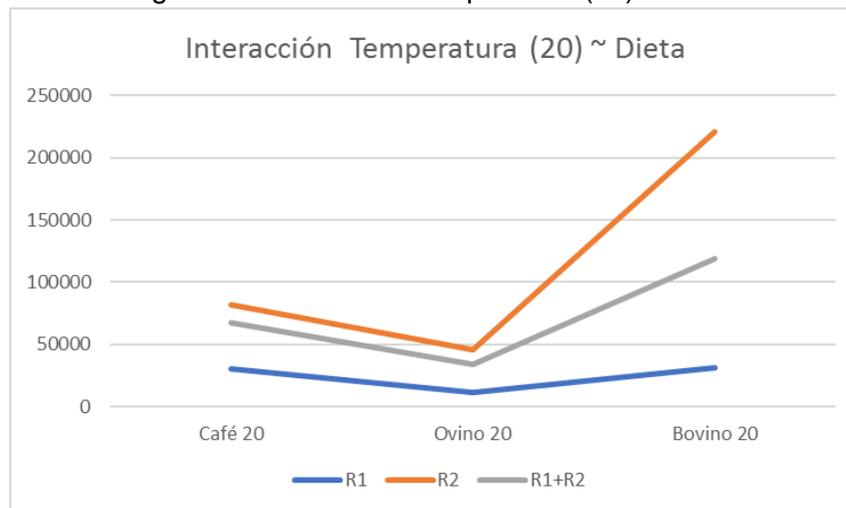
Cuadrado diferencia con la media global			
	Café 15	Ovino	Bovino 15
R1	2464.7777		5373.2972
R2	43376.028		56980.852
R1+R2	43346.136		34136.881

Figura 36. Promedio temperatura (20) vs dieta



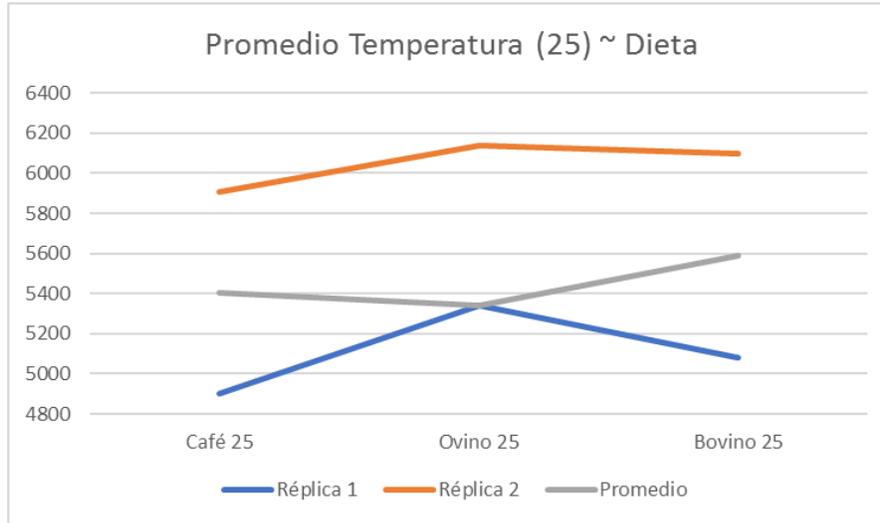
Promedio				
	Café 20	Ovino 20	Bovino 20	Promedio
Réplica 1	4911.05	5283.025	5475.275	5223.116667
Réplica 2	5024	5403.1	6234.525	5553.875
Promedio	4967.525	5343.0625	5854.9	5388.495833

Figura 37. Interacción temperatura (20) vs dieta



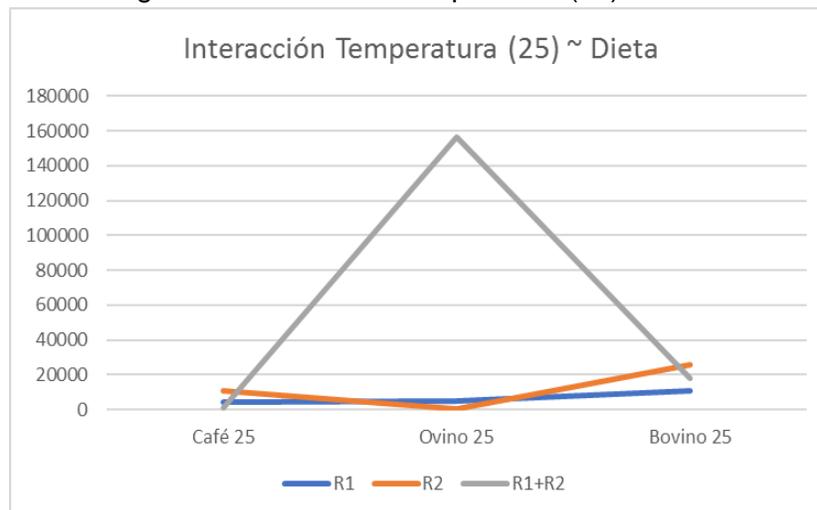
Cuadrado diferencia con la media global			
	Café 20	Ovino 20	Bovino 20
R1	29962.408	11252.495	31514.139
R2	82029.55	45801.213	221303.9
R1+R2	67145.72	33804.846	119084.17

Figura 38. Promedio temperatura (25) vs dieta



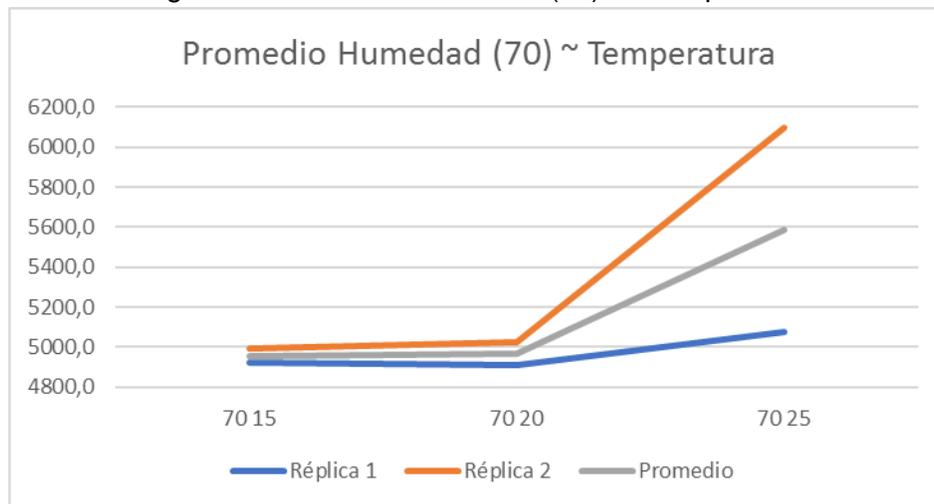
Promedio				
	Café 25	Ovino 25	Bovino 25	Promedio
Réplica 1	4903.125	5342.025	5078.2	5107.783333
Réplica 2	5910.075	6136.4	6099.35	6048.608333
Promedio	5406.6	5343.0625	5588.775	5446.145833

Figura 39. Interacción temperatura (25) vs dieta



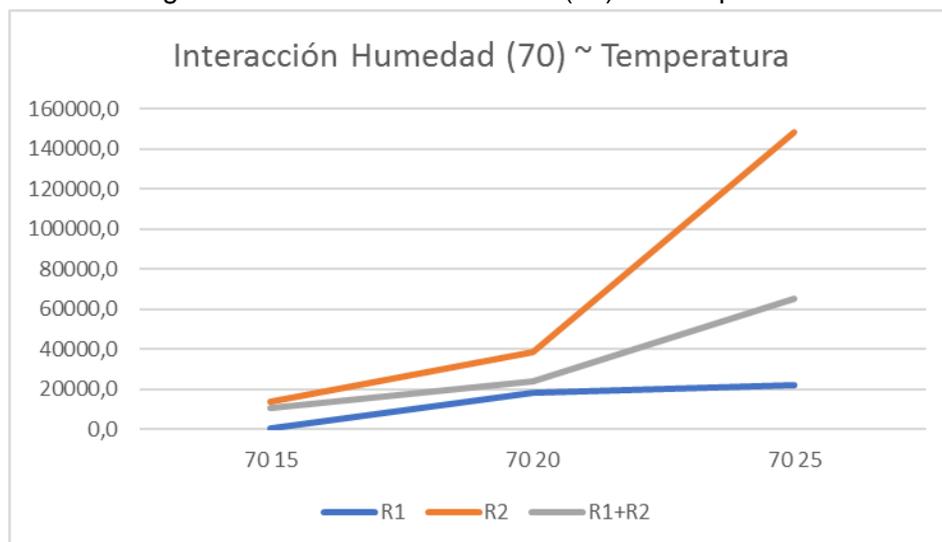
Al observar las gráficas de las interacciones entre las dietas y la humedad se puede observar una interacción entre las dietas y la temperatura encontramos la dieta bovino en combinación con la temperatura de 20°C la cual tiene promedios mayores a la media de los otros tratamientos café – 20° y ovino – 20°C, lo cual toma relevancia al observar la diferencia de cuadrados de las medias la cual tiene un valor superior en la dieta bovino y temperatura 20°

Figura 40. Promedio Humedad (70) vs Temperatura



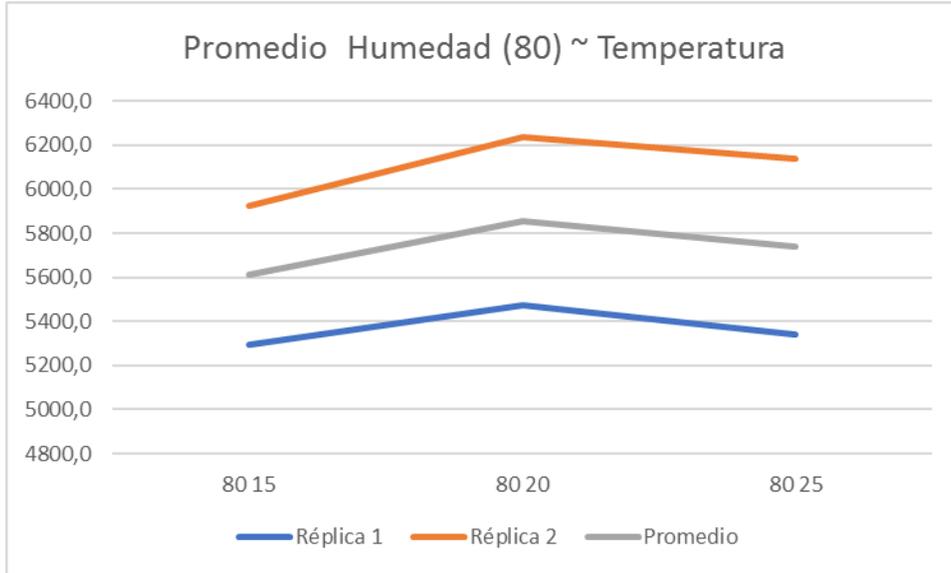
Promedios				
	70 15	70 20	70 25	Promedio
Réplica 1	4920.1	4911.1	5078.2	4969.78333
Réplica 2	4993.1	5024.0	6099.4	5372.14167
Promedio	4956.6	4967.5	5588.8	5170.9625

Figura 41. Interacción Humedad (70) vs Temperatura



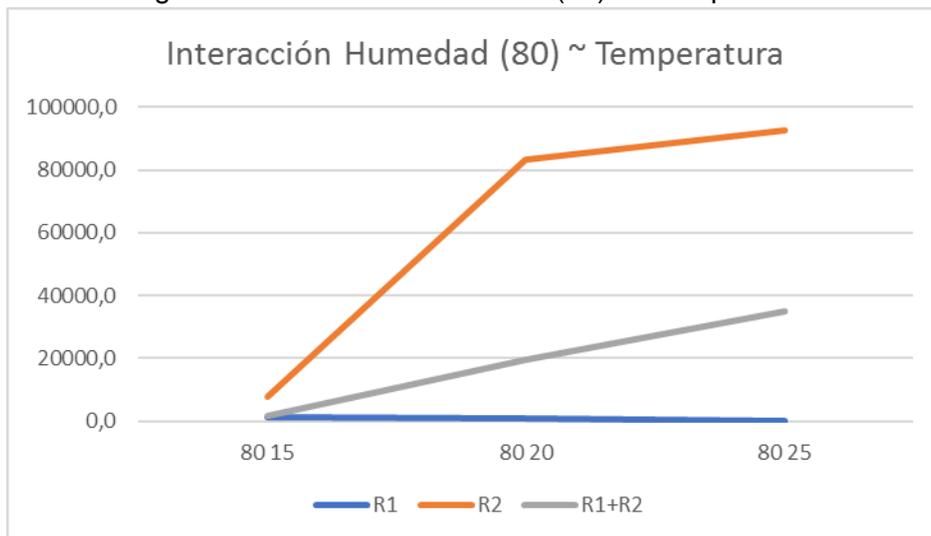
Cuadrado diferencia con la media global				
	70 15	70 20	70 25	SCHumedad ~ Temperatura
R1	140.7	18309.1	21659.7	161000.5
R2	13774.5	38221.8	148311.9	856330.8
R1+R2	10666.8	23780.1	65032.1	881166.9

Figura 42. Promedio Humedad (80) vs Temperatura



Promedios				
	80 15	80 20	80 25	Promedio
Réplica 1	5296.0	5475.3	5342.0	5371.1
Réplica 2	5925.0	6234.5	6136.4	6098.65278
Promedio	5610.5	5854.9	5739.2	5734.87639

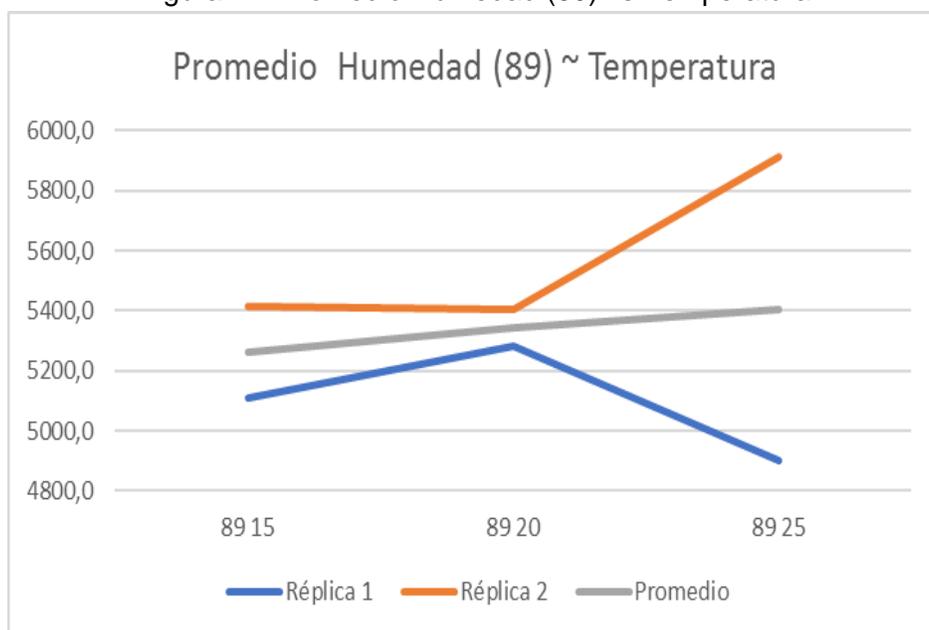
Figura 43. Interacción Humedad (80) vs Temperatura



Cuadrado diferencia con la media global				
	80 15	80 20	80 25	SCHumedad~Temperatura
R1	1389.6	761.6	93.7	8979.8
R2	7758.5	83238.0	92627.9	734497.6
R1+R2	1782.7	19683.0	35126.1	226367.2

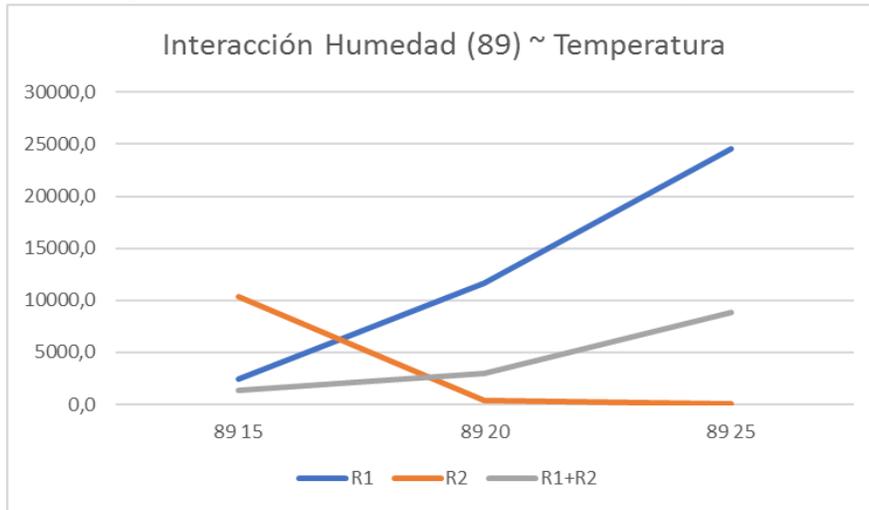
En la revisión de los tratamientos de humedad 80% con diferentes temperaturas se puede observar que el tratamiento de humedad 80% y temperatura 20°C tiene el promedio más elevado en comparación de la misma humedad y las otras temperaturas, si además se revisan las sumatorias de cuadrados de las diferencias es fácil notar que los tratamientos de 80% con temperaturas de 20°C y 25°C tienen una mayor diferenciación con la media que el tratamiento de la humedad del 80% y la temperatura 15°C.

Figura 44. Promedio Humedad (89) vs Temperatura



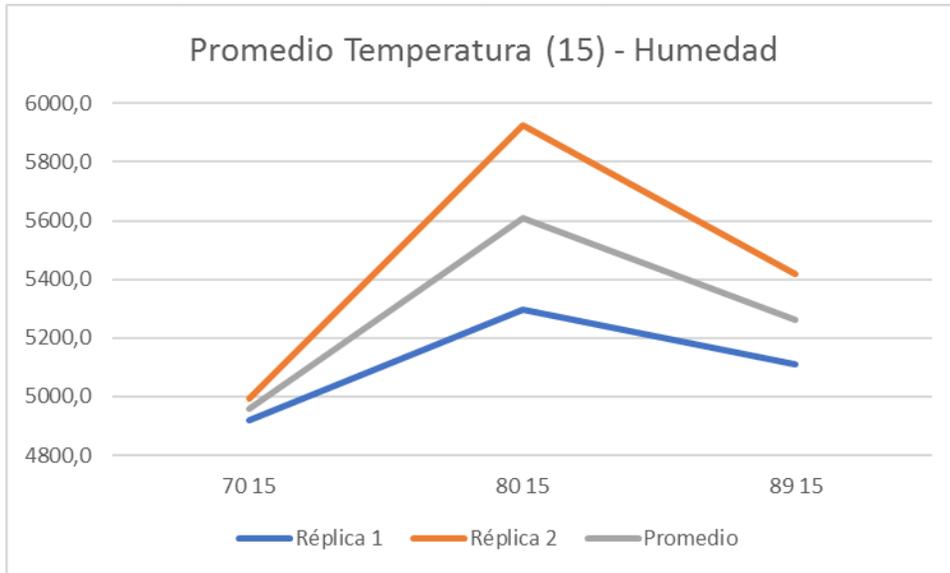
Promedios				
	89 15	89 20	89 25	Promedio
Réplica 1	5110.1	5283.0	4903.1	5098.73333
Réplica 2	5416.3	5403.1	5910.1	5576.5
Promedio	5263.2	5343.1	5406.6	5337.61667

Figura 45. Interacción Humedad (89) vs Temperatura



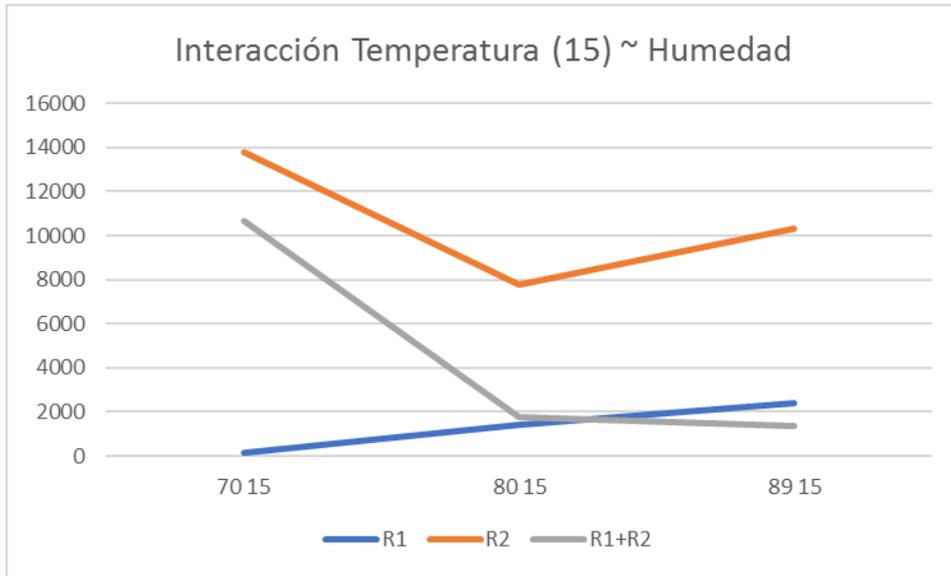
Cuadrado diferencia con la media global				
	89 15	89 20	89 25	SCHumedad~Temperatura
R1	2414.6	11602.3	24602.8	154478.8
R2	10307.7	431.1	72.6	43245.4
R1+R2	1344.4	2989.4	8801.3	52540.2

Figura 46. Promedio Temperatura (15) vs Humedad



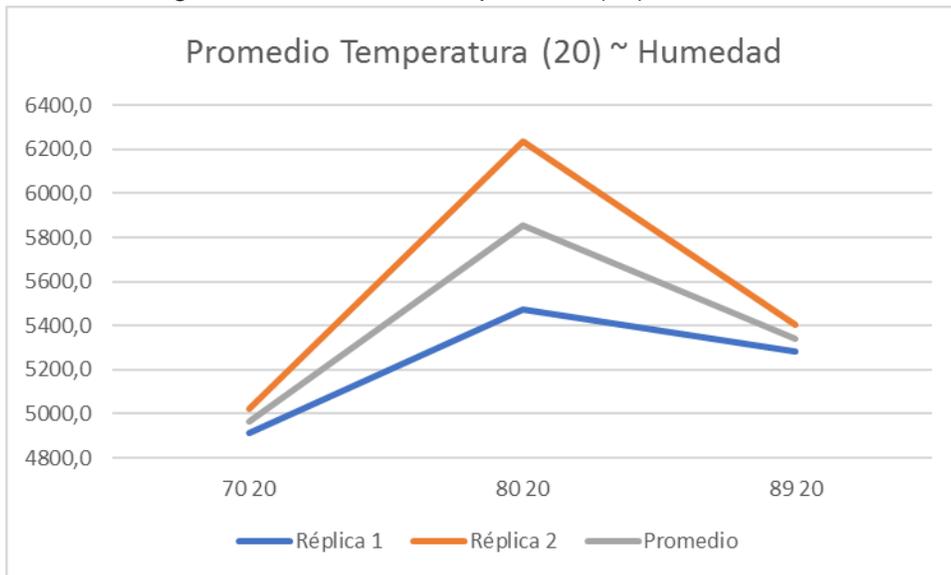
Promedios				
	70 15	80 15	89 15	Promedio
Réplica 1	4920.1	5296.0	5110.1	5108.71667
Réplica 2	4993.1	5925.0	5416.3	5444.81111
Promedio	4956.6	5610.5	5263.2	5276.76389

Figura 47. Interacción Temperatura (15) vs Humedad



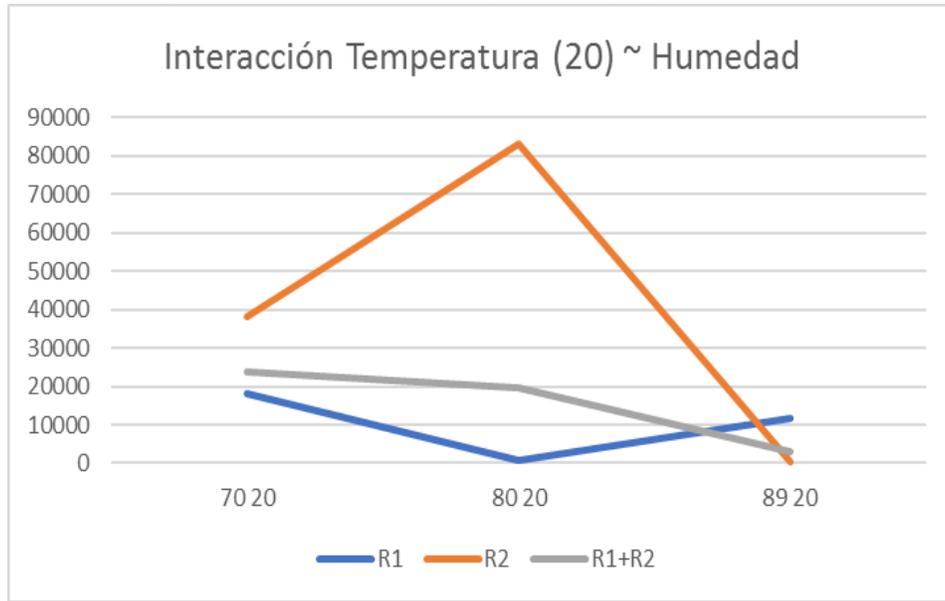
Cuadrado diferencia con la media global			
	70 15	80 15	89 15
R1	140.685957	1389.63272	2414.6304
R2	13774.5332	7758.4854	10307.6727
R1+R2	10666.8484	1782.70594	1344.35137

Figura 48. Promedio Temperatura (20) vs Humedad



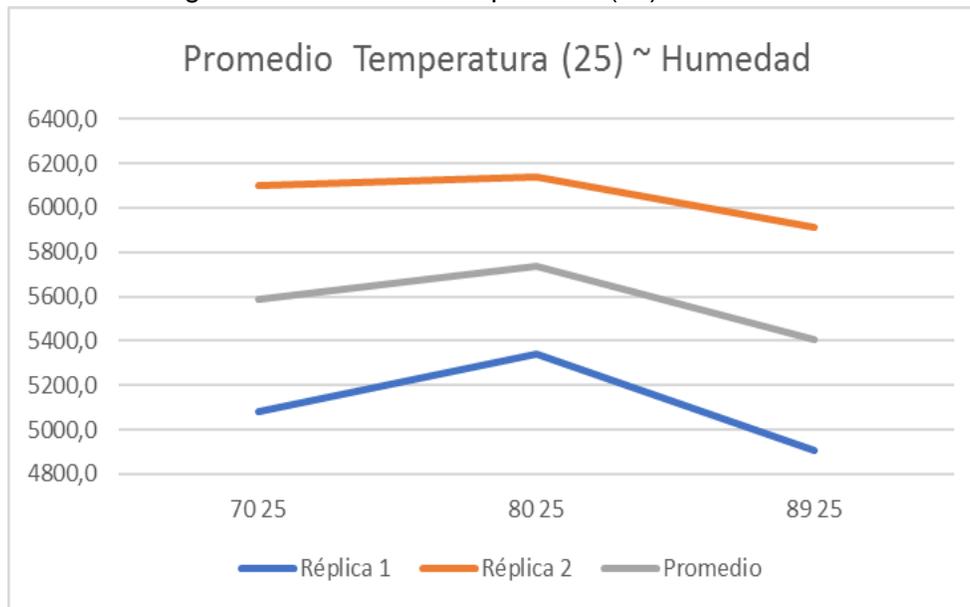
Promedios				
	70 20	80 20	89 20	Promedio
Réplica 1	4911.1	5475.3	5283.0	5223.11667
Réplica 2	5024.0	6234.5	5403.1	5553.875
Promedio	4967.5	5854.9	5343.1	5388.49583

Figura 49. Interacción Temperatura (20) vs Humedad



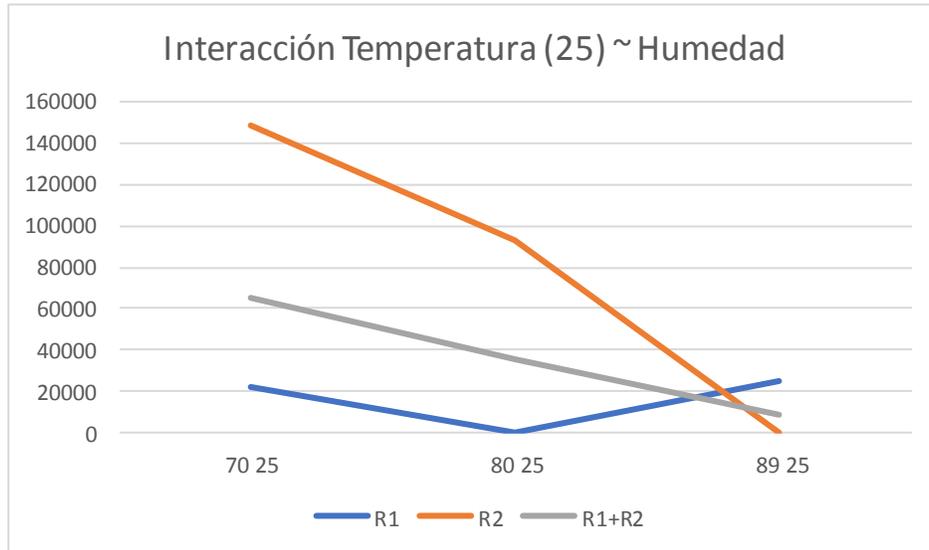
Cuadrado diferencia con la media global			
	70 20	80 20	89 20
R1	18309.0968	761.606674	11602.2819
R2	38221.7539	83238.0448	431.068097
R1+R2	23780.1073	19683.0144	2989.39208

Figura 50. Promedio Temperatura (25) vs Humedad



Promedios				
	70 25	80 25	89 25	Promedio
Réplica 1	5078.2	5342.0	4903.1	5107.78333
Réplica 2	6099.4	6136.4	5910.1	6048.60833
Promedio	5588.8	5739.2	5406.6	5578.19583

Figura 51. Interacción Temperatura (25) vs Humedad



Cuadrado diferencia con la media global			
	70 25	80 25	89 25
R1	21659.663	93.7131559	24602.7939
R2	148311.885	92627.882	72.5991387
R1+R2	65032.0552	35126.069	8801.31677

En las interacciones entre la temperatura con la humedad se puede observar que para los diferentes valores de temperatura la humedad de 80% tiene los valores más elevados de promedio y a su vez tiene las diferencias de medias mayores en la combinación humedad 80% y temperatura 20°C,

3.2. Diseño y ejecución del experimento utilizado

Teniendo en cuenta los factores, niveles y réplicas se propone realizar un diseño de experimentos factorial 33 fraccionado a la tercera parte; con apoyo del software R se configuran las 27 combinaciones posibles:

```

> ## todas las combinaciones de A, B y C (27 en total)
> d <- expand.grid("A" = 0:2,
+               "B" = 0:2,
+               "C" = 0:2)
> d
  A B C
1 0 0 0
2 1 0 0
3 2 0 0
4 0 1 0
5 1 1 0
6 2 1 0
7 0 2 0
8 1 2 0
9 2 2 0
10 0 0 1
11 1 0 1
12 2 0 1
13 0 1 1
14 1 1 1
15 2 1 1
16 0 2 1
17 1 2 1
18 2 2 1
19 0 0 2
20 1 0 2
21 2 0 2
22 0 1 2
23 1 1 2
24 2 1 2
25 0 2 2
26 1 2 2
27 2 2 2

```

Figura 52. 27 posibles combinaciones del modelo 3^3

Posteriormente, se construye la interacción triple utilizando el mod 3 para obtenerlas:

```

> ## construccion de interaccion triple
> d$ABC <- with(d, A+B+C)
> d$L <- with(d, ABC %% 3)
> d$combinacion <- 1:27
> d
  A B C ABC L combinacion
1 0 0 0 0 0 1
2 1 0 0 1 1 2
3 2 0 0 2 2 3
4 0 1 0 1 1 4
5 1 1 0 2 2 5
6 2 1 0 3 0 6
7 0 2 0 2 2 7
8 1 2 0 3 0 8
9 2 2 0 4 1 9
10 0 0 1 1 1 10
11 1 0 1 2 2 11
12 2 0 1 3 0 12
13 0 1 1 2 2 13
14 1 1 1 3 0 14
15 2 1 1 4 1 15
16 0 2 1 3 0 16
17 1 2 1 4 1 17
18 2 2 1 5 2 18
19 0 0 2 2 2 19
20 1 0 2 3 0 20
21 2 0 2 4 1 21
22 0 1 2 3 0 22
23 1 1 2 4 1 23
24 2 1 2 5 2 24
25 0 2 2 4 1 25
26 1 2 2 5 2 26
27 2 2 2 6 0 27

```

Figura 53. Construcción de la triple interacción

De esta forma se obtiene que son 9 tratamientos por fracción como se muestra a continuación:

```
> table(d$L)
0 1 2
9 9 9
```

Figura 54. Número de tratamientos por fracción

Los tratamientos de cada fracción se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 5. Tratamientos en cada fracción de forma aleatoria

L0	L1	L2
<pre>> subset(d, L == 0) A B C ABC L combinacion 1 0 0 0 0 0 1 6 2 1 0 3 0 6 8 1 2 0 3 0 8 12 2 0 1 3 0 12 14 1 1 1 3 0 14 16 0 2 1 3 0 16 20 1 0 2 3 0 20 22 0 1 2 3 0 22 27 2 2 2 6 0 27</pre>	<pre>> subset(d, L == 1) A B C ABC L combinacion 2 1 0 0 1 1 2 4 0 1 0 1 1 4 9 2 2 0 4 1 9 10 0 0 1 1 1 10 15 2 1 1 4 1 15 17 1 2 1 4 1 17 21 2 0 2 4 1 21 23 1 1 2 4 1 23 25 0 2 2 4 1 25</pre>	<pre>> subset(d, L == 2) A B C ABC L combinacion 3 2 0 0 2 2 3 5 1 1 0 2 2 5 7 0 2 0 2 2 7 11 1 0 1 2 2 11 13 0 1 1 2 2 13 18 2 2 1 5 2 18 19 0 0 2 2 2 19 24 2 1 2 5 2 24 26 1 2 2 5 2 26</pre>

Ahora se escoge una fracción de forma aleatoria:

```
> ## cuales fracciones hacemos?
> ## debemos escoger 1 fracción (es un DOE 3^2)
> set.seed(5)
> fraccion <- subset(d, L %in% sample(3, 1))
> fraccion
  A B C ABC L combinacion
3 2 0 0 2 2      3
5 1 1 0 2 2      5
7 0 2 0 2 2      7
11 1 0 1 2 2     11
13 0 1 1 2 2     13
18 2 2 1 5 2     18
19 0 0 2 2 2     19
24 2 1 2 5 2     24
26 1 2 2 5 2     26
```

Figura 55. Elección de la fracción a desarrollar en el experimento

Tomando la fracción que aleatoriamente arrojó R y las réplicas de cada combinación según el número de camas de forma aleatoria, se organiza la siguiente tabla:

Tabla 6. Tabla para la recopilación de datos

N o de cama	Factor			Combinac ión	No de réplica	Peso de la cama (kg)		
	A	B	C			Día 14	Día 21	Día 28
1	1	0	1	11	2			
2	1	2	2	26	4			
3	1	0	1	11	3			
4	2	2	1	18	4			
5	2	1	2	24	2			
6	2	0	0	3	3			
7	0	1	1	13	4			
8	1	1	0	5	2			
9	0	2	0	7	3			
10	2	1	2	24	1			
11	1	0	1	11	1			
12	0	2	0	7	2			
13	1	2	2	26	4			
14	0	0	2	19	3			
15	2	0	0	3	2			
16	1	0	1	11	4			
17	1	1	0	5	3			
18	0	2	0	7	4			
19	0	1	1	13	2			
20	0	0	2	19	4			
21	2	0	0	3	1			
22	2	1	2	24	4			
23	2	2	1	18	1			
24	0	0	2	19	1			
25	0	1	1	13	1			
26	2	2	1	18	3			
27	2	1	2	24	3			
28	1	2	2	26	2			
29	1	1	0	5	4			
30	0	2	0	7	1			
31	0	1	1	13	3			
32	1	1	0	5	1			
33	2	2	1	18	2			
34	2	0	0	3	4			
35	0	0	2	19	2			
36	1	2	2	26	1			

Se diseñó el formato para la recopilación de estos datos como se muestra a continuación:

FORMATO DE INSPECCION DE CAMAS PARA EXPERIMENTO

Fecha: _____ Hora: _____ Operario: _____

<p style="text-align: center;">No.1</p> <p>H: 80% T: 15°C A: Vacaza y pulpa de café</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.2</p> <p>H: 80% T: 25°C A: Estiércol composteado de ovino</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.3</p> <p>H: 80% T: 15°C A: Vacaza y pulpa de café</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.4</p> <p>H: 89% T: 25°C A: Vacaza y pulpa de café</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>
<p style="text-align: center;">No.5</p> <p>H: 89% T: 20°C A: Estiércol composteado de ovino</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.6</p> <p>H: 89% T: 15°C A: Compostaje de estiércol bovino</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.7</p> <p>H: 70% T: 20°C A: Vacaza y pulpa de café</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.8</p> <p>H: 80% T: 20°C A: Compostaje de estiércol bovino</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>
<p style="text-align: center;">No.9</p> <p>H: 70% T: 25°C A: Compostaje de estiércol bovino</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.10</p> <p>H: 89% T: 20°C A: Estiércol composteado de ovino</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.11</p> <p>H: 80% T: 15°C A: Vacaza y pulpa de café</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>	<p style="text-align: center;">No.12</p> <p>H: 70% T: 25°C A: Compostaje de estiércol bovino</p> <p>H: _____ T: _____ Peso: _____ pH: _____</p>

Figura 56. Formato de inspección de camas para experimento

De esta manera se reduce el diseño experimental de 108 a 36 experimentos así:

$$N = \frac{3^3}{3^1} * n = 3^{3-1} * 4 = 9 * 4 = 36 \quad \text{eq. 2}$$

3. 3. Modelo

En un análisis descriptivo de los datos se puede decir en primera instancia a través de un histograma de los datos recolectados del peso en cada cama, que no tienen una distribución simétrica. Al aplicar logaritmo se sigue analizando el mismo comportamiento de los datos como se muestra en la figura a continuación:

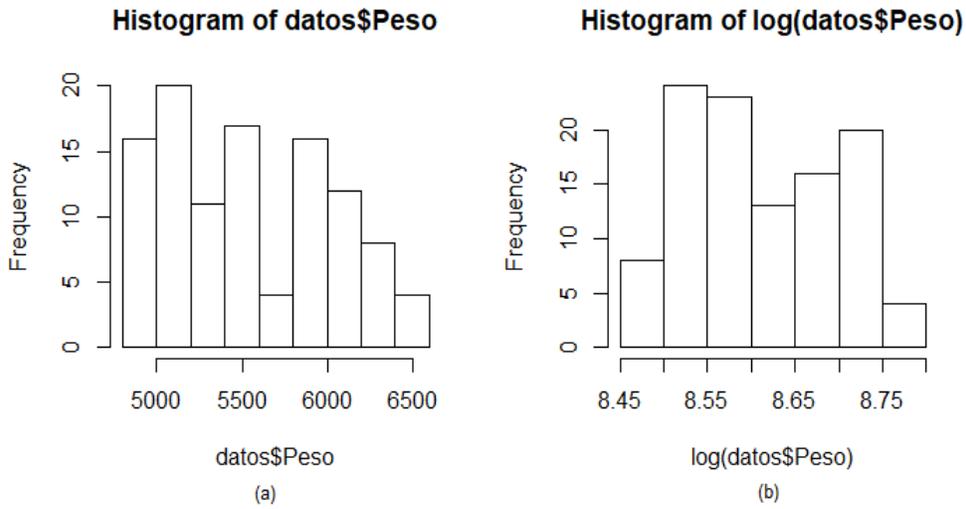


Figura 57. Histograma de los datos del peso (variable respuesta)

La figura siguiente permite analizar que la temperatura (x_1), aparentemente afecta el peso de las camas y el nivel correspondiente a 25°C ($-1=15^\circ\text{C}$, $0=20^\circ\text{C}$, $1=25^\circ\text{C}$) muestra un mejor comportamiento con respecto a la variable respuesta. De igual forma se puede inferir que el factor humedad (x_2) también afecta el peso de las camas, dando una mejor respuesta el nivel correspondiente al 80% ($-1=70\%$, $0=80\%$, $1=89\%$).

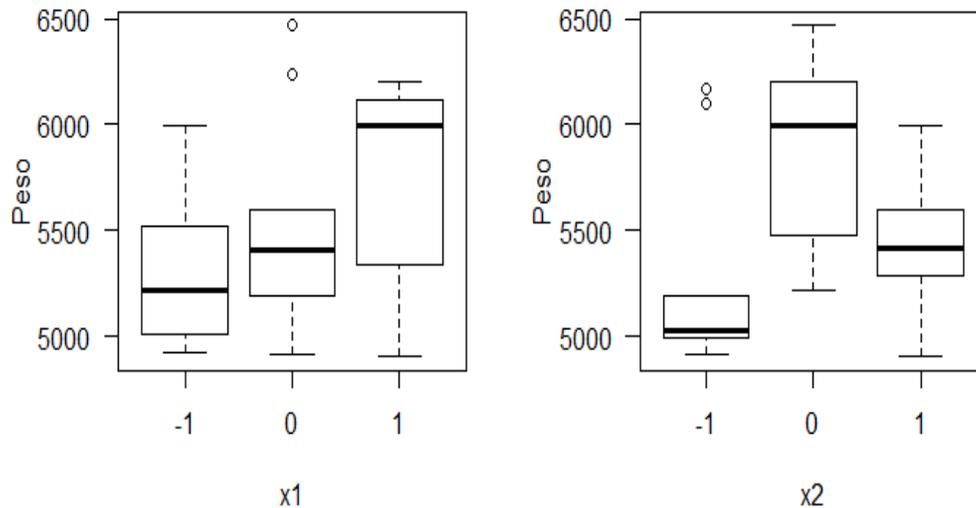


Figura 58. Comportamiento del factor temperatura y humedad con respecto al peso de las camas

Para verificar una posible interacción, la figura siguiente permite considerar que posiblemente exista, al dejar estático el factor de la humedad variando la temperatura.

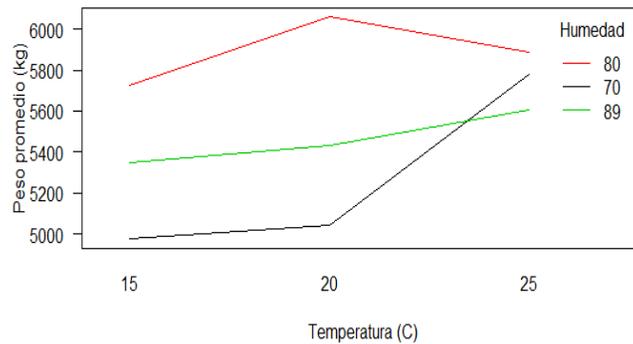


Figura 59. Interacción entre factor temperatura y humedad con respecto al peso de las camas

Las mediciones del peso se realizaron en tres momentos para identificar si el tiempo es una variable que afecta la reproducción de las lombrices y aumenta el peso de las camas. Por tanto, la medición se hizo a los 14, 21 y 28 días, como se muestra en las dos figura siguientes, mostrando que con el paso del tiempo el peso de la cama aumenta.

La figura 60 permite inferir que el nivel del factor temperatura que registra un mayor peso de las camas es 20°C. Con respecto al factor humedad, también se logra apreciar en la figura 61 que el tiempo afecta el peso de las camas porque a mayor tiempo aumenta dicha variable y se puede ver que el nivel con mayor valor de la variable respuesta es 80% cuando ha transcurrido 28 días.

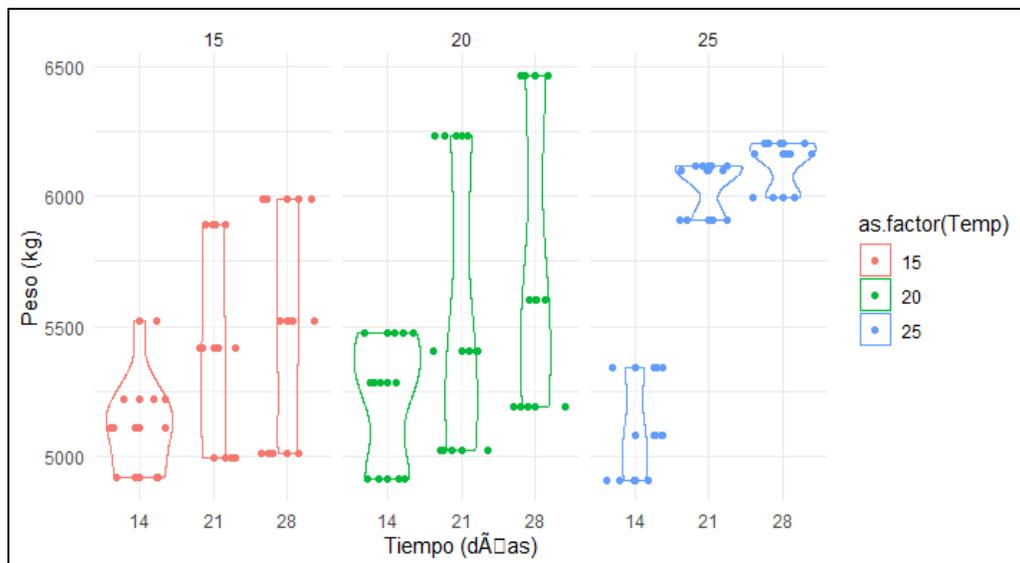


Figura 60. Efecto del tiempo hacia la variable respuesta del factor temperatura

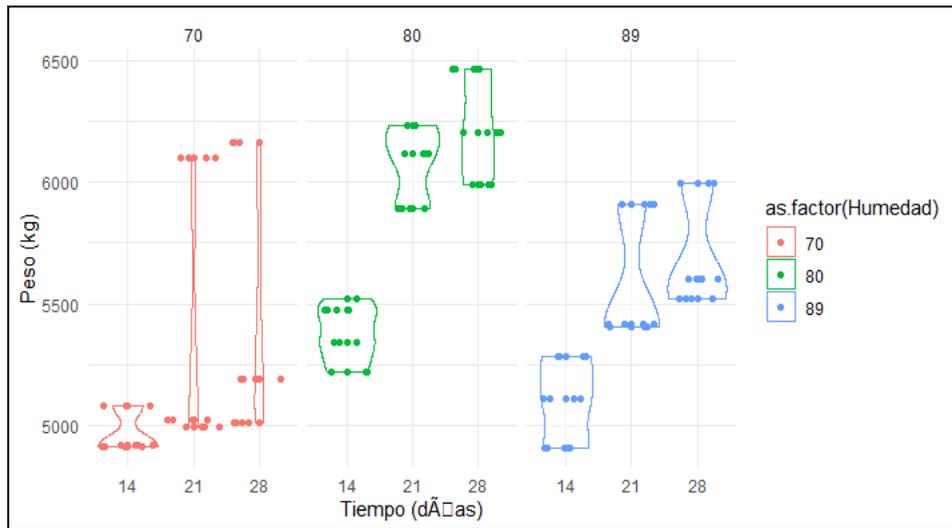


Figura 61. Efecto del tiempo hacia la variable respuesta del factor humedad

La regresión lineal múltiple de los datos recolectados del peso de las camas, figura 62, muestra que todas las variables (humedad, temperatura, dieta y tiempo) tienen un efecto significativo hacia la variable respuesta (peso). Con respecto al factor de la alimentación, se puede analizar que la dieta 1 (heces ovino) y la dieta 2 (cascara de café) disminuyen el peso de las camas, por tanto, es mejor suministrar la dieta 0 (heces bovino). En la figura 63 se puede ver la regresión lineal múltiple con aplicación del logaritmo, donde se puede inferir que el factor temperatura tiene un efecto directo con respecto al peso de las camas y que suministrar la dieta 1 tiene un efecto negativo para la variable respuesta.

```
Call:
lm(formula = Peso ~ Temp + Humedad + as.factor(Dieta) + Tiempo,
    data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-450.80 -292.23  -1.27   273.82  668.90

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   3295.238    441.996   7.455 3.03e-11 ***
Temp           36.846     8.593   4.288 4.11e-05 ***
Humedad         9.120     4.532   2.012 0.0468 *
as.factor(Dieta)1 -325.027    76.181 -4.267 4.45e-05 ***
as.factor(Dieta)2 -206.695    94.785 -2.181 0.0315 *
Tiempo         46.224     5.680   8.137 1.03e-12 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 337.4 on 102 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5372,    Adjusted R-squared:  0.5145
F-statistic: 23.68 on 5 and 102 DF,  p-value: 9.889e-16
```

Figura 62. Regresión Lineal Múltiple

```

Call:
lm(formula = log(Peso) ~ Temp + Humedad + as.factor(Dieta), data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.14250 -0.05206 -0.01974  0.06174  0.13849

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.378989   0.097207  86.198 < 2e-16 ***
Temp         0.006458   0.001963   3.290  0.00137 **
Humedad     0.001777   0.001035   1.717  0.08896 .
as.factor(Dieta)1 -0.058526  0.017400  -3.364  0.00108 **
as.factor(Dieta)2 -0.035590  0.021649  -1.644  0.10323
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.07706 on 103 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2402,    Adjusted R-squared:  0.2107
F-statistic: 8.141 on 4 and 103 DF,  p-value: 9.587e-06

```

Figura 63. Regresión Lineal Múltiple con logaritmo

Análisis de residuales:

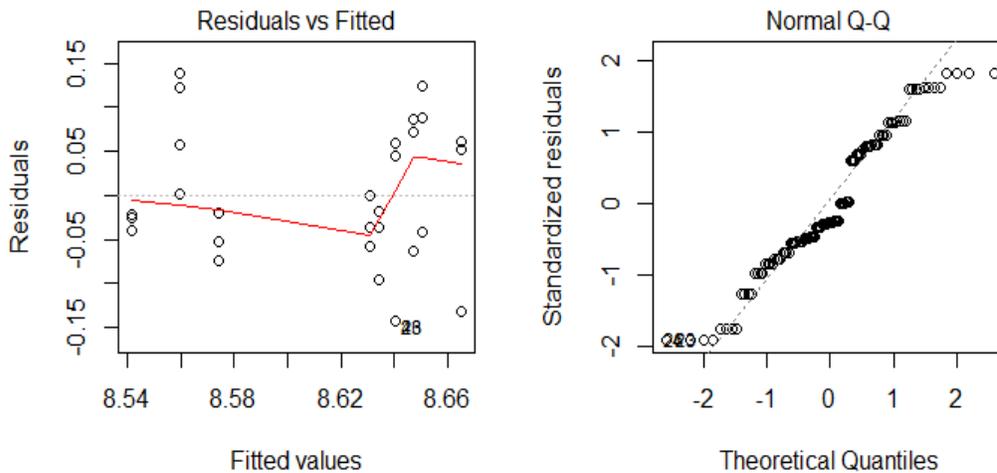


Figura 64. Análisis de residuales

La figura 64 muestra que los residuales se cumplen y permiten inferir conclusiones fiables del experimento.

3.3.1. Expresión matemática:

- Modelo matemático dieta 1 (Compostaje proveniente de estiércol bovino)

$$\text{Peso} = 36,84 \text{ Temperatura} + 9,12 \text{ Humedad} + 46,224 \text{ tiempo} - 325,02$$

- Modelo matemático dieta 2 (Vacaza y pulpa de café)

$$\text{Peso} = 36,84 \text{ Temperatura} + 9,12 \text{ Humedad} + 46,224 \text{ tiempo} - 206,695$$

VARIABLES:

Humedad de las camas: Humedad

Temperatura ambiente de afectación: Temperatura

Tiempo que tienen las lombrices en las camas al momento de la medición de las demás variables: tiempo

3.4. Análisis complementario: Método TODIM

La aplicación de TODIM se basa en una función de valor global de múltiples atributos propuesto por Gomes y Lima (1992). Esta función se construye en partes, con sus descripciones matemáticas que reproducen la función de ganancia/ pérdida de la teoría prospectiva. La función de valor global de atributos múltiples luego agrega todas las medidas de ganancias y pérdidas sobre todos los criterios.

Considere un problema de toma de decisiones que consiste en un conjunto de alternativas a ser evaluadas en base criterios cuantitativos/cualitativos y también asumir que entre esos criterios, uno debe ser tratado como el criterio de referencia. Para cada uno de los criterios C , la contribución de cada alternativa a_i , luego se estima el objetivo asociado con el criterio.

El método TODIM también es muy adecuado para tratar con criterios tanto cuantitativos como cualitativos. Ambos tipos de datos se normalizan posteriormente. La medida relativa de dominancia de una alternativa sobre otra se determina para cada par de alternativas.

Se calcula como la suma de todos los criterios de ambos valores relativos de ganancia/pérdida para las alternativas consideradas. Los componentes de esta suma pueden ser ganancias, pérdidas o ceros, dependiendo del desempeño de cada alternativa con respecto a cada criterio. Luego de la determinación de los pesos de los criterios y su normalización, se desarrollan las matrices parciales de dominancia y la matriz final de dominancia. En esta etapa, un criterio debe elegirse como criterio de referencia para los cálculos de acuerdo con la prioridad relativa asignada a cada criterio. Por lo general, el criterio que tiene el mayor peso de importancia se identifica como el criterio de referencia.

Paso 1: Como primer paso para la implementación de TODIM, se debe exponer la matriz de decisión correspondiente.

$$X = [x_{ic}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; c = 1, 2, \dots, m)$$

Paso 2: Para hacer que esta matriz de decisión sea adimensional y todos sus elementos comparables, se normaliza

$$\xi_{ij} = \frac{T_{ij}}{|T_j|}$$

$$\xi_{ij} = \frac{T_{ij}}{|T_j|}$$

Paso 3: Determinar el grado de dominancia de la alternativa A_i sobre alternativa A_j

$$\phi_c(A_i, A_j) = \begin{cases} \sqrt{\frac{w_{cr}(P_{ic} - P_{jc})}{\sum_{c=1}^m w_{cr}}} & \text{if } (P_{ic} - P_{jc}) > 0 \\ 0 & \text{if } (P_{ic} - P_{jc}) = 0 \\ \frac{-1}{\theta} \sqrt{\frac{(\sum_{c=1}^m w_{cr})(P_{ic} - P_{jc})}{w_{cr}}} & \text{if } (P_{ic} - P_{jc}) < 0 \end{cases}$$

Paso 4: El grado de dominancia general de la alternativa se determina aplicando la ecuación correspondiente.

$$\xi_i = \frac{\sum_{j=1}^n \delta(A_i, A_j) - \min \sum_{j=1}^n \delta(A_i, A_j)}{\max \sum_{j=1}^n \delta(A_i, A_j) - \min \sum_{j=1}^n \delta(A_i, A_j)}$$

Paso 5: Finalmente, las alternativas se clasifican según el orden descendente de sus puntajes de dominancia y la alternativa que tiene la máxima puntuación de dominancia se convierte obviamente en la mejor opción.

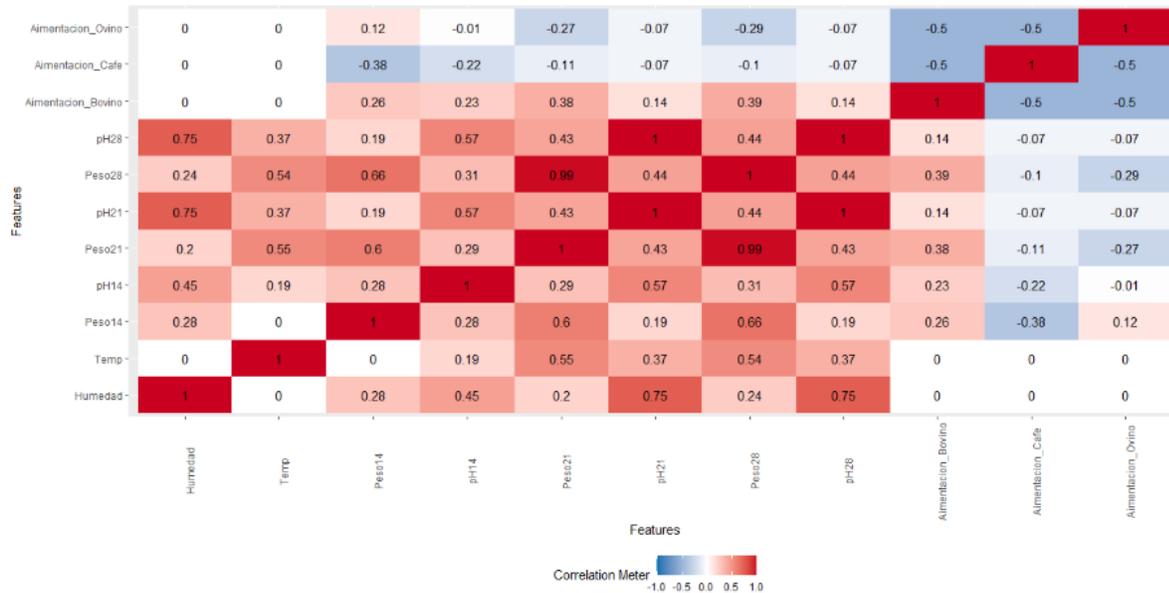


Figura 65. Matriz de correlación

Iniciamos con la ejecución de los pasos aplicados a la investigación:

Paso 1: Como primer paso para la implementación de TODIM, se debe exponer la matriz de decisión correspondiente.

A continuación, se muestra la tabla de la matriz de decisiones

Tabla 7. Matriz de decisiones

Matriz de Decisiones						
Niveles	Humedad	Temperatura	Café	Ovino	Bovino	
N1 Bajo	70	15	4920.1	0	0	
N2 Bajo-Medio	70	20	4911.1	0	0	
N3 Bajo-Alto	70	25	0	0	5078.2	
N4 Medio-Bajo	80	15	5296	0	0	
N5 Medio-Medio	80	20	0	0	5475.3	
N6 Medio-Alto	80	25	0	5342	0	
N7 Alto-Bajo	89	15	0	0	5110.1	
N8 Alto-Medio	89	20	0	5283	0	
N9 Alto-Alto	89	25	4903.1	0	0	

Paso 2: Para hacer que esta matriz de decisión sea adimensional y todos sus elementos comparables se normalizan.

Tabla 8. Matriz de normalización

Matrix Normalizada					
0.098	0.083	0.246	0.000	0.000	
0.098	0.111	0.245	0.000	0.000	
0.098	0.139	0.000	0.000	0.000	0.324
0.112	0.083	0.264	0.000	0.000	0.000
0.112	0.111	0.000	0.000	0.000	0.350
0.112	0.139	0.000	0.503	0.000	0.000
0.124	0.083	0.000	0.000	0.000	0.326
0.124	0.111	0.000	0.497	0.000	0.000
0.124	0.139	0.245	0.000	0.000	0.000

Paso 3: Determinar el grado de dominancia de la alternativa A_i sobre alternativa A_j

Para el caso de estudio se utilizará el vector del peso $w = [0.51 \quad 0.25 \quad 0.12 \quad 0.04 \quad 0.08]$, el cual se obtuvo con el método AHP.

Tabla 9. Cálculo de grado de dominancia por combinaciones

Grado de Dominancia $\emptyset(A_1, A_j)$					
0.000	-0.333	0.007	0.000	0.000	-0.326
0.000	-0.471	0.172	0.000	-2.013	-2.313
-0.165	0.000	-0.395	0.000	0.000	-0.561
-0.165	-0.333	0.172	0.000	-2.090	-2.417
-0.165	-0.471	0.172	-3.545	0.000	-4.010
-0.228	0.000	0.172	0.000	-2.019	-2.076
-0.228	-0.333	0.172	-3.526	0.000	-3.915
-0.228	-0.471	0.010	0.000	0.000	-0.689
Suma					-16.308

Grado de Dominancia $\emptyset(A_2, A_j)$					
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	-0.333	0.172	0.000	-2.013	-2.175
-0.165	0.083	-0.400	0.000	0.000	-0.482
-0.165	0.000	0.172	0.000	-2.090	-2.084
-0.165	-0.333	0.172	-3.545	0.000	-3.873
-0.228	0.083	0.172	0.000	-2.019	-1.992
-0.228	0.000	0.172	-3.526	0.000	-3.582
-0.228	-0.333	0.007	0.000	0.000	-0.554
Suma					-14.743

Grado de Dominancia $\emptyset(A_3, A_j)$					
0.000	0.083	-1.429	0.000	0.161	-1.185
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.165	0.118	-1.484	0.000	0.161	-1.371
-0.165	0.083	0.000	0.000	-0.563	-0.645
-0.165	0.000	0.000	-3.545	0.161	-3.550
-0.228	0.118	0.000	0.000	-0.160	-0.270
-0.228	0.083	0.000	-3.526	0.161	-3.509
-0.228	0.000	-1.428	0.000	0.161	-1.495
Suma					-12.025

Grado de Dominancia $\emptyset(A_4, A_j)$					
0.084	-0.333	0.048	0.000	0.000	-0.201
0.084	-0.471	0.178	0.000	-2.013	-2.222
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	-0.333	0.178	0.000	-2.090	-2.246
0.000	-0.471	0.178	-3.545	0.000	-3.839
-0.157	0.000	0.178	0.000	-2.019	-1.998
-0.157	-0.333	0.178	-3.526	0.000	-3.838
-0.157	-0.471	0.049	0.000	0.000	-0.580
Suma					-14.923

Grado de Dominancia $\emptyset(A_5, A_j)$					
0.084	0.000	-1.429	0.000	0.167	-1.178
0.084	-0.333	0.000	0.000	0.045	-0.204
0.000	0.083	-1.484	0.000	0.167	-1.234
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	-0.333	0.000	-3.545	0.167	-3.711
-0.157	0.083	0.000	0.000	0.043	-0.030
-0.157	0.000	0.000	-3.526	0.167	-3.515
-0.157	-0.333	-1.428	0.000	0.167	-1.751
Suma					-11.624

Grado de Dominancia $\emptyset(A_6, A_j)$					
0.084	0.083	-1.429	0.142	0.000	-1.120
0.084	0.000	0.000	0.142	-2.013	-1.787
0.000	0.118	-1.484	0.142	0.000	-1.225

0.000	0.083	0.000	0.142	-2.090	-1.865
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.157	0.118	0.000	0.142	-2.019	-1.917
-0.157	0.083	0.000	0.015	0.000	-0.059
-0.157	0.000	-1.428	0.142	0.000	-1.443
				Suma	-9.415

Grado de Dominancia $\emptyset(A_7, A_j)$					
0.116	-0.333	-1.429	0.000	0.162	-1.485
0.116	-0.471	0.000	0.000	0.013	-0.342
0.080	0.000	-1.484	0.000	0.162	-1.243
0.080	-0.333	0.000	0.000	-0.540	-0.793
0.080	-0.471	0.000	-3.545	0.162	-3.775
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	-0.333	0.000	-3.526	0.162	-3.697
0.000	-0.471	-1.428	0.000	0.162	-1.738
					-13.074

Grado de Dominancia $\emptyset(A_8, A_j)$						
0.116	0.000	-1.429	0.141	0.000	-1.172	
0.116	-0.333	0.000	0.141	-2.013	-2.089	
0.080	0.083	-1.484	0.141	0.000	-1.180	
0.080	0.000	0.000	0.141	-2.090	-1.869	
0.080	-0.333	0.000	-0.373	0.000	-0.626	
0.000	0.083	0.000	0.141	-2.019	-1.795	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.000	-0.333	-1.428	0.141	0.000	-1.621	
					Suma	-10.352

Grado de Dominancia $\emptyset(A_9, A_j)$						
0.116	0.083	-0.058	0.000	0.000	0.142	
0.116	0.000	0.171	0.000	-2.013	-1.725	
0.080	0.118	-0.404	0.000	0.000	-0.206	
0.080	0.083	0.171	0.000	-2.090	-1.756	
0.080	0.000	0.171	-3.545	0.000	-3.294	
0.000	0.118	0.171	0.000	-2.019	-1.730	
0.000	0.083	0.171	-3.526	0.000	-3.271	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
					Suma	-11.841

Paso 4: El grado de dominancia general de la alternativa se determina aplicando la ecuación correspondiente ε_i . Donde los niveles corresponden a la combinación de la Humedad y la Tempertura

Tabla 10. Cálculo de grado de dominancia general

Niveles	$\Sigma(A_i, A_j)$	ε_i	Ranking
N1	-16.308	0.000	9
N2	-14.743	0.227	7
N3	-12.025	0.621	5
N4	-14.923	0.201	8
N5	-11.624	0.680	3
N6	-9.415	1.000	1
N7	-13.074	0.469	6
N8	-10.352	0.864	2
N9	-11.841	0.648	4

Este nivel corresponde a la combinación de los niveles **Humedad 80 y Temperatura 25**

Paso 5: Finalmente, las alternativas se clasifican según el orden descendente de sus puntajes de dominancia y la alternativa que tiene la máxima puntuación de dominancia se convierte obviamente en la mejor opción.

Tal como lo indica la Figura el nivel 6 corresponde a la mejor opción

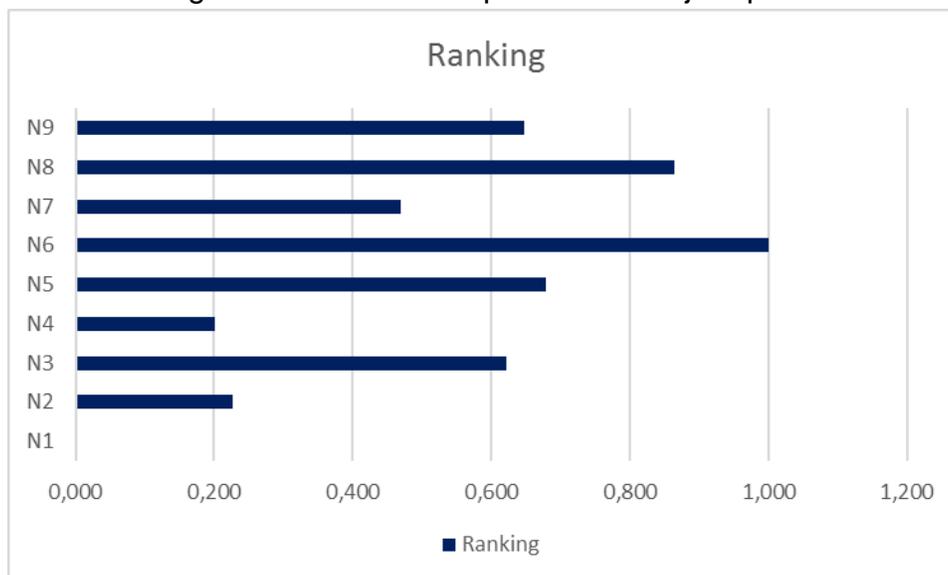


Figura 66. Ranking según dominancia general

3.5. Implementación del sistema de automatización y control de variables

En el marco de la visita de campo a la finca donde se realiza el prototipo de automatización del sistema de riego para el control de las variables temperatura y humedad de un lombricultivo, se implemento a través de la tarjeta programable TTGO el sistema electrónico y de comunicaciones para el monitoreo en tiempo real del sistema.

En la figura 1 se muestra el esquema de implementación que se realiza en la finca:

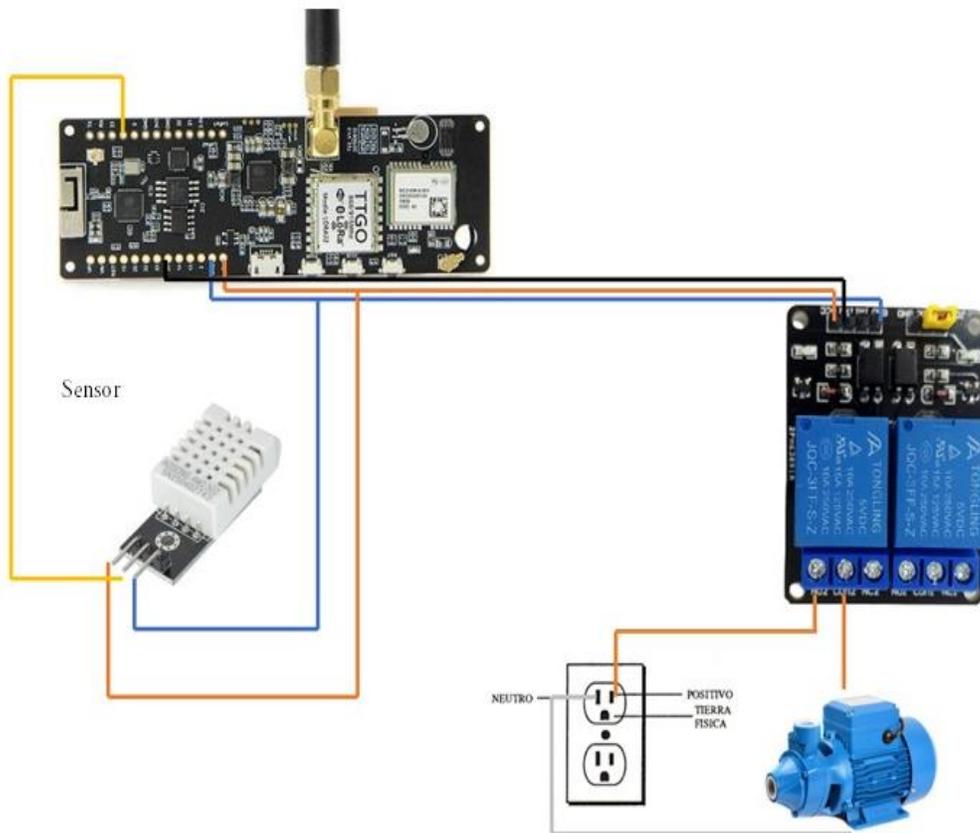


Figura 67. Esquema del sistema implementado en el lombricultivo

Para el manejo de la tarjeta TTGO se utiliza el lenguaje de programación C con el objetivo de asignar funciones a sus puntos de salida y las conexiones con los periféricos; a continuación, se muestra el código implementado:

```

//-----Variables-----
int riegos_dia=2;
int hora_riego_t=18;
int hora_riego=7;// formato 24h
int minutos_riego=5;
int pin_motor1=25;
int pin_motor2=14;

/*****
 * Include Libraries
 *****/
#include "UbidotsEsp32Mqtt.h"
/*****
 * Define Constants Ubidots
 *****/
const char *UBIDOTS_TOKEN = "BBFF-T2xjYmNFqGmyhZSFz13Pc7M6YJJTew"; // Put here your Ubidots TOKEN
const char *DEVICE_LABEL = "muestreo"; // Put here your Device label to which data will be published
const char *VARIABLE_LABEL = "Humedad"; // Put here your Variable label to which data will be published
const char *VARIABLE_LABEL2 = "Temperatura";
const int PUBLISH_FREQUENCY = 120000; // Update rate in milliseconds
unsigned long timer;
Ubidots ubidots(UBIDOTS_TOKEN);
/*****
 * Sensor de Humedad y Temperatura
 *****/
#include <WiFiManager.h> // https://github.com/tzapu/WiFiManager
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 23 // Digital pin connected to the DHT sensor
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302), AM2321
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
WiFiManager wm;
/*****
 * Funciones de Tiempo
 *****/

#include <NTPClient.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include "time.h"
const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
const long  gmtOffset_sec = 3600;
const int  daylightOffset_sec = -21600;

bool flag_manana=true;
bool flag_tarde=true;
bool motor_on=false;

// Define NTP Client to get time
WiFiUDP ntpUDP;
NTPClient timeClient(ntpUDP, "europe.pool.ntp.org", 3600, 60000);

void callback(char *topic, byte *payload, unsigned int length)
{
  Serial.print("Message arrived [");
  Serial.print(topic);
  Serial.print("] ");
  for (int i = 0; i < length; i++)
  {
    Serial.print((char)payload[i]);
  }
}

```

```

    }
    Serial.println();
}
/*****
* Main Functions
*****/
void setup()
{ // definicion de las entradas de los motores
  pinMode(pin_motor1, OUTPUT);
  pinMode(pin_motor2, OUTPUT);
  digitalWrite(pin_motor1, LOW);
  digitalWrite(pin_motor2, HIGH);
  Serial.begin(115200);
  //conexion wifi
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFiManager wm;
  // WiFiManager
  wm.resetSettings();
  bool res;
  res = wm.autoConnect("AutoConnectAP","password"); // password protected ap
  if(!res) {
    Serial.println("Failed to connect");
    // ESP.restart();
  }
  else {
    //if you get here you have connected to the WiFi
    Serial.println("connected...yeey :)");
  }
  dht.begin();
  //ubidots.connectToWifi(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
  ubidots.setCallback(callback);
  ubidots.setup();
  ubidots.reconnect();
  analogReadResolution(10);
  timer = millis();

  configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
  printLocalTime();
}

String hora_ultimo_riego;
long hora_antigua;
float Temperature =0;
float Humidity =0;
String hora, fecha;
bool bandera_motor=false;

void loop()
{
  //Serial.print(".");
  struct tm timeinfo;

  if(!getLocalTime(&timeinfo)){
    Serial.println("Failed to obtain time");
    return;
  }
  int hora_d= timeinfo.tm_hour;
  int min_d= timeinfo.tm_min;

```

```

int seg_d =timeinfo.tm_sec;
hora=String(timeinfo.tm_hour)+":"+String(timeinfo.tm_min)+":"+String(timeinfo.tm_sec);
//Serial.println(hora);
fecha=String(timeinfo.tm_year+1900)+"-"+String(timeinfo.tm_mon)+"-"+String(timeinfo.tm_mday);
long hora_actual=ConvierteFechaEnNumero(hora_d, min_d, seg_d);
if (hora_d == hora_riego and flag_manana and motor_on==false){
  hora_ultimo_riego=hora;
  motor_on=true;
  bandera_motor=true;
  digitalWrite(pin_motor1, HIGH);
  digitalWrite(pin_motor2, LOW);
  flag_manana=false;
  hora_antigua=hora_actual;
  Serial.println("encender Motor");
  Serial.println("encender Motor Mañana");
}
if (hora_d == hora_riego_t and flag_tarde and motor_on==false){
  hora_ultimo_riego=hora;
  bandera_motor=true;
  motor_on=true;
  digitalWrite(pin_motor1, HIGH);
  digitalWrite(pin_motor2, LOW);
  flag_tarde=false;
  hora_antigua=hora_actual;
  Serial.println("encender Motor TARde");
}
}
if (motor_on and hora_antigua+60*minutos_riego<hora_actual){
  bandera_motor=true;
  digitalWrite(pin_motor1, LOW);
  digitalWrite(pin_motor2, HIGH);
  motor_on=false;
  Serial.println("apagar Motor");
}
if (hora_d>22){
  flag_tarde=true;
  flag_manana=true;
  ESP.restart();
}
}
// put your main code here, to run repeatedly:
if (!ubidots.connected())
{Serial.print("-");
  ubidots.reconnect();
}
}
long result=millis() - timer;

if (result > PUBLISH_FREQUENCY or bandera_motor) // triggers the routine every 5 seconds
{
  Serial.print("*.");
  bandera_motor=false;
  float Humidity = dht.readHumidity();
  float Temperature = dht.readTemperature();
  float f = dht.readTemperature(true);

  if (isnan(Humidity) || isnan(Temperature) || isnan(f)) {
    Humidity=Temperature=f=0;
  }else{

```

```

Serial.print(F("Humidity: "));
Serial.print(Humidity);
Serial.print(F("% Temperature: "));
Serial.print(Temperature);
Serial.println("");
ubidots.add(VARIABLE_LABEL, Humidity);
ubidots.add(VARIABLE_LABEL2, Temperature);// Insert your variable Labels and the value to be sent
ubidots.add("Motor", motor_on);
ubidots.publish(DEVICE_LABEL);
timer = millis();
}
}
ubidots.loop();
}

```

Una vez programada la tarjeta se realiza una prueba de funcionamiento del sistema como se muestra a continuación:

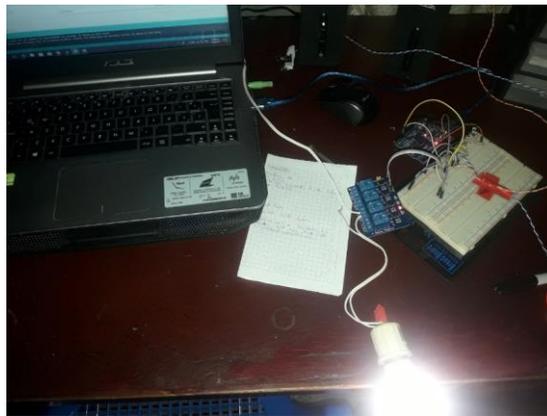


Figura 68. Prueba de funcionamiento de la programación de la tarjeta TTGO y periféricos

Después de realizar ajustes, se hace la implementación del sistema en el lombricultivo y se establecen las conexiones eléctricas correspondientes para la conexión del riego automatizado y la lectura de las variables. Las siguientes imágenes evidencian la instalación del sistema:



Figura 69. Instalación y resguardo de la caja de control del sistema



Figura 70. Prueba del sistema de riego automatizado para el control de las variables humedad y temperatura

Finalmente, se verifica la conexión a internet de la tarjeta programable TTGO para la recepción de los datos a través de los avances generados en el desarrollo de la plataforma web, como imágenes planes del sistema. Se evidencia el registro de los datos en lectura de las variables en tiempo real a través de un dispositivo móvil:

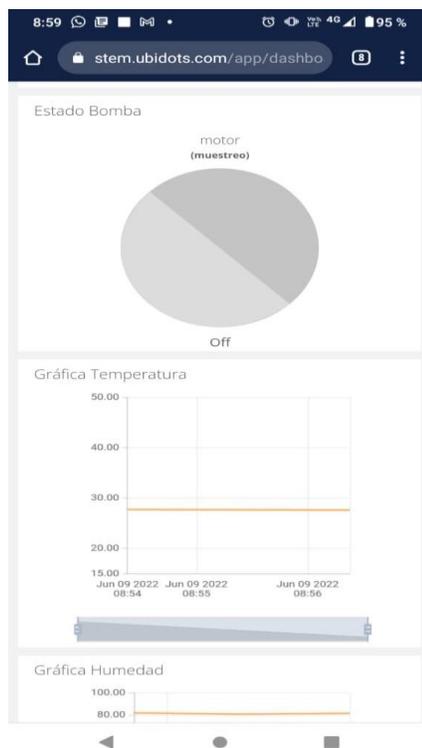


Figura 71. Prueba de conexión y lectura de los valores de la humedad y temperatura en tiempo real

Capítulo 4 - Discusión

Al diseñar un experimento como el de esta investigación, se debe tener en cuenta la forma como se van a digitalizar los datos, debido a que se hicieron en físico y se debía digitalizar, lo que puede generar errores. De igual forma, se deben reducir al máximo los factores que no están siendo estudiados y que son externos al modelo para que afecten lo menos posible la solución planteada. Hay muchos de los autores que evidencian en sus trabajos durante la revisión bibliográfica, que escenarios abiertos o al aire libre perturban la toma de los datos.

Desde lo teórico, se puede evidenciar que los resultados con mayor grado de exactitud para la optimización de la reproducción de la lombriz roja californiana, son temperatura en 25°C, humedad en 80% y dos dietas posibles: pulpa de café o residuos de café y desechos bovinos; en este orden de ideas, el experimento muestra una alineación con los resultados de Domínguez & Brandón (2010), Toccalino, Roux, & Agüero (2004) y Vázquez, Caratachea, Mondragón, & Sandoval (2007).

Por el contrario, en el factor de dieta diferimos de los resultados mostrados por Murguía, Mamani, Tancara, Tintaya, Osorio, & Palero (2010), quienes especificaban que al alimentar las lombrices con residuos bovinos se disminuía el peso de las camas, mientras que esta dieta fue la de mejores resultados en esta investigación como alternativa de dieta.

Capítulo 5 - Conclusiones

5.1 Cumplimiento de objetivos y aportes a líneas de investigación de grupo

Conclusiones técnicas:

En los experimentos reales se deben tener en cuenta las variables que no se pueden controlar pero que afectan directamente el proceso (pH) porque se deben medir y analizar para poder generar conclusiones verdaderas del fenómeno de estudio.

El experimento se puede diseñar con un Box-Behnken teniendo en cuenta condiciones experimentales que no son posibles de ejecutar en la realidad del proceso, ya que este DOE excluye las combinaciones donde todos los niveles de los factores son altos y todos son bajos. Para este caso, el nivel bajo de la temperatura (15°C) fue difícil de controlar, influenciado principalmente por la temperatura ambiente (35°C).

Conclusiones de cumplimiento:

El proyecto logra ejecutar todos los objetivos propuestos, dejando un sistema de riego y medición de variables influyentes en la reproducción de la lombriz roja californiana de forma remota, como escenario muy útil para los lombricultores de la región. El empresario de la mano con los investigadores buscan replicar esta buena práctica para que se fomenten los cambios requeridos en otras fincas.

De igual forma, se estructuran partiendo de análisis de datos dos modelos matemáticos que les ayudará a predecir la cantidad de lombrices en un lombricultivo bajo las condiciones de la región, de esta forma podrán comprometerse en la extracción de humus y generación de abono orgánico con mayor certeza.

Conclusiones de aportes a la línea de investigación:

De acuerdo con la línea de investigación “Desarrollo, modelación y análisis de producción industrial, tecnológica y social” del grupo de investigación GICI, el proyecto aporta el modelamiento matemático de la reproducción de la lombriz roja californiana, como apoyo al sector agroindustrial en el departamento Norte de Santander, en busca de predecir dicho comportamiento del animal para la diversificación de productos que surgen de la lombriz.

5.2 Producción asociada al proyecto

TIPO DE PRODUCTO	TITULO	EVENTO/INSTITUCIÓN	CERTIFICADO
Ponencia	OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE REPRODUCCIÓN DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA COMO ESTRATEGIA PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE PRODUCTOS EN BASE AL ANELIDO Y SU MONITOREO EN TIEMPO REAL	Instancia de investigación, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, jornada de capacitación docente	SI
Ponencia	Innovación tecnológica abierta en la industria 4.0	Jornadas de capacitación docente, Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez	SI
Artículo	Análisis de variables con influyen en la reproducción de la lombriz roja californiana	Revista cultura científica y tecnológica, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez	SI
Ponencia	Innovación tecnológica abierta en la industria 4.0	Semana de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez	SI
Artículo	FACTORS THAT AFFECT THE REPRODUCTION OF THE CALIFORNIAN RED WORM AND ITS MONITORING AS A STRATEGY FOR THE DIVERSIFICATION OF PRODUCTS IN EARTHWORMS	Sometido a evaluación en la revista Automatización y Montaje, en el marco del IV Congreso Internacional de la Red Radar en Perú	SI
Ponencia	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS FACTORES QUE AFECTAN LA REPRODUCCIÓN DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA	Segundo congreso internacional de investigación en ingeniería - IBERO	SI

TIPO DE PRODUCTO	TITULO	EVENTO/INSTITUCIÓN	CERTIFICADO
Ponencia con memorias	SISTEMA DE MONITOREO E IDENTIFICACION DE LAS CONDICIONES DE REPRODUCCIÓN DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA COMO ESTRATEGIA PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE PRODUCTOS EN BASE AL ANELIDO	2nd Steam Education Congress, Universidad Francisco de Paula Santander	SI
Ponencia	SISTEMA DE MONITOREO E IDENTIFICACION DE LAS CONDICIONES DE REPRODUCCIÓN DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA COMO ESTRATEGIA PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE PRODUCTOS EN BASE AL ANELIDO	Jornadas Académicas del Instituto Tecnológico de Zacatepec	SI
Consultoria	SISTEMA DE MONITOREO E IDENTIFICACION DE LAS CONDICIONES DE REPRODUCCIÓN DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA COMO ESTRATEGIA PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE PRODUCTOS EN BASE AL ANELIDO	Empresa Productos de la Hacienda	En proceso de firma

5.3 Líneas de trabajo futuras

Se considera muy importante evaluar el impacto o la influencia de la variable PH o acidez de la tierra donde se encuentran las lombrices, ya que existe muy poca literatura al respecto y puede ser una variable que mejore la exactitud del modelo matemático.

Referencias

- Analdex. (2021). Informe de exportaciones enero junio 2021. Obtenido de <https://www.analdex.org/2021/08/25/informe-de-exportaciones-enero-junio-de-2021/>
- Analdex. (2021). Informe de importaciones enero - junio 2021. Obtenido de <https://www.analdex.org/2021/08/25/informe-de-importaciones-enero-junio-de-2021/>
- Banco Mundial. (2022). Consumo de fertilizantes (kilogramos por hectárea de tierras cultivables). Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FERT.ZS?end=2018&start=1961&view=chart>
- Campoverde , D., Velasco, L., & Acurio, D. (2020). Application of organic substrates in the breeding of the Californian red worm (eisenia foetida) for the production of animal feed. Ciencia digital. Obtenido de <https://www.cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/ConcienciaDigital/article/view/1354>
- Cardenas, S. (2021). Efecto de la inoculación de Talaromyces sayulitensis HC1 y los aislamientos de Bacillus sp. 8AP1 y 14P, sobre el proceso de compostaje de residuos sólidos orgánicos. Bogotá: Javeriana.
- Castaldi, C., & Dosi, G. (2009). Cambio tecnológico y crecimiento económico: Algunas lecciones de pautas seculares y algunas conjeturas sobre el impacto actual de las TIC. México: Economía: teoría y práctica. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-33802009000300005
- Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético. Montreal: Comisión para la Cooperación Ambiental. Obtenido de <http://www.cec.org/files/documents/publications/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>
- Cronista. (04 de 2022). El precio de los fertilizantes en máximos históricos: qué significa para la economía. Obtenido de <https://www.cronista.com/economia-politica/el-precio-de-los-fertilizantes-en-maximos-historicos-que-significa-para-la-economia/>
- DANE. (2020). Encuesta de producción Agrícola. Bogotá: DANE.
- DANE. (2021). Encuesta Pulso social referencia julio 2021. Bogotá.

- DANE. (2022). Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – residuos sólidos (CAEFM-RS). Bogotá: DANE.
- Dimas, N. R., Ríos, P. C., Viramontes, U. F., Gil, A. P., Chávez, E. F., Reynal, V. d., y otros. (2008). Producción de tomate en invernadero con humus de lombriz como sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 265-272.
- Domínguez, J., & Brandón, M. G. (2010). Ciclos de vida de las lombrices de tierra aptas para el vermicompostaje. *Acta Zoológica Mexicana*, 309-320.
- Domínguez, J., Aira, M., & Brandón, M. G. (2009). El papel de las lombrices de tierra en la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes. *Ecosistemas*, 20-31.
- Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP. (2014). Nutrición Animal Aplicada. Argentina. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_curso_nutricin_animal_aplicada_2014.pdf
- FAO. (2022). uevas hipótesis sobre la seguridad alimentaria mundial basadas en el conflicto entre la Federación de Rusia y Ucrania. Obtenido de <https://www.fao.org/director-general/news/news-article/es/c/1476483/>
- Feijoo, A., Quintero, H., & Moreno, C. F. (2004). Patrón de distribución y listado de especies de las lombrices de tierra (annelida, oligochaeta) en Colombia. *Acta Zoológica Mexicana*, 197-220.
- Fragoso, C. (2001). Las lombrices de tierra de México (Annelida, Oligochaeta): diversidad, Ecología y manejo. *Acta Zoológica Mexicana*, 131-171.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). Una introducción a los conceptos básicos en seguridad alimentaria. FAO.
- García, M. C., Espinosa, M. G., López, C. N., & López, J. V. (2013). *Elaboración de abono orgánico a base de lombriz roja californiana*. Chiapas : Tercer Certamen Nacional "Universitarios por el Desarrollo Agrario".
- Gomes LFA, M., & LIMA, M. P. T. (1992). TODIM: Basics and application to multicriteria ranking of projects with environmental impacts. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 16(4), 113-127.
- Hernadez, A. (2021). Análisis de la gestión de residuos sólidos en Colombia. Bogotá: Universidad Militar.
- Hleap, J. Z., González, J., & F.Mora, M. (2012). evaluación bromatológica, sensorial y microbiológica de salchichas de tilapia roja con adición de harina de lombriz (*Eisenia foetida*). *Vitae*, S210-S212.
- Lolita Durán, C. H. (2009). Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en cinco sustratos organicos. *Agronomía Costarricense*, 275-281.
- LR. (9 de julio de 2015). Agronegocios. Obtenido de EN COLOMBIA LA LOMBRICULTURA ES UN NEGOCIO AÚN REDUCIDO Y QUE ESTÁ POR

DESARROLLARSE: [https://www.agronegocios.co/agricultura/lombricultura-un-negocio-que-esta-por-desarrollar-2620901#:~:text=fases%20de%20fertilizaci%C3%B3n.-,La%20lombricultura%20permite%20la%20producci%C3%B3n%20de%20compost%20y%20humus%20o,se%20resumen%20en%20abono%20org%](https://www.agronegocios.co/agricultura/lombricultura-un-negocio-que-esta-por-desarrollar-2620901#:~:text=fases%20de%20fertilizaci%C3%B3n.-,La%20lombricultura%20permite%20la%20producci%C3%B3n%20de%20compost%20y%20humus%20o,se%20resumen%20en%20abono%20org%20)

- Medina-Sauza, R. Á.-J.-A. (2019). Earthworms Building Up Soil Microbiota, a Review. Fontiers: México. Obtenido de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2019.00081/full>
- Murguía, M. L., Mamani, B. C., Tancara, H. P., Tintaya, D. H., Osorio, I. C., & Palero, B. C. (2010). Comportamiento de lombriz roja californiana y lombriz silvestre en bosta bovina y rumia bovina como sustrato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 555-565.
- Olle, M. (2019.). Review: Vermicompost, its importance and benefit in agriculture. J. Estonia: Agric Sci. Obtenido de https://agrt.emu.ee/pdf/2019_2_olle1.pdf
- Paco, G., Murguía, M. L., Mamani, F., & Sainz, H. (2011). Efecto de la Lombriz Roja Californiana (*Eisenia foetida*) durante el composteo y vermicomposteo en predios de la estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 24-31.
- Red de desarrollo sostenible. (2014). Red de desarrollo sostenible. Obtenido de Exceso de fertilizantes en el país afecta el bolsillo, el ambiente y la salud: <https://www.rds.org.co/es/novedades/exceso-de-fertilizantes-en-el-pais-afecta-el-bolsillo-el-ambiente-y-la-salud>
- Ricse, M., & Pinche, E. (2020). Evaluación de la influencia de fertilizantes químicos en la calidad de suelos agrícolas. Lima: Universidad Peruana Unión.
- Rodríguez, Á. R. (2012). *Producción y Calidad de Abono Orgánico por Medio de la Lombriz Roja Californiana (Eisenia Foetida) y su Capacidad Reproductiva*. Estados Unidos: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Toccalino, P. A., Roux, J. P., & Agüero, C. M. (2004). Comportamiento reproductivo de *Eisenia foetida* (Lombriz roja de California) durante las cuatro estaciones del año y alimentadas con distintos compostajes. *Cátedra de Zoología y Recursos Fáunicos*, 1-3.
- Toccalino, P., Agüero, M., Serebrinsky, C., & Roux, J. (2004). Comportamiento reproductivo de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) según estación del año y tipo de alimentación. *Rev. vet.*, 65-69.
- Trujillo, O., & Armas, D. (2021). Lombricultura, práctica y aprovechamiento a partir de residuos orgánicos. Bogotá: Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente UNAD.

- Universidad Nacional de Colombia. (2013). Agroquímicos envenenan los suelos en Colombia. UN periódico. Obtenido de en comparación con otros.
- Vázquez, E. G., Caratachea, A. J., Mondragón, A. J., & Sandoval, A. L. (2007). Dinámica poblacional de la lombriz *Eisenia foetida* en estiércol composteado y fresco de bovino y Ovino. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 1-8.
- Yagüe, J. L. (2000). *La crianza de la lombriz roja*. Madrid: Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.