

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE ZOOTECNIA



**“PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCHAR
A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS”**

Presentada por:

ENMER TRUJILLO ARANDA

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO ZOOTECNISTA**

Lima – Perú

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE ZOOTECNIA

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE NUTRICIÓN

**“PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOCHAR
A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS”**

Presentado por:

ENMER TRUJILLO ARANDA

Tesis para optar el Título Profesional de:

INGENIERO ZOOTECNISTA

Patrocinada por:

Mg. Sc. ALEJANDRINA SOTELO MENDEZ

SUSTENTADA Y APROBADA ANTE EL SIGUIENTE JURADO:

Dra. Gladys Carrión Carrera

PRESIDENTE

Blgo. Juan Juscamaita Morales

MIEMBRO

Ing. Marcial Cumpa Gavidia

MIEMBRO

Ing. Alejandrina Sotelo Méndez

PATROCINADORA

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a todas las personas que con su colaboración hicieron posible la presente investigación:

- A Ing. Mg. Sc. Alejandrina Sotelo Méndez, por haberme permitido contar con su patrocinio,
- A los miembros del jurado evaluador: Dra. Gladys Carrión Carrera, Ing. Mg. Sc. Marcial Cumpa Gavidia y al Blgo. Mg. Sc. Juan Juscamaita Morales por sus atinadas observaciones y recomendaciones.
- A Mg. Qim. Mary Flor Césare Coral, por su empeño y sugerencias en el tema de la investigación.
- Al equipo de Producción Pecuaria de pollos de San Fernando S.A. y al Ing. Ebert Jonathan Carrascal Arbaiza, por apoyar la realización de la investigación.

DEDICATORIA

A quienes,
se dedicaron incondicionalmente,
buscaron el bien en todo tiempo,
no esperaron una recompensa,
de los cuales soy deudor.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| ÍNDICE GENERAL..... | v |
| RESUMEN..... | xii |
| ABSTRACT..... | xiii |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1. GESTIÓN Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS..... | 3 |
| 2.2. ACTIVIDAD AVÍCOLA EN EL PERÚ..... | 4 |
| 2.2.1. CONTEXTO..... | 4 |
| 2.2.2. POBLACIONES DE AVÍCOLA..... | 5 |
| 2.3. RESIDUOS AVÍCOLAS..... | 6 |
| 2.3.1. DENOMINACIÓN Y TIPOS..... | 7 |
| 2.3.1.1. GALLINAZA..... | 7 |
| 2.3.1.2. POLLINAZA..... | 7 |
| 2.3.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS AVÍCOLAS..... | 8 |
| 2.3.3. CARACTERÍSTICAS DE RESIDUOS AVÍCOLAS..... | 9 |
| 2.3.4. GESTIÓN DE RESIDUOS AVÍCOLAS..... | 11 |
| 2.3.5. TRATAMIENTOS DE LOS RESIDUOS AVÍCOLAS..... | 13 |
| 2.3.5.1. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS..... | 13 |
| 2.3.5.2. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS..... | 14 |
| 2.3.6. IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS RESIDUOS AVÍCOLAS..... | 15 |
| 2.4. MARCO LEGAL..... | 17 |
| 2.5. EL BIOCHAR..... | 18 |
| 2.5.1. DEFINICIÓN..... | 18 |
| 2.5.2. FUENTES DEL BIOCHAR..... | 19 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.5.3. | PIROLISIS DE LA BIOMASA | 20 |
| 2.5.3.1. | PROCESOS DE PIROLISIS..... | 22 |
| 2.5.3.2. | PRODUCTOS DE LA PIROLISIS..... | 25 |
| 2.5.4. | EMPLEO DEL BIOCHAR | 25 |
| 2.5.5. | DOSIS Y MODALIDAD DE APLICACIÓN EN EL CAMPO..... | 27 |
| 2.5.6. | BIOENSAYOS DE TOXICIDAD | 28 |
| III. | MATERIALES Y MÉTODOS | 29 |
| 3.1. | LOCALIZACIÓN..... | 29 |
| 3.2. | MATERIALES Y EQUIPOS | 30 |
| 3.2.1. | MATERIALES DE CAMPO | 30 |
| 3.2.2. | MATERIALES PARA BIOENSAYO DE TOXICIDAD | 30 |
| 3.2.3. | EQUIPOS Y MATERIALES DE PRODUCCIÓN DEL BIOCHAR..... | 31 |
| 3.3. | METODOLOGÍA | 33 |
| 3.3.1. | SELECCIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS..... | 33 |
| 3.3.2. | PRODUCCIÓN DEL BIOCHAR | 33 |
| 3.3.3. | CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS Y DEL BIOCHAR | 36 |
| 3.3.4. | PRUEBA DE BIOENSAYO..... | 38 |
| 3.3.5. | DISEÑO EXPERIMENTAL | 39 |
| 3.3.6. | ANÁLISIS ESTADÍSTICOS | 41 |
| IV. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 42 |
| 4.1. | HORNO PIROLITICO PILOTO..... | 42 |
| 4.1.1. | DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL HORNO..... | 42 |
| 4.1.2. | CONDICIONES OPERACIONALES DEL HORNO | 43 |
| 4.2. | CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS..... | 43 |
| 4.2.1. | ANÁLISIS INMEDIATO | 43 |
| 4.2.2. | ANÁLISIS ELEMENTAL..... | 44 |
| 4.3. | PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR | 45 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.3.1. | ANÁLISIS FÍSICO ELEMENTAL | 45 |
| 4.3.2. | ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL | 48 |
| 4.3.3. | ANÁLISIS PROXIMAL | 52 |
| 4.3.4. | ANALISIS DE LOS NUTRIENTES | 54 |
| 4.4. | ANÁLISIS DE BIOENSAYO DE GERMINACIÓN | 64 |
| V. | CONCLUSIONES | 69 |
| VI. | RECOMENDACIONES | 70 |
| VII. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 71 |
| VIII. | ANEXOS | 80 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Saca de animales vivos avícolas por crianza según año 2011-2015 | 5 |
| Tabla 2: Pollos vivos, gallinas ponedoras por región..... | 6 |
| Tabla 3: Producción de excrementos frescos | 9 |
| Tabla 4: Estimaciones sobre los contenidos de nutrientes de la gallinaza y pollinaza..... | 10 |
| Tabla 5: Caracterización de residuos avícolas de la granja de aves de UNALM..... | 10 |
| Tabla 6: Contenido de microorganismos gallinaza fresca..... | 11 |
| Tabla 7: Comparación de rendimientos de las fracciones de proceso termoquímico | 21 |
| Tabla 8: Relación de contenido de análisis y metodología aplicada | 37 |
| Tabla 9: Tratamientos de los residuos avícolas para su caracterización. | 40 |
| Tabla 10: Variables empleados en la investigación. | 40 |
| Tabla 11: Distribución de dosis del biochar para pruebas de ensayos. | 41 |
| Tabla 12: Caracterización de los residuos avícolas de análisis inmediato | 43 |
| Tabla 13: Caracterización química de los residuos avícolas | 44 |
| Tabla 14: Análisis físico elemental del biochar..... | 46 |
| Tabla 15: Análisis químico elemental del biochar resultante..... | 49 |
| Tabla 16: Análisis del contenido de materia inorgánica del biochar..... | 53 |
| Tabla 17: Correlacione entre contenido fisicoquímico del biochar..... | 61 |
| Tabla 18: Resumen de análisis de variables de investigación de biochar | 63 |
| Tabla 19: Indicadores de bioensayos de toxicidad de los biochar..... | 65 |
| Tabla 20: Crecimiento de tallo y peso fresco de plántulas de semillas de rabanito | 66 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Evolución de la producción de carne de pollo 2007-2016..... | 4 |
| Figura 2: Impacto ambiental de residuos avícolas sin tratamiento..... | 15 |
| Figura 3: Riesgos potencialmente producidos en una granja avícola..... | 16 |
| Figura 4: Descomposición de la biomasa por efectos del calor de combustión | 23 |
| Figura 5: Pirolisis de la hemicelulosa..... | 23 |
| Figura 6: Pirolisis de la celulosa..... | 24 |
| Figura 7: Pirolisis de la lignina..... | 24 |
| Figura 8: Estufa gasificadora de biomasa anila | 31 |
| Figura 9: Horno piloto para la producción de biochar..... | 32 |
| Figura 10: Materias primas seleccionados para la producción de biochar | 33 |
| Figura 11: Proceso de producción y muestras del biochar | 35 |
| Figura 12: Pruebas de ensayo de biochar de gallinaza y pollinaza | 39 |
| Figura 13: Muestras representativas de biomasa residual y respectivo biochar | 45 |
| Figura 14: Rendimiento y densidad aparente del biochar | 47 |
| Figura 15: Carbono orgánico total y valores del pH | 50 |
| Figura 16: Humedad y cenizas del biochar | 52 |
| Figura 17: Contenidos de nitrógeno y fósforo total..... | 54 |
| Figura 18: Contenidos de potasio y sodio | 56 |
| Figura 19: Contenidos de calcio y magnesio..... | 57 |
| Figura 20: Contenidos de cobre y hierro..... | 58 |
| Figura 21: Contenidos de manganeso y cinc | 59 |
| Figura 22: Índice de germinación en los cuatro tratamientos del biochar..... | 65 |
| Figura 23: Crecimiento de tallo de plántulas a diferentes tratamientos del biochar..... | 67 |
| Figura 24: Peso fresco de la longitud del crecimiento de las plántulas | 67 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| ANEXO 1: Diseño estructural del horno piloto.. | 81 |
| ANEXO 2: Costo de diseño y elaboración del horno piloto. | 82 |
| ANEXO 3: Tabla resume de datos del proceso de pirolisis de residuos avícolas. | 82 |
| ANEXO 4: Cuadro de resumen de Bioensayo | 83 |
| ANEXO 5: Resumen del análisis de varianza de los variables de investigación..... | 84 |

GLOSARIO

Biocarbón: sinónimo de carbón vegetal, es un material sólido obtenido de la carbonización de la biomasa a través de un proceso denominado pirolisis.

Biochar: (de origen inglés, a partir de bio- y charcoal, "carbón vegetal"; también llamado 'biocarbón' en español) es el nombre que recibe el carbón vegetal cuando es empleado como enmienda para el suelo.

Biomasa residual: es la derivada de residuos o subproductos de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, así como de los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera.

Gallinaza: es la mezcla de heces y orina que se obtiene de la gallina o pollo enjaulado.

Pollinaza: conocida también como la gallinaza de piso, es la mezcla de heces y orina de pollos de engorde con la cama.

Pirolisis: es un proceso de conversión termoquímica que convierte la biomasa en combustibles útiles (ácidos piroleñosos, gases y biocarbones) mediante calentamiento a temperaturas moderadamente alta (350-650°C) y en ausencia de oxígeno.

Horno pirolítico: es un instrumento piloto de tecnología medioambiental para el aprovechamiento energético de la biomasa mediante pirolisis.

Valorización: procedimiento de separación selectiva, que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios a la salud pública y al ambiente.

RESUMEN

Para la valorización y reutilización de los residuos del sector agrario, es necesario buscar una tecnología adecuada de aplicación a este propósito. La pirolisis, una tecnología medioambiental para la gestión de biomasa residual, obtención de biocombustibles, fracción gaseosa y producción de fracción sólida denominado biochar (biocarbón). En el presente trabajo de investigación los residuos orgánicos provenientes de granjas avícolas, fueron sometidos a tratamientos de operaciones de valorización energética con la finalidad de aprovechar su potencial energético y de enmienda de los suelos agrícolas a través de pirolisis lenta en horno piloto, térmicamente auto-sostenible y móvil a escala de demostración con capacidad máxima de 5 Kg. Durante la etapa de producción se midieron los parámetros del proceso, tales como la temperatura del horno, rendimientos y densidad del material resultante. Previo a la pirolisis, los materiales de entrada (gallinaza y pollinaza) se caracterizaron para determinar los contenidos de pH, humedad, cenizas, carbono orgánico total y contenidos de los macro y micronutrientes. De la misma forma el biochar resultante, fue caracterizado para conocer las propiedades físicas y químicas más importantes. Al evaluar sus propiedades del biochar se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre la pollinaza y gallinaza en rendimientos, densidad, pH, humedad, cenizas, nitrógeno, fósforo total, calcio, magnesio y fierro. Posteriormente los biocarbones fueron sometidos a las pruebas de bioensayo para determinar el índice de crecimiento de las semillas y el crecimiento de los tallos de los primeros diez días. En las pruebas de ensayo el indicador del índice de germinación, el biochar de la gallinaza resultó significativo con el tratamiento del 3% y como consecuencia la longitud de crecimiento de los tallos de las plántulas fue significativa.

Palabras clave: Biochar, pirolisis, caracterización, residuos orgánicos avícolas, operaciones de valorización energética.

ABSTRACT

For the recovery and reuse of waste from the agricultural sector, it is necessary to look for a suitable technology of application for this purpose. Pyrolysis, an environmental technology for the management of residual biomass, obtaining biofuels, gas fraction and production of solid fraction called biochar. In this research work organic waste from poultry farms, were subjected to treatments of energy recovery operations in order to exploit its energy potential and amendment of agricultural soils through slow pyrolysis in pilot furnace, thermally self-heating sustainable and mobile demonstration scale with a maximum capacity of 5 Kg. During the production stage, the parameters of the process were measured, such as furnace temperature, yields and density of the resulting material. Prior to pyrolysis, the input materials (chicken manure and pollinaza) were characterized to determine the contents of pH, moisture, ash, total organic carbon and contents of macro and micronutrients. In the same way the resulting biochar was characterized to know the most important physical and chemical properties. When evaluating its biochar properties, there were statistically significant differences between pollination and poultry in yield, density, pH, moisture, ash, nitrogen, total phosphorus, calcium, magnesium and iron. Subsequently, the biocharts were submitted to bioassay tests to determine the seed growth index and stem growth for the first ten days. In the test, the indicator of germination index the biochar of the hens was significant with the treatment of 3% and consequently the growth length of the stalks of the seedlings was significant.

Key words: Biochar, pyrolysis, characterization, organic poultry waste, energy recovery operations.

I. INTRODUCCIÓN

La generación y gestión de los residuos constituyen un problema ambiental grave de las sociedades modernas. El abandono o la gestión inadecuada de los residuos producen impactos notables en los medios receptores y pueden provocar contaminación en el agua, en el aire, contribuir al cambio climático y afectar a los ecosistemas y a la salud humana. Sin embargo, cuando los residuos se gestionan de forma adecuada se convierten en recursos que contribuyen al ahorro de materias primas, a la conservación de los recursos naturales, del clima y al desarrollo sostenible (Martínez, 2014).

Con el fin de minimizar los efectos perjudiciales de la producción de residuos, favorecer el uso eficiente de los mismos, según García (2011), se debe adoptar alternativas de gestión de preferencia a la prevención, seguida de la preparación para la reutilización, el reciclado (o la valorización material), otras operaciones de valorización (incluyendo la valorización energética); y, finalmente, la eliminación (que incluye la incineración sin recuperación de energía y el vertido).

Esta investigación atiende medidas adecuadas de disposición de la gallinaza y pollinaza y presenta una alternativa para su uso. Una nueva forma de aprovechamiento de este material con potencial de conversión de residuo a recurso, en vez de ser considerada un costo para la empresa, como sostiene Machín (2007), puede ser una alternativa eficaz para su comercialización y manejo acordes con el ambiente, además para la empresa generar mayor competitividad por la forma en cómo se realiza el manejo de estos residuos.

Una de las alternativas para la reutilización de los residuos avícolas es la producción del biochar (biocarbón). El biochar tiene su origen en la transformación mediante la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica (pirolisis) de biomasa a temperaturas de 350-500°C, lo que produce energía y un producto de grano fino y poroso (carbón vegetal) rico en carbono (Mayor, 2010 y Abenza, 2012).

El estudio, producción y aplicación del biochar como una enmienda de los suelos a partir de la biomasa residual es una propuesta para mejorar la fertilidad edáfica. Las empresas agropecuarias pueden incrementar el valor agregado de los subproductos orgánicos, con esta nueva alternativa de reutilización de los residuos avícolas, práctica segura, viable y sustentable mientras sea precedida de un tratamiento eficiente (control y eliminación de la patogenicidad de los microorganismos presentes en los residuos avícolas).

El objetivo general de esta investigación es producir el biochar a partir de residuos orgánicos avícolas, evaluar y comparar su calidad en base a la composición, características y propiedades físicas y químicas. Para ello se consideró los siguientes objetivos específicos:

- Diseño y desarrollo a nivel de campo de un horno pirolítico piloto para la producción requerida de biochar.
- Determinar las condiciones operacionales del proceso de pirolisis lenta y establecimiento de los parámetros óptimos y determinantes para la producción de biochar.
- Evaluar la aplicación del biochar mediante la realización de bioensayos para determinar del índice de germinación e incentivar su aplicación en los suelos agrícolas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. GESTIÓN Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS

Una gestión inadecuada de los residuos, tanto de origen industrial como de origen doméstico puede producir impactos negativos en el medio ambiente como la contaminación atmosférica, la contaminación de las aguas y del suelo, además de contribuir al cambio climático y de afectar a los ecosistemas y a la salud humana (Cueto, 2016).

El deterioro progresivo del medio ambiente, según Hernández (2014), es uno de los temas de mayor preocupación. El desarrollo y crecimiento económico y tecnológico de la sociedad han conllevado un incremento exponencial de los residuos generados. Bruvold (1998) sostiene que, el deterioro ambiental son múltiples: inicia desde los problemas locales a problemas globales, desde la contaminación inmediata hasta acumulación de sustancias tóxicas a largo plazo, desde el uso excesivo de materias primas a costa de futuras generaciones a la preocupación por la gestión de los residuos generados.

Ante el deterioro ambiental existe una tendencia en modificar el actual crecimiento de la generación de residuos mediante la regulación de la gestión y manejo de los residuos sólidos generados en el Sector Agrario, en forma sanitaria y ambientalmente adecuada, así como la protección de la salud y el bienestar de la persona humana, contribuyendo al desarrollo sostenible del país (Decreto Supremo N° 016-2012-AG). Para alcanzar el objetivo de aprovechamiento sustentable de los residuos, según Sánchez (2008), se deben aplicar modernas y sustentables tecnologías para el reciclaje y aprovechamiento, comercialización de los productos recuperados.

El Decreto Legislativo N° 1278 es el que se adapta mejor a nuestro tema de investigación porque considera el residuo un valor. La valorización consiste en operaciones cuyo objetivo es que el residuo, uno o varios de los materiales que lo componen, sean

reaprovechados, su valoración puede ser material o energética. Valoración material si se constituyen operaciones para su reutilización, reciclaje, compostaje a través de procesos de transformación física, química u otros, demuestren su viabilidad técnica, económica y ambiental. Mientras la valoración energética consiste en el empleo de los residuos con la finalidad de aprovechar su potencial energético en base a procesos de biodegradación, biochar (Art. 47-48 del Decreto Legislativo N° 1278).

2.2. ACTIVIDAD AVÍCOLA EN EL PERÚ

2.2.1. CONTEXTO

El sector avícola peruano es clave en el desarrollo del Perú, representa el 28% del total de la producción agropecuaria del país y es responsable del 65% de la ingesta de proteína de origen animal. En los últimos años hay una tendencia de crecimiento a una tasa de 7.8% anual (Asociación Peruana de Avicultura-APA, 2016).

La evolución de la producción de la carne de pollo aumentó en 10 años de 770 a 1694 MT. El incremento anual desde el año 2007 al 2016 se muestra en la Figura 1:

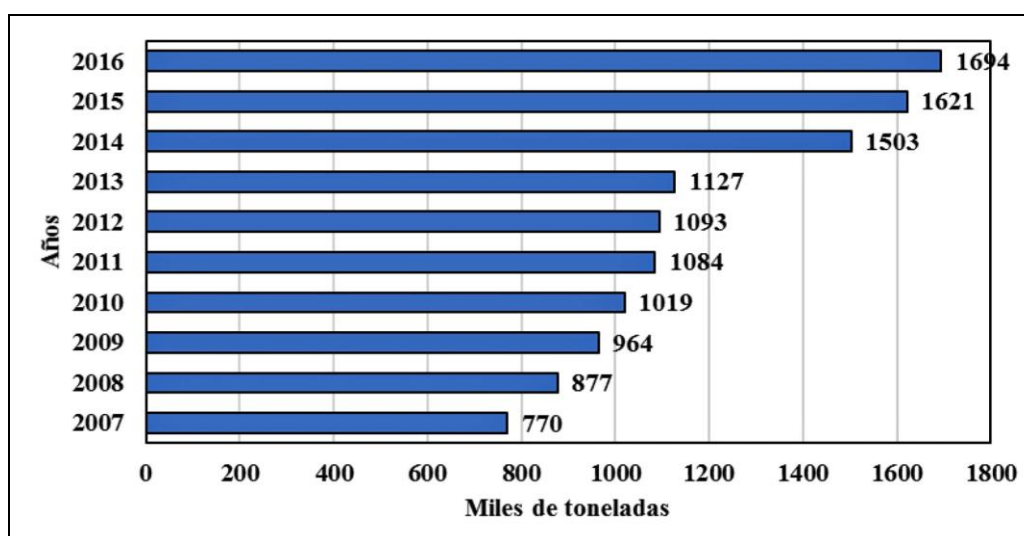


Figura 1: Evolución de la producción de carne de pollo 2007-2016

FUENTE: Ministerio de Agricultura y Riego (2017).

Según la APA, proveedores del 80% de la oferta avícola en el país, confirma que esta tendencia sigue la misma línea la demanda por carne de pollo a nivel nacional, a lo que se suma la tendencia positiva en el consumo de alimentos fuera del hogar - uno de los más altos en la región - en restaurantes y pollerías.

2.2.2. POBLACIONES DE AVÍCOLA

La producción avícola -que incluye la producción de pollos, pavos, y patos- produjo una saca de animales por crianza de 612,072 (Miles de unidades) durante el año 2015. Según el Ministerio de Agricultura y Riego, la población de saca de animales vivos como pollo, pavo y pato desde 2011 al 2015 ha tenido comportamiento positivo con una variación para pollos del 5,0 %, mientras de 3.8% del año 2014 al 2015 como se observa en la Tabla 1:

Tabla 1: Saca de animales vivos avícolas por crianza según año 2011-2015
(Miles de unidades)

| CRIANZAS | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Var. % 2011-2015 | Var. % 2015/2014 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Animales vivos | | | | | | | |
| Pollo | 499,268 | 542,753 | 560,807 | 585,090 | 607,087 | 5,0 | 3,8 |
| Pavo | 2,932 | 3,152 | 3,253 | 3,402 | 3,545 | 4,9 | 4,2 |
| Pato | 1,275 | 1,285 | 1,326 | 1,386 | 1,440 | 3,1 | 3,8 |

FUENTE: SIEA Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola y Ganadera (2015).

Según el Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias del MINAGRI la saca de pollos vivos de carne a nivel nacional fue de 607,087 (miles de unidades), y para las gallinas ponedoras 23,883.3 (miles de unidades) como se observa en la Tabla 2. Las regiones de Lima, La Libertad y Arequipa representan los mayores productores de saca de pollos vivos (73.2%); mientras Ica, La Libertad y Lima representan el 72.2% en la producción de gallinas ponedoras. La costa peruana ofrece uno de los mejores climas del mundo para la crianza de

aves, es por lo cual la avicultura se desarrolla mayormente en la costa que aprovecha terrenos improductivos incorporándolos a la actividad económica (Carhuancho, 2012).

Tabla 2: Pollos vivos, gallinas ponedoras por región según variables productivas 2015 (significativo a nivel nacional).

| Región | POLLOS VIVOS | | | | GALLINAS PONEDORAS | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | Saca (miles de unidades) | | Producción (toneladas) | | (miles de unidades) | |
| | 2015 | Part. % 2015 | 2015 | Part. % 2015 | 2015 | Part. % 2015 |
| NACIONAL | 607,087 | 100,0 | 1621,774 | 100,0 | 23,883.3 | 100,0 |
| Ancash | 13,705 | 2,3 | 36,630 | 2,3 | 192,1 | 0,3 |
| Arequipa | 62,314 | 10,3 | 166,493 | 10,3 | 732,2 | 3,1 |
| Ica | 24,855 | 4,1 | 66,420 | 4,1 | 7,925.5 | 36,4 |
| Junín | 4,560 | 0,8 | 12,174 | 0,8 | 191,6 | 0,4 |
| La Libertad | 118,916 | 19,6 | 317,618 | 19,6 | 4,056.0 | 18,2 |
| Lambayeque | 7,783 | 1,3 | 20,825 | 1,3 | 502,7 | 2,0 |
| Lima | 261,104 | 43,0 | 702,327 | 43,3 | 3,946.6 | 17,6 |
| Lima Metropolitana | 49,807 | 8,2 | 128,310 | 7,9 | 2,274.4 | 10,7 |
| Loreto | 11,038 | 1,8 | 29,482 | 1,8 | 329,1 | 1,0 |
| Madre de Dios | 2,866 | 0,5 | 7,655 | 0,5 | 153,0 | 0,6 |
| Piura | 12,877 | 2,1 | 34,417 | 2,1 | 402,2 | 1,3 |
| San Martín | 15,257 | 2,5 | 40,712 | 2,5 | 747,3 | 3,0 |
| Tacna | 10,952 | 1,8 | 29,252 | 1,8 | 282,2 | 1,2 |
| Ucayali | 8,154 | 1,3 | 21,734 | 1,3 | 276,7 | 1,1 |

FUENTE: Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (SIEA).
Anuario Estadístico de la Producción agrícola y Ganadera (2015).

2.3. RESIDUOS AVÍCOLAS

La producción intensiva genera residuos avícolas en: granjas de material genético (Reproductoras), comerciales (Ponedoras- Pollos de engorde) y en plantas incubadoras y de beneficio. Entre los residuos orgánicos o subproductos se generan: la gallinaza, pollinaza, sangre, grasas, vísceras no comestibles, huesos, plumas, queratinas, cáscaras de huevo, huevos no eclosionados y rechazados, mortalidades, pollitos rechazados, gallinas rechazadas, aguas residuales. Según Estrada (2005), estos residuos pueden convertirse en subproductos de alta calidad y de valor comercial.

2.3.1. DENOMINACIÓN Y TIPOS

2.3.1.1. GALLINAZA

Actualmente, se conoce como gallinaza la mezcla de heces y orina que se obtiene de la gallina o pollo enjaulado, a la que se une la porción no digerible de los alimentos, células de descamaciones de la mucosa del aparato digestivo, productos de secreción de las glándulas, microorganismos de la biota intestinal, diversos sales minerales, plumas y un porcentaje ínfimo de material extraño.

Según los investigadores Delgado *et al.* (2007) son el producto de la fermentación de los excrementos de aves, es uno de los residuos orgánicos utilizados actualmente en la agricultura como alternativa a la fertilización orgánica tradicional con estiércol clásico. Estrada (2005), describe a los estiércoles acumulados en galpones al término del ciclo productivo con alto contenido de humedad y altos niveles de nitrógeno, que se volatilizan rápidamente, creando malos y fuertes olores, perdiendo calidad como fertilizante. Estos residuos, sostiene Jaramillo (2016), pueden ser fácilmente descompuestos por los microorganismos.

2.3.1.2. POLLINAZA

La pollinaza, conocida también como la gallinaza de piso, es la mezcla de heces y orina de pollos de engorde con la cama. La cama (cascarilla de arroz, café, viruta de madera) tiene la función de recibir las excretas, restos de alimento, mucosa intestinal descamada, plumas, etc. para facilitar su secado y posterior manejo (Henríquez *et al.*, 2006). Esta materia prima tiene la ventaja de estar disponible durante todo el año a bajo costo (Alvarado *et al.*, 2009).

Castellanos y Murguía (2002) indican que la pollinaza durante su almacenamiento reduce gradualmente el contenido microbiológico y de esta manera disminuye su poder contaminante. Sin embargo, por su alto contenido nitrógeno, Guevara *et al.* (2016) señalan que pueden servir de sustrato a la cría de moscas y generar malos olores, por lo que de acuerdo a la legislación vigente debe ser tratado antes de su aplicación a los suelos.

Lo mismo que el estiércol, contiene todos los nutrientes básicos indispensables para las plantas, pero en mucha mayor cantidad. El estudio de la FAO (1980) describe la composición física de la pollinaza como sigue: 62% de heces, 31% de cama, 3% de alimento desperdiciado, 2% de plumas y 2% de materia extraña con relación a materia fresca.

Según Rodríguez (2002), su composición química es altamente variable, existiendo numerosos factores tales como: naturaleza y cantidad del material absorbente por unidad de superficie, densidad de aves, longitud de la crianza, número de crianzas sobre esa cama, nivel de nutrición de las aves, factores ambientales y tipo de piso.

2.3.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS AVÍCOLAS

Sims *et al.* (2005) indican que, la mayoría de las explotaciones avícolas crea ciertos problemas de gestión del estiércol de pollo o gallinaza, su intensificación genera una cantidad cuyo almacenamiento temporal ha originados en muchos casos problemas ambientales asociados (malos olores, lixiviación de nutrientes, etc.).

La cantidad y características de la gallinaza dependen de diversos factores. Estos incluyen: el tipo de pollo, edad y raza, la concentración de aves, el valor nutritivo de alimentos, el tipo y la cantidad de alimento, el tipo y la cantidad de paja de la cama, contenido de humedad de la cama, tipo de suelo, e incluso las condiciones climáticas durante la acumulación de estiércol, así como de las prácticas de gestión agrícola (Williams, 2013).

Para los investigadores De Lucas *et al.* (2012) los heces producidos por cada animal varía de acuerdo a la especie, la raza, la alimentación, la estación climática, etc. con valores medios que van desde 0,1- 0,5 kg heces/día para las aves. Desde el punto de vista puramente teórico, por cada kilo de alimento consumido los pollos producen alrededor de 1.1 a 1.2 kg de deyecciones frescas, con el 70-80% de humedad.

Son numerosas las investigaciones sobre generación de residuos en la producción intensiva de los animales. En la siguiente Tabla 3 se reportan la producción de excrementos frescos:

Tabla 3: Producción de excrementos frescos

| | Peso del animal (Kg) | Cantidad de excrementos/día (kg) | Peso vivo (%) |
|-----------------|-----------------------------|---|----------------------|
| Pollos de carne | 1-2,5 | 0,10-0,17 | 6-8 |
| Ponedoras | 2-2,5 | 0,15-0,25 | 7-12 |
| Pavos | 6-12 | 0,40-0,70 | 6-7 |

FUENTE: Residuos Ganaderos. AGENEX-Agencia Extremeña de la Energía (2010).

La cantidad de residuos a nivel nacional, para la población de pollos vivos para el año 2015 (Tabla 2) es aproximadamente 607 millones de pollos vivos. Considerando que cada pollo produce entre 150 g de estiércol/día promedio (Tabla 3) la producción anual de pollinazas para el año 2015 fue de 33.2 mega toneladas/año. Para la gallinaza, considerando que cada gallina produce un promedio de 200 g de estiércol/día (Tabla 3), para la población de gallinas ponedoras del año 2015 (Tabla 2) produce 1.7 mega toneladas/año de gallinazas.

2.3.3. CARACTERÍSTICAS DE RESIDUOS AVÍCOLAS

El estiércol de gallina o más conocido como la gallinaza tiene alto contenido de humedad si provienen de ponedoras en baterías o naves. Como fertilizante orgánico es uno de los componentes que tiene origen natural y que dispone de mayor número de nutrientes. La gallinaza dispone de altos niveles de nitrógeno y cantidades de carbono que son empleadas en el proceso de conversión al humus que sirve como fertilizante. Para abonar las plantas es muy útil un fertilizante con gran contenido en materia orgánica y la gallinaza es de los mejores fertilizantes conocidos.

Algunos nutrientes del estiércol de importancia ambiental, que pueden variar en función de la composición de los ingredientes de la alimentación de las aves, especialmente si las aves se alimentan total o parcialmente de desechos. Según Williams (2013) el contenido de nutrientes estimados se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4: Estimaciones sobre los contenidos de nutrientes de la gallinaza y pollinaza (Kg/tonelada de heces excretada).

| | Nitrógeno | Fósforo (como pentaóxido de fósforo) | Cobre | Cinc |
|---------------------------------|------------------|---|--------------|-------------|
| Gallinaza de gallinas ponedoras | 13,5 | 10,5 | 0,01 | 0,07 |
| Gallinaza de pollos para carne | 13,0 | 8,0 | 0,01 | 0,04 |

FUENTE: FAO. Williams (2013).

La caracterización físicoquímicos de gallinaza de jaula, gallinaza de piso y mezcla de ambas gallinazas de la Granja de Aves de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) como se observa en la Tabla 5, muestra variación de pH entre 6.2 a 6.5 en escala ligeramente ácida, el contenido de carbono y nitrógeno en la gallinaza de piso superior a la gallinaza de jaula y la mezcla de gallinazas, mientras los contenidos de materia orgánica son mayores en la gallinaza de piso y se observan diferencias en humedad y sólidos totales (Carhuancho, 2012).

Tabla 5: Caracterización de residuos avícolas de la granja de aves de UNALM

| Parámetros | Gallinaza de jaula | Gallinaza de piso | Mezcla gallinazas |
|---|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| pH | 6.45 | 6.38 | 6.21 |
| Conductividad (dS/m) | 18.30 | 14.60 | 16.40 |
| Humedad (%) | 60.88 | 26.08 | 40.30 |
| Sólidos totales (%) | 31.37 | 93.12 | 59.41 |
| Materia orgánica (%) | 54.66 | 66.72 | 61.23 |
| Carbono orgánico (%) | 31.71 | 38.70 | 35.52 |
| Nitrógeno (%) | 3.24 | 3.37 | 3.23 |
| Relación C/N | 9.79 | 11.48 | 11.00 |
| Potasio (K ₂ O %) | 3.14 | 2.89 | 2.58 |
| Fósforo (P ₂ O ₅ %) | 4.77 | 4.94 | 4.85 |

FUENTE: Carhuancho (2012). Laboratorio LAPSF (2011).

La pollinaza procedente de los pollos de engorde presenta un menor contenido en nutrientes debido a que están mezclados con una cama de bajo contenido de nutriente, solo existen diferencias significativas para el N, Ca, Fe y Mn. Con respecto a los metales pesados, existen diferencias significativas para todos excepto en Pb y el Cd. (Delgado *et al.*, 2007).

García *et al.* (2005) estudiaron la dinámica microbiana de la gallinaza en estiércol, cuyos resultados de las bacterias viables totales, los lactobacilos, levaduras y coliformes fueron contabilizados en los medios agar rocosa, maltosa Sabouraud y violeta bilis. Los resultados se observan en la Tabla 6.

Tabla 6: Contenido de microorganismos gallinaza fresca

| Indicadores | MS % | pH | Bacterias viables T ucf/g | Lactobacilos ucf/g | Levaduras ucf/g | Coliformes ucf/g |
|--------------------|-----------------|-----------|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Gallinaza | 21.78 | 7.80 | 1.19×10^{10} | 1.81×10^9 | 9.6×10^7 | 5.67×10^9 |

FUENTE: García *et al.* (2005).

El pH es un parámetro que condiciona la presencia de microorganismos, ya que los valores extremos son perjudiciales para determinados grupos. En el proceso de compostaje de los residuos avícolas hay un aumento de pH causado por la liberación de nitrógeno amoniacal, eso trae como consecuencia un pH básico extremo que afecta el equilibrio ácido-base que influye en la conservación del nitrógeno (Tiquia *et al.*, 2002).

2.3.4. GESTIÓN DE RESIDUOS AVÍCOLAS

La gestión integral de los residuos, según el Decreto Legislativo N° 1278, es “*toda actividad técnica administrativa de planificación, coordinación, concertación, diseño, aplicación y evaluación de políticas, estrategias, planes y programas de acción de manejo apropiado de los residuos sólidos*”.

Una gestión inadecuada, según Dupuis (2008), supone un problema medioambiental, que origina un deterioro progresivo y acumulativo del entorno, lo que puede constituir, en ciertos casos, un problema de higiene pública. Entre las formas incorrectas de gestión destacan la quema indiscriminada de residuos, el vertido de residuos y el abandono de los restos en el campo éste último es una práctica no recomendable por el riesgo de propagación de plagas y enfermedades que ponen en peligro a la salud de las personas de los animales y del medio por los malos olores que emiten.

Para los investigadores García *et al.* (2010) en una explotación intensiva es necesario en primer lugar identificar los puntos del proceso productivo que pueden producir riesgos de emisiones de contaminantes para plantear estrategias de reducción o minimización de impactos.

Barres (2012) indica que los residuos avícolas deben ser gestionados en forma semejante a otras actividades: quedan prohibidas el abandono, el vertido y la eliminación incontrolada, incluida la quema, excepto las de los restos vegetales, cuando la gestión esté controlada. Los poseedores de los residuos están obligados, siempre que no proceden a gestionarlos por sí mismos, a entregarlos a un gestor de residuos, para su valorización o eliminación, o a participar en un acuerdo voluntario o convenio de colaboración que comprenda estas operaciones.

Los residuos agrarios se diferencian de los residuos domésticos por el hecho de que la responsabilidad de su gestión incumbe integralmente a su poseedor, quien debe costear su correcta gestión. Y los daños producidos por la inadecuada gestión y manejo de los generadores, operadores de residuos, municipalidades y de quienes intervengan en el manejo son responsables su la administración, civil y penal según corresponda (Art. 58. D. L. N° 1278).

De conformidad con la Ley N° 28611 (Ley general del Ambiente), el generador, empresa prestadora de servicios y operadores están obligados a adoptar medidas para su restauración, rehabilitación mediante estrategias y acciones que conducen a la valorización de los residuos como primera opción de gestión. Para Cabaleiro (2013), la opción muy común de valorización de los residuos ganaderos, es su aplicación en forma de enmiendas, abonos orgánicos o como sustratos de cultivo. Esta opción busca reducir el incremento

progresivo de su producción y disminuir a un mínimo impacto ambiental en su eliminación.

2.3.5. TRATAMIENTOS DE LOS RESIDUOS AVÍCOLAS

Cabaleiro (2013) señala que el manejo o tratamiento que se realice de los residuos de la producción avícola deben garantizar la reducción del potencial impacto ambiental y sanitario evitando el destino final en vertederos o almacenamientos inadecuados. Dependiendo del desarrollo tecnológico de cada país se emplean diferentes métodos para tratar el estiércol de granjas avícolas basadas en procesos biológicos y termoquímicos realizados en diversos escenarios de gestión.

2.3.5.1. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos a los residuos son llevados a cabo por microorganismos en diferentes condiciones ambientales (temperatura, pH y presencia o ausencia de aire, fundamentalmente). Según Cueto (2016), los tratamientos biológicos se pueden dividir en tres grandes grupos:

- Digestión anaerobia: denominado biometanización, es un proceso biológico acelerado artificialmente, que tiene lugar en condiciones muy pobres de oxígeno o en su ausencia total, sobre sustratos orgánicos. Este método genera distintos gases dependiendo del material degradado, entre los cuales, el dióxido de carbono y el metano son los más abundantes.
- Compostaje: se trata del proceso de descomposición biológica aeróbica y termófila de diversos tipos de materiales orgánicos y que da lugar a diferentes tipos de enmiendas orgánicas, entre ellas el compost (Cueto, 2016).
- Fermentación: es el proceso por el cual los microorganismos se propagan en un medio de crecimiento (azúcar) y cuyo resultado es la producción de CO₂ y alcoholes.

2.3.5.2. TRATAMIENTOS TERMOQUÍMICOS

Los tratamientos termoquímicos se basan en transformaciones químicas debido al aumento de temperaturas y se pueden dividir en los siguientes tipos:

- Deshidratación: con el deshidratado se puede conseguir un estiércol más rico en nutrientes, pudiéndose emplear como fertilizante o ingrediente en la alimentación del ganado.
- Carbonización: Proceso por el cual, el estiércol de pollo es secado, molido, pasado por un horno rotatorio y por último por una cámara de enfriamiento. Con estas cuatro fases se consigue obtener carbono activado, esencialmente en el horno rotativo, donde tiene lugar la carbonización y activación de la gallinaza (gasificación del estiércol a altas temperaturas) (Guo *et al.*, 2012).
- Incineración: Implica la combustión directa de estiércol seco (15-20 % de humedad) para generar calor, tanto para la calefacción los galpones como para generar energía. Es un método menos eficiente y costos elevados de todas las formas, además los nutrientes presentes en la gallinaza se pierden hacia la atmósfera, con los consiguientes malos olores y emisión de partículas (Stingone y Wing (2011).
- La gasificación: Consiste en la conversión del residuo sólido en un gas combustible y es similar a un incinerador pero es diferente por la conversión de la biomasa en biogás a baja presencia de oxígeno a temperaturas de 600 a 1000°C y principales subproductos generados son monóxido de carbono, metano, algunos hidrocarburos ligeros y cenizas (USDA - NRCS, 2008).
- La pirolisis: Es el tratamiento térmico por el cual se produce la descomposición de la materia orgánica a altas temperaturas, en ausencia de oxígeno. Esto conduce a la producción de un residuo sólido rico en carbono, de una fracción líquida y de una fracción gaseosa. La pirolisis de los residuos presentan ventajas como la reducción del volumen del residuo sólido, alto valor energético, el proceso limita la cantidad de contaminantes liberados en los gases y no se producen dioxinas (Cueto, 2016).

2.3.6. IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS RESIDUOS AVÍCOLAS

Los sistemas intensivos de producción avícola pueden crear enormes problemas de polución debido a las grandes cantidades de sustancias contaminantes (nitrógeno, fósforo y azufre) que se producen. Además, originan grandes volúmenes de estiércol que se depositan en el suelo y, como resultado, éste y el agua se contaminan como se muestran resumidamente en la Figura 2:

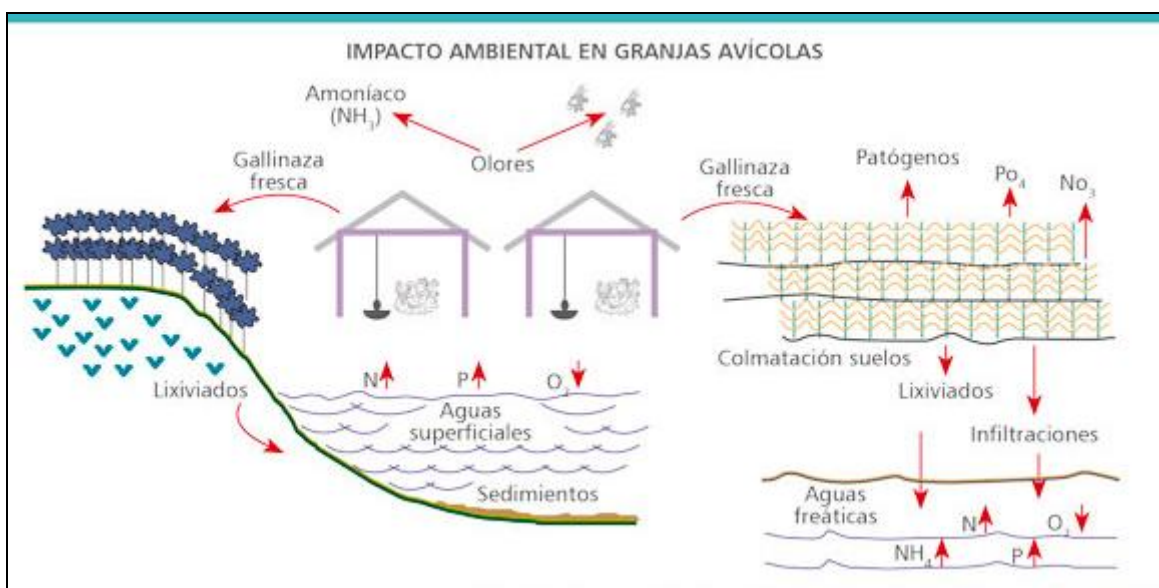


Figura 2: Impacto ambiental de residuos avícolas sin tratamiento

FUENTE: Rivera *et al.* (2000).

La exposición del estiércol de aves tiene impactos negativos en el suelo, aire, agua superficial y subterránea. En el suelo el impacto que la gallinaza fresca ocasiona es la disminución de la capacidad de drenaje, el desarrollo de microorganismos patógenos y la dificultad de mineralización del nitrógeno. En las aguas el impacto por sistemas de filtración y percolación ocasionan contaminación microbiana que origina riesgos a la salud y a la disminución de la vida acuática causada por la lixiviación de nitratos y materia orgánica. En el aire los malos olores producto de la liberación del amoníaco y óxidos nitrosos absorben el calor hasta 310 veces más que el anhídrido carbónico que se produce el sobre calentamiento del ambiente.

Las altas concentraciones de gases y olores son generados principalmente por el amoniaco, sulfuro de hidrógeno, metano, ácidos grasos volátiles, indol, escatol, fenoles, mercaptanos, alcoholes y carbonilos. Según McGahan *et al.* (2002) el amoniaco crea fuertes olores en zonas donde deposita el estiércol y en los galpones, pero no es un componente significativo cuando el olor ha sido transportado por el viento, ya que es muy volátil y se mueve hacia arriba en la atmosfera.

Niclós *et al.* (2010) señala de los posibles riesgos medioambientales están asociados a la producción avícola intensiva. Como se muestran resumidamente en la Figura 3, se observan los residuos y emisiones generados, los elementos que componen las emisiones, los medios susceptibles a ser contaminados y los principales problemas ambientales.

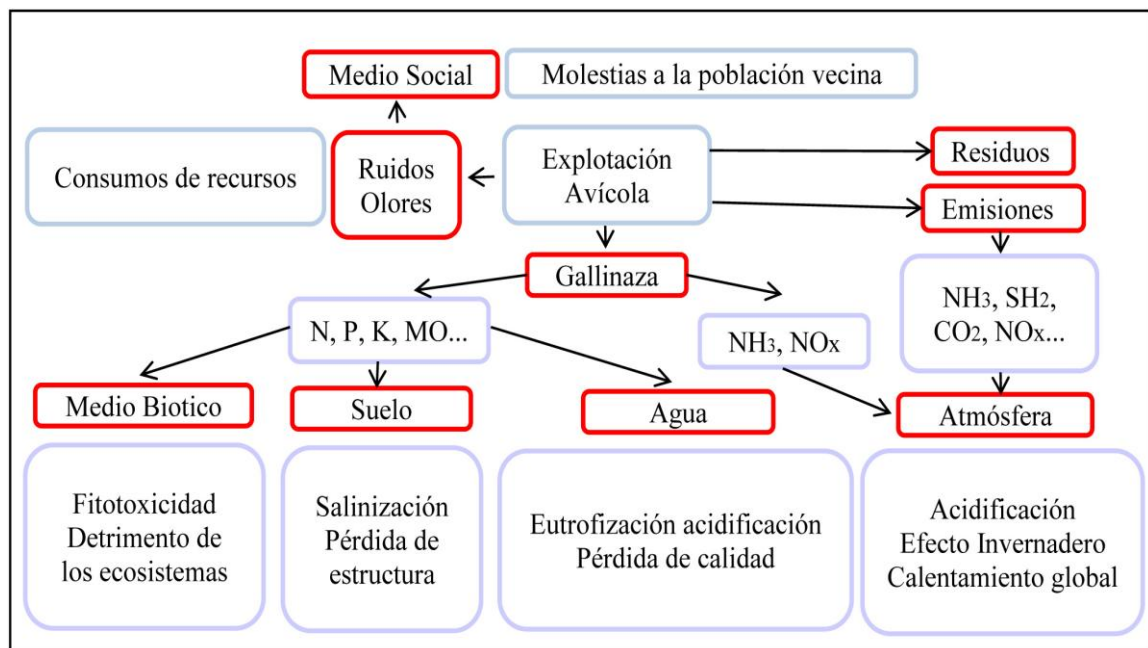


Figura 3: Riesgos potencialmente producidos en una granja avícola

FUENTE: Niclós *et al.* (2010).

La crianza de aves a gran escala durante largos periodos de tiempo, trae consigo problemas que deben ser controlados, uno de ellos es la producción de grandes cantidades de residuales, los cuales son reservorio de enfermedades y contaminantes ambientales (Castillo y Choy, 2011).

2.4. MARCO LEGAL

En cuanto al marco jurídico, los residuos agrarios y pecuarios no disponen de una normativa específica, es decir que se ordenan a través de la ley de residuos vigentes. La heterogeneidad de los residuos del sector agrario, tanto en volumen, peligrosidad como concentración geográfica; así como para la materia orgánica en particular, la definición legal de residuo se aleja notablemente de cómo se perciben los avicultores de allí la importancia de la aparición del nuevo concepto de “subproducto” y la intervención de las Administraciones Públicas (Barres, 2012).

En 1997 el Ministerio de Agricultura aprueba el Reglamento de Instalación y Funcionamiento de Granjas avícolas y Plantas de incubación (MINAG, 1997), en el anexo 1 establece respecto a la eliminación de desechos: *“Las Granjas deberán contar con un crematorio o un pozo séptico, que permita la eliminación de aves muertas y de desechos; dichos pozos sépticos deberán estar dentro el perímetro de la granja, con un sistema de cubierta que lo aislé de la granja y que no cause daños a terceros. Los desechos de las Plantas de Incubación, deberán ser incinerados, incorporados a pozos sépticos o llevados a botaderos autorizados por la Municipalidad de la zona, deberán ser trasladados en envases encerrados (sellados) para evitar la contaminación del ambiente y a terceros”*.

El Decreto Supremo N° 044-2006 del Reglamento Técnico para los Productos Orgánicos se establece que el uso de abonamiento orgánico con estiércol animal que permita un correcto manejo de la fertilidad de los suelos, deben ser preferentemente sujeto al compostaje y complementados, cuando sea necesario, con minerales primarios (rocas molidas); y es necesario en el manejo de excrementos animales completar los ciclos o procesos de descomposición de las excretas de los animales como medida de prevención de focos infecciosos. (Art. 11 y 23 del D.S. N° 044-2006-AG).

El Decreto Supremo N° 016-2012-AG del Reglamento de Manejo de los Residuos Sólidos del Sector Agrario establece que la Planta de tratamiento y/o reprocesamiento de los residuos no aptos para el consumo humano, deberá estar por lo menos a 1 Km de distancia de las actividades productivas y las gallinazas y pollinazas pueden ser incorporados al suelo previo tratamiento para estabilizarla, mejorando su calidad como abono, y si es posible, fijar el nitrógeno amoniacal. Establece que la mejor opción de tratamiento para la

gallinaza es el compostaje. Además sobre el manejo y almacenaje establece que debe realizarse bajo el concepto de buenas prácticas agrarias, con la finalidad de reciclar los nutrientes de las deyecciones y evitar la contaminación de las aguas. Asimismo la gallinaza podrá utilizarse como materia prima para la producción de biogás y de biofertilizantes, basadas en un proceso de descomposición anaeróbica (Art. 28 del D.S. N° 016-2012-AG).

En el Decreto Legislativo N° 1278, la gestión integral de los residuos sólidos en el país tiene como primera finalidad, la prevención o minimización de la generación de residuos sólidos en origen, frente a cualquier otra alternativa; la disposición final de los residuos sólidos en la infraestructura respectiva constituye la última alternativa de manejo y deberá realizarse en condiciones ambientalmente adecuadas. En segundo lugar, respecto de los residuos generados, se prefiere la recuperación y la valorización material y energética de los residuos siempre que se garantice la protección de la salud y del medio ambiente.

La valorización material consiste en la reutilización, reciclado, compostaje a través de procesos de transformación física, química, u otros, que demuestren su viabilidad técnica, económica y ambiental. Mientras la valorización energética, son aquellas destinadas a emplear residuos con la finalidad de aprovechar su potencial energético, tales como: coprocesamiento, coincineración, generación de energía en base a procesos de biodegradación, biochar, entre otros (Art. 47-48 del Decreto Legislativo N° 1278).

2.5. EL BIOCHAR

2.5.1. DEFINICIÓN

La definición del término biocarbón, conocido en inglés como “biochar”, Aker, (2014) señala que ha sido discutido por muchos autores e investigadores y analizado desde diferentes perspectivas. El principal tema de discusión generado es sobre el reconocimiento de la diferencia determinante entre el biochar y el carbón vegetal.

Lehmann y Joseph (2009) indican que sustancialmente no hay diferencia entre el biochar y el carbón vegetal si no en la utilización en el que son destinados. Por su destinación se diferencia del carbón vegetal en que su finalidad es la aplicación al suelo para la mejora de

sus propiedades y el secuestro de C, mientras que el carbón vegetal se utiliza para ser quemado y obtener energía.

Para International Biochar Initiative (IBI) en “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil”, el biochar es un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno (IBI, 2014).

Según Bedussi (2016), los estudios actuales sobre el biochar se inspiran en la forma en que los indígenas de la Amazonía manipulaban el suelo mediante carbón vegetal. El descubrimiento de sus propiedades agronómicas se remonta a la civilización de la época precolombina que para mejorar la baja productividad de los suelos, muy pobres a causa de su origen y la fuerte escorrentía, usaban enterrar el carbón; esta práctica descubierta en los suelos de la selva amazónica (Terra Preta dos Indios) tiene un alto grado de persistencia y altas concentraciones de carbón vegetal poco alterada a pesar del largo tiempo de permanencia en los suelos.

2.5.2. FUENTES DEL BIOCHAR

Existen muchos tipos de residuos orgánicos que pueden servir como materias primas para la producción del biochar. Nieto (2015) considera que entre las fuentes se sitúan los restos de poda y lodos de depuradora, que han sido estudiados en los últimos años como materia prima para la fabricación de biocarbones. Escalante (2016) indica que entre los materiales más citados en la literatura tenemos los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel, de arroz; los residuos de aceituna, desperdicios orgánicos de la vida urbana; y, los investigadores Brick y Wisconsin (2010), reportan materias primas para la conversión en bioenergía o biochar como: cama de aves, algas, cáscara de naranjas, de nueces y residuos sólidos urbanos.

Los estudios llevados a cabo han demostrado que el biochar obtenido a partir de estiércoles procedentes de gallina, entre otras especies, es un fertilizante con un alto contenido en nutrientes, teniendo efectos positivos sobre el rendimiento de los cultivos.

Además, estos estudios han mostrado que los biocarbones producidos de la pollinaza tienen alta capacidad de intercambio catiónico y muestra una alta estabilidad a 300 °C (Cely, 2015).

La transformación de la biomasa se realiza a través de los procesos bioquímicos (acción microbiológica), los físicos-químicos y por los termoquímicos. Uno de los procesos de transformación termoquímica es la pirolisis, una tecnología medioambiental en la producción del biochar. De acuerdo a la Agencia Europea de Medio Ambiente (2008) las tecnologías medioambientales permiten economías más sostenibles porque permiten la reducción de los insumos, la disminución del consumo de energía y las emisiones, la recuperación de los subproductos y minimización de los problemas de eliminación de los residuos.

2.5.3. PIROLISIS DE LA BIOMASA

El término pirolisis deriva del griego “*pyro*” que significa fuego y “*lisis*” que indica la descomposición en sus partes constituyentes. La pirolisis se ha convertido en un proceso atractivo y prometedor. Se define como un proceso termoquímico de transformación de la biomasa en tres productos (ruta clásica): líquido (bioaceites), gas (biogás) y residuo carbonoso (biochar), mediante la aplicación de energía y en ausencia de oxígeno, transforma la biomasa inicial (Urien, 2013).

Según Klug (2012), la tecnología de pirolisis presenta diferentes tipos. Cada una de ellas tiene diferentes condiciones en el proceso, lo cual favorece la generación de diferentes productos; sin embargo esta tecnología, sostiene Oses (2013), ofrece tres ventajas que incluyen: la gestión de un residuo; la producción de energía; y la mitigación de las emisiones de CO₂.

Sobre los tipos de pirolisis en la conversión de la biomasa, Brick y Wisconsin (2010) describen cuatro categorías generales: pirolisis lenta, rápida, ultra rápida y gasificación.

PIROLISIS LENTA: Es el proceso convencional o lenta se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa, temperaturas bajas y largos tiempos de residencia de los

sólidos y el gas. Según Rincón y Silva (2014), en este tipo de pirolisis se obtienen tres productos: sólidos, líquidos y gaseosos en menores proporciones. Debido al tiempo de residencia del vapor que varía desde 5 hasta 30 minutos los productos gaseosos tienen amplias oportunidades para continuar reaccionando con otros productos para formar el carbón.

PIROLISIS RÁPIDA: Se caracterizan por velocidades elevadas y bajos tiempos de residencia del vapor en la zona de reacción del proceso. Se caracteriza por un calentamiento muy rápido de la materia prima lo cual conlleva a una mayor producción de bioaceite en comparación con la producción de biocarbones (Rosas, 2015).

Según Escalante (2016), el calentamiento es mayor a $200\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$ y las temperaturas que prevalecen son usualmente mayores a los $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido al corto tiempo de residencia del vapor, los productos son de alta calidad, principalmente son líquidos, como los bioaceites y gases.

GASIFICACIÓN: Es la oxidación parcial de la biomasa con aire, oxígeno o vapor de agua a altas temperaturas ($800\text{-}900^{\circ}\text{C}$), dando lugar un gas combustible. El poder calorífico del gas producido puede ser quemado directamente o utilizado como combustible para motores de gas y turbinas. También, puede ser utilizado como gas de síntesis para la producción de productos químicos, como por ejemplo, metanol (Urien, 2013).

Tabla 7: Comparación de rendimientos de las fracciones de proceso termoquímico de la biomasa

| PROCESO | TIEMPOS DE RESIDENCIA | RENDIMIENTOS (%) | | |
|------------------------|-----------------------|------------------|--------|-----|
| | | LIQUIDOS | CARBÓN | GAS |
| Pirolisis Rápida | 0.5-5 seg. | 75 | 12 | 13 |
| Pirolisis Convencional | 5-30 min. | 50 | 20 | 30 |
| Gasificación | 20-30 min | 5 | 10 | 85 |
| Carbonización | Dias | 30 | 35 | 35 |

FUENTE: Urien (2013).

Las diversas tecnologías y resultado de los parámetros de operación como se observa en la Tabla 7, desde el punto de vista de la producción del biochar el sistema de carbonización tienen mayores rendimientos (35%), mientras los sistemas de pirolisis rápida y convencional producen rendimientos de biochar de 12% y 20% respectivamente.

2.5.3.1. PROCESOS DE PIROLISIS

La formación del biochar a partir de biomasa es un proceso complejo en el que se presentan múltiples reacciones en secuencias de diferentes tipos. En el estudio termoquímico se ha identificado tres reacciones asociadas a la degradación de sus tres componentes principales de la biomasa: la hemicelulosa, la celulosa y la lignina (Gómez *et al.*, 2008).

Según Demirbas citado por Urien (2013) el proceso inicia con la eliminación del agua (humedad de la biomasa) y ciertos residuos no reactivos (Ec.1). En la etapa intermedia se produce el biochar primario con la consiguiente generación inicial de compuestos volátiles y de gases (Ec.2). En la etapa final el biochar primario se descompone formando sólidos residuales con alto contenido de carbono fijo cuya transformación térmica genera un producto final (biochar) y la finalización de la generación de los compuestos volátiles y gases (Ec.3).

a) Biomasa \rightarrow Agua + residuos no reactivos (Ec.1)

b) Residuo no reactivo \rightarrow (compuestos volátiles + gases) + (biochar primario) (Ec.2)

c) (Biochar primario) \rightarrow (compuestos volátiles + gases finales) + (biochar final) (Ec.3)

Rincon y Silva (2014) indican que los líquidos de la pirolisis tienen una coloración marrón oscura, casi negra, olor a humo, fluyen libremente a temperatura ambiente. Si los gases volátiles no combustionan conjuntamente al calor de la combustión en el reactor, pueden ser separados y almacenados.

Entre estos gases no condensables pueden ser los combustibles (CO , H_2 , CH_4) y los no combustibles (CO_2 , O_2 , N_2); como se puede observar en la Figura 4 la descomposición de la biomasa por el efecto del calor en gases no condensables.

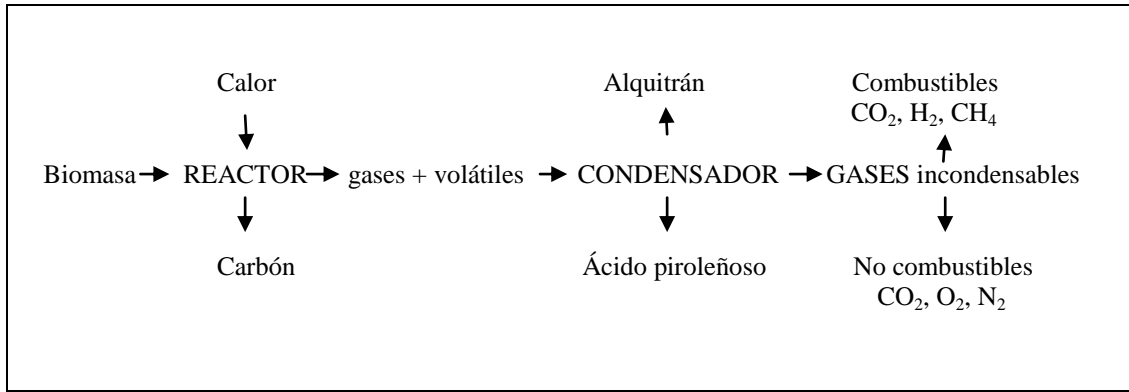


Figura 4: Descomposición de la biomasa por efectos del calor de combustión

FUENTE: Sierra y Klose (2008).

La descomposición térmica de la biomasa viene definida por la disgregación de los componentes principales que la constituyen: celulosa, hemicelulosa y lignina. Dependiendo de la biomasa estos tres componentes presentan procesos diferentes de descomposición durante el proceso de pirolisis, que son dependientes de las diferentes estructuras y de la composición de cada uno de ellos (Mohan *et al.*, 2006).

Hay tres fases principales en la descomposición de los componentes lignocelulósicos durante el proceso de pirolisis como se observa en las siguientes Figuras 5, 6 y 7:

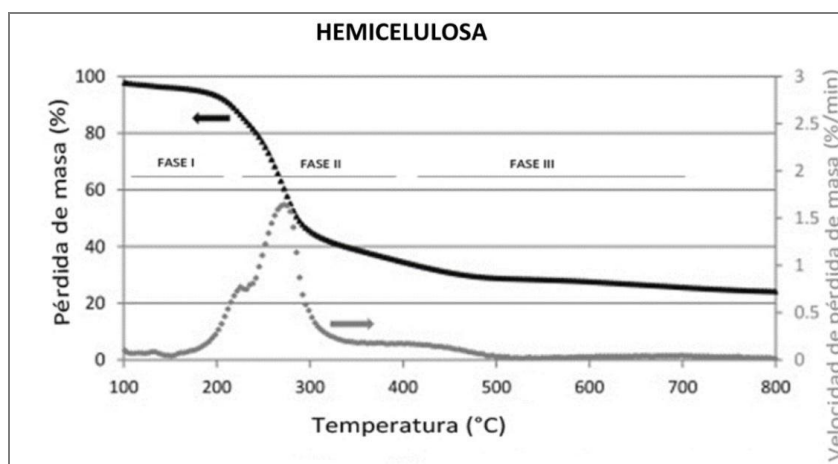


Figura 5: Pirolisis de la hemicelulosa

FUENTE: Adaptado por Collard y Blin (2014).

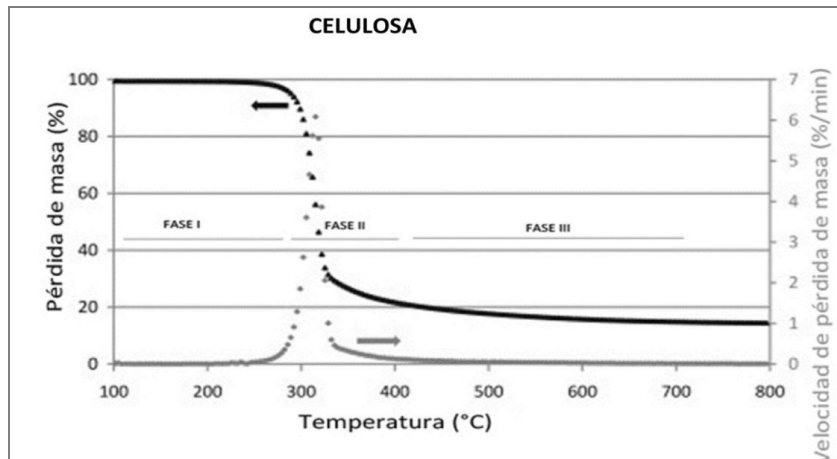


Figura 6: Pirolisis de la celulosa

FUENTE: Adaptado por Collard y Blin (2014).

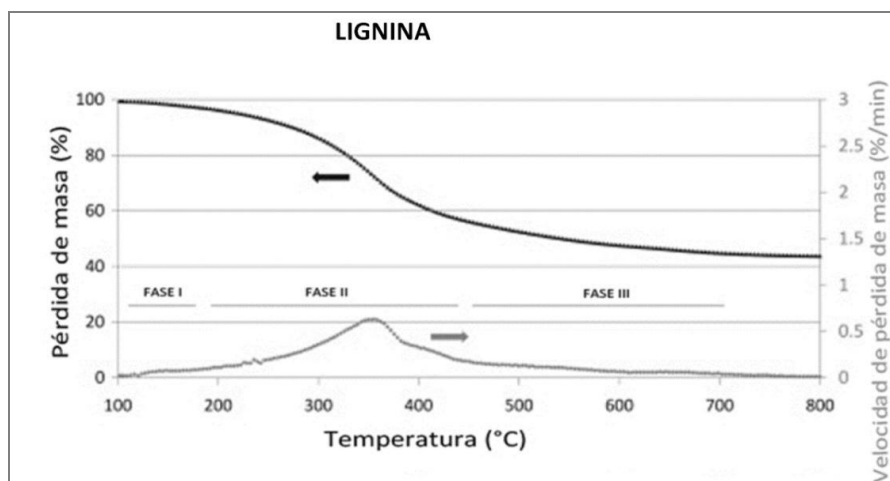


Figura 7: Pirolisis de la lignina

FUENTE: Adaptado por Collard y Blin (2014).

Las pérdidas de masa (%) y la velocidad de pérdida en relación al tiempo del proceso varían en la hemicelulosa, celulosa y lignina debido a los diferentes rangos de temperatura en las diversas fases del proceso de pirolisis. Según Collard y Blin (2014), la hemicelulosa, celulosa y lignina se descomponen en diferentes rangos de temperaturas de pirólisis. La hemicelulosa se descompone en el rango de temperaturas de pirólisis de 150-350 °C, la celulosa en el rango de temperaturas de pirólisis de 275-350 °C y la lignina en el rango de temperaturas de pirólisis de 250-500 °C.

- La **fase I**, corresponde a los procesos de deshidratación y conversión de las estructuras de los compuestos más inestables por procesos de redistribución o de fragmentación.
- La **fase II**, presenta la mayor velocidad de pérdida de masa y es el resultado de los procesos de despolimerización.
- La **fase III**, se relaciona con los procesos de carbonización del sólido, que consiste en la reorganización de los anillos bencénicos en estructuras policíclicas de diferente índole.

2.5.3.2. PRODUCTOS DE LA PIROLISIS

Las tres principales fracciones componente que resulta de la pirolisis según Castells (2005) se dividen en una fracción volátil (syngas), una fracción líquida (synoil) y una fracción sólida (char).

- La corriente de gas que contiene básicamente hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros varios gases, dependiendo de las características orgánicas del material que es pirolizado y de las condiciones de operación.
- La fracción condensable, líquida a temperatura ambiente, integrada por un conjunto heterogéneo de vapores, consiste en alquitranes y/o aceite que contiene agentes químicos tales como acético, acetona y metanol.
- Un coque o char residual consiste en carbono casi puro mezclado con el material inerte que entra en el proceso.

2.5.4. EMPLEO DEL BIOCHAR

Son muchas las potencialidades del biochar aplicados como enmienda orgánica en la agricultura, García *et al.* (2014) sostiene que el biochar debe ser descrito como “*acondicionador de suelos*” capaces de generar situaciones beneficiarias, al ser producido, analizado y aprovechado apropiadamente.

Según Guerra (2015) la aplicación del biochar como una enmienda en los suelos, podrían beneficiar a los agricultores a promover un tipo de agricultura sostenible a partir del aprovechamiento de la biomasa residual, pudiendo esto a su vez, reducir los costos en la inversión de insumos para los cultivos. En general ayudaría a reducir la huella de carbono de las actividades agrícolas.

Hay una tendencia creciente de estudios sobre el uso del biochar como enmienda del suelo debido a sus numerosas ventajas, como la mejora en la calidad, productividad, gracias al rol fundamental del carbono en los procesos químicos, físicos e biológicos, pero también por reducir las emisiones de CO₂ en atmosfera y mitigación del cambio climático.

Los principales efectos observados en el biochar sobre las propiedades del suelo incluyen la reducción de su densidad aparente, el aumento de su capacidad de retención de agua y la mejora de su estructura (Laird *et al.*, 2009). Estas mejoras también incluyen un aumento de la porosidad del suelo que puede mejorar su capacidad de infiltración y su permeabilidad contribuyendo positivamente al desarrollo de la raíz y a la respiración microbiana y favoreciendo el intercambio gaseoso y las condiciones de oxigenación (Olmo, 2016).

Aker *et al.* (2014) señalan que el biochar mejora las propiedades físico-químicas del suelo y los rendimientos de diversos cultivos y combinado con gallinaza podría reemplazar el uso de los fertilizantes sintéticos para la producción, sin embargo los efectos de esa combinación no han sido estudiados a fondo. La aplicación del biocarbón con gallinaza mejora la disponibilidad de fósforo y nitrógeno en el suelo; también mejoran el desarrollo radicular de las plantas de maíz, aumenta la producción de la biomasa de las plantas (mazorcas en peso); y mejora los rendimientos en t ha⁻¹ del cultivo de maíz.

Steiner *et al.* (2010) realizaron pruebas que indican que al mezclar el biochar con la gallinaza se reduce significativamente las pérdidas de nutrientes y se mejora su liberación para las plantas, debido a esto se considera el biochar como un producto ideal para incluir en el compostaje de abonos altos en Nitrógeno.

Según Becagli (2016), el co-compostaje del biochar con material orgánico fresco presenta características diferentes respecto a la simple mezcla compost biochar. Se ha observado que el biochar, en algunas investigaciones, al interno del proceso de compostaje de la

sustancia orgánica, incrementa la eficiencia del uso de nutrientes, se activa biológicamente e incrementa el potencial de secuestro del carbono. Todo esto sucede de una manera mucho más evidente que la simple mezcla de compost - biochar.

Es posible emplear en los viveros dedicados al cultivo de plantas ornamentales en sustratos que tradicionalmente los contenedores de cultivos usan la turba, fibras de coco o compost. Los estudios de Dumroese (2011) concluyeron que las características físico químicas de los suelos para cultivo de plantas es diferente a los sustratos para los cultivos en macetas, y esta diferencia está influenciado a las dinámicas internas de los mismas macetas. Las diversas interacciones entre las raíces, pH, y las soluciones circulan en el pequeño volumen a disposición de las plantas.

2.5.5. DOSIS Y MODALIDAD DE APLICACIÓN EN EL CAMPO

Las dosis de aplicación en el suelo dependerán de la disponibilidad del resultado de un número de pruebas experimentales realizadas en el campo. Al momento no tenemos la disponibilidad de datos suficientes que permitan orientar su dosis de aplicación en el terreno en función al tipo de suelo y cultivos. Además existen gran variedad de materiales como fuente de producción del biochar cuyas características también varían en la naturaleza del biocarbón y de consecuencia influyen su cantidad de aplicación.

En las investigaciones científicas, diversos estudios han reportado efectos positivos de la aplicación del biochar en rendimientos de cultivos con una vasta gama de dosis que varían desde 0.5 a 100 t/ha. (Maienza et al. 2016). Debido a la amplitud de dosis de aplicación se continúa en la investigación para establecer cantidades necesarias por hectárea en cada tipo de suelos y cultivos.

Para su mejor eficacia de su función como enmienda agrícola el biochar debe ser distribuido en los estratos superficiales del terreno, donde se desarrolla la mayor parte del ciclo de nutrientes y donde se concentra la mayor parte de las raíces de las plantas. Dependiendo del sistema de cultivo, uso tradicional de maquinaria o instrumento agrícola empleada durante su elaboración de rutina (Andrenelli *et al.* 2015).

2.5.6. BIOENSAYOS DE TOXICIDAD

La importancia de los bioensayos en el control de la contaminación se basa en la capacidad de éstos de valorar efectos sobre los organismos vivos, permitiendo establecer relaciones dosis-respuesta; consiste en una prueba de toxicidad aguda (tiempo determinado) en las que se evalúan los efectos fitotóxicos de compuestos puros o de mezclas complejas en el proceso de germinación de semillas y en el desarrollo de las plántulas durante los primeros días de crecimiento (Sobrero y Ronco, 2004).

A diferencia de la prueba tradicional de germinación de semillas, la evaluación del efecto en la elongación de la radícula y del hipocotilo de las plántulas permite ponderar el efecto tóxico de compuestos solubles presentes en niveles de concentración tan bajos que no son suficientes para inhibir la germinación, pero que sin embargo pueden retardar o inhibir completamente los procesos de elongación de la radícula o del hipocotilo, dependiendo ello del modo y sitio de acción del compuesto (Sobrero y Ronco, 2004).

La inhibición de la elongación de la radícula y el hipocótilo constituyen indicadores sub-letales muy sensibles para la evaluación de efectos biológicos en vegetales, que aportan información complementaria a la proporcionada al estudiar el efecto en la germinación (Sobrero y Ronco, 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó en el Vivero Forestal denominado “Las Viñas” de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Específicamente en el lugar asignado al Convenio Marco de Cooperación Interinstitucional entre la UNALM y el Consorcio integrado por las empresas HOLDING AMBIENTAL S.A.C. y CARBON SOLUTIONS GROUO LATIN AMERICA S.A.C. (HOLAM-CSGLA) para la Gestión Integral de Residuos Verdes.

Los residuos orgánicos avícolas de gallinaza y pollinaza utilizados en la producción del biocarbón provienen de dos de las granjas avícolas de la empresa San Fernando S.A. ubicados en el distrito de Huaral y Lurín. Se seleccionó las granjas representativas de producción de gallinas ponedoras y de pollos de engorde, cuyos criterios de selección fueron los siguientes: crianza continúa, poseer instalaciones modernas (comederos y bebederos semiautomáticos), eficientes y productivas para la crianza intensiva por el manejo y valorización de los residuos avícolas como fertilizantes orgánicos; y, por ser una empresa que incrementa el valor agregado a los subproductos.

Los análisis experimentales de caracterización de los residuos orgánicos y del bichar se llevaron a cabo en:

- La Molina Calidad Total Laboratorios de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. MATERIALES DE CAMPO

Las muestras de residuos orgánicos provienen de las granjas en estudio han tenido un pre tratamiento de secado industrial para su almacenamiento y posterior comercialización. La gallinaza proviene de la granja de gallinas ponedoras de la zona de Huaral, mientras las muestras de pollinaza provienen del almacén de pre tratamiento de la granja de Cerro Azul (Lurín). Para su recolección y selección de utilizaron: sacos de 50 kg, rastrillos, guantes, mascarillas.

3.2.2. MATERIALES PARA BIOENSAYO DE TOXICIDAD

Los materiales para el bioensayo de toxicidad que se utilizaron fueron: semillas mejoradas de rabanito; el biochar resultante de la conversión térmica de la pollinaza y gallinaza se usó como el elemento tóxico del tratamiento, balanza analítica con precisión (0,001 g), macetas, cámara oscura para la germinación de semillas, cámara fotográfica. Se emplearon macetas denominado “maceta tulipán” # 7.00 cm. para una capacidad de la siembra de 10 semillas por cada maceta.

El rabanito es una hortaliza de raíz de fácil cultivo, que no ocupa mucho espacio y crece con gran rapidez, se conoce en el mercado como rabanito francés y se cultiva prácticamente todo el año en forma escalonada, las variedades destacadas son: Tipo redondo; son numerosas variedades de color rosado con punta blanca, estos son los más solicitados por los consumidores. El rabanito *Sparkler* es un excelente representante de este tipo.

Nombre común o vulgar: Rábano, Rábanos, Rabanillo, Rabanito, Nabo Chino

Nombre científico o latino: *Raphanus sativus L.*

Familia: Crucíferas (Cruciferae).

Origen: Extremo Oriente.

3.2.3. EQUIPOS Y MATERIALES DE PRODUCCIÓN DEL BIOCHAR

Los equipos usados para la producción del biochar fueron: horno pirolítico, termómetro digital infrarrojo Infrared Thermometer (-32°C-700°C), balanza BRDO4KF (1g - 5 kg), bandejas de aluminio y espátula.

Horno pirolítico: Su diseño y su elaboración fueron realizados por el profesor Ravikumar de la Universidad Mysore de India (Lindberg *et al.*, 2010). Las dimensiones, construcción y funcionamiento mediante el proceso de pirolisis se muestran el ciclo de combustión en las imágenes de la Figura 8:

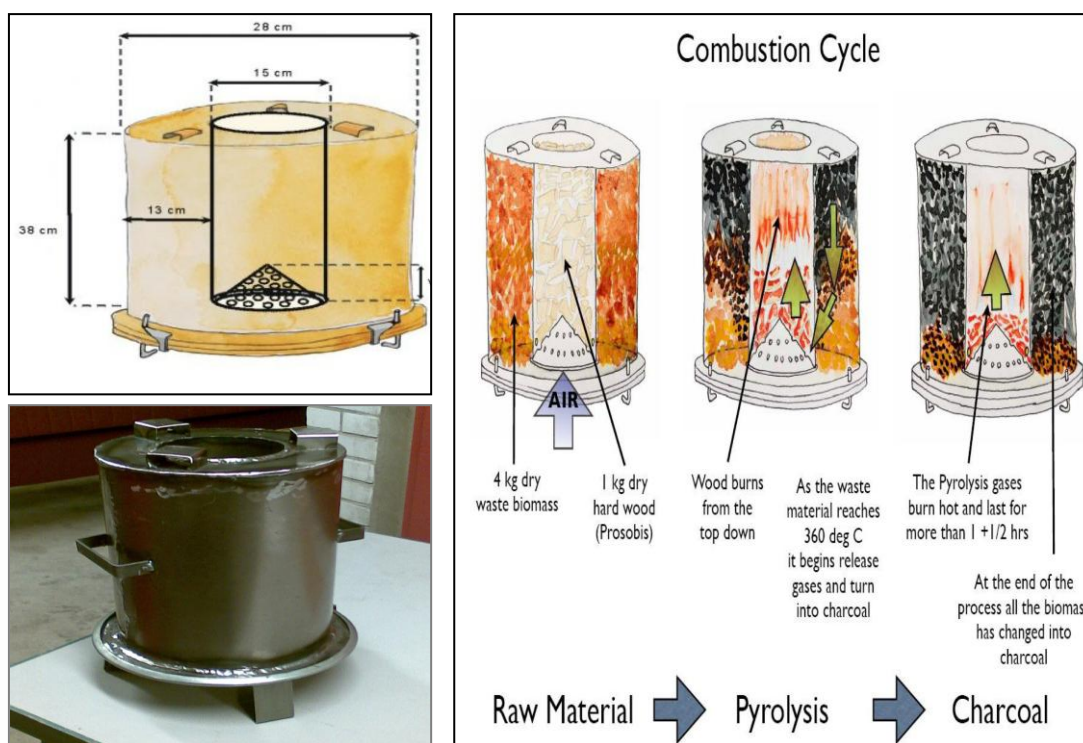


Figura 8: Estufa gasificadora de biomasa anila

FUENTE: Estufa pirolítica a nivel familiar (Lindberg *et al.*, 2010).

La construcción del horno piloto de la presente investigación se realizó con el material de láminas de fierro metálico del espesor de 1.5 mm. A continuación como se muestra la Figura 9 se detallan los componentes y dimensiones modificados del diseño original en base a la necesidad de producción del biochar para lotes de pequeñas cantidades para fines de análisis e investigación.

- Tiene dos componentes. Un tambor externo en forma elíptica que tiene en común dos cámaras para la producción de biochar, las dimensiones cuyas medidas son de 0.50 cm de largo, 0.30 cm de ancho y 0.60 cm de alto. Cada una de las cámaras presentan de las perforaciones para la liberación de energía, compuestos volátiles y gases de combustión.
- El otro cilindro interno tiene la finalidad contener la biomasa de combustión que alimenta el calor al procesos de la pirolisis, este cilindro está condicionado con perforaciones de aireación y para el tamizado de cenizas. Las dimensiones del cilindro interno tienen como base 0.25 cm de basa y 0.60 cm de alto.
- Las dos cámaras externas del horno piloto poseen una tapa que permite sellar el contenido de la biomasa per la carbonización para evitar el ingreso del oxígeno o disminuir al mínimo el ingreso del aire.

El diseño estructural del horno piloto se detalla en el Anexo 1 y los costos de fabricación en el Anexo 2. El horno piloto como se muestran en las imágenes de la Figura 9, presenta el tambor con dos cámaras externas, un cilindro interno y la combustión en pleno funcionamiento.



Figura 9: Horno piloto para la producción de biochar

FUENTE: Elaboración propia.

3.3. METODOLOGÍA

3.3.1. SELECCIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS.

Se recolectaron de las granjas de ponedoras y de pollos de engorde en estudio, cuyas muestras seleccionadas forman parte de los residuos sometidos un previo secadero industrial para su deshidratación.

Las muestras de gallinaza y pollinaza para la investigación se separaron en sacos de 50 kg respectivamente como se observa en la Figura 10.

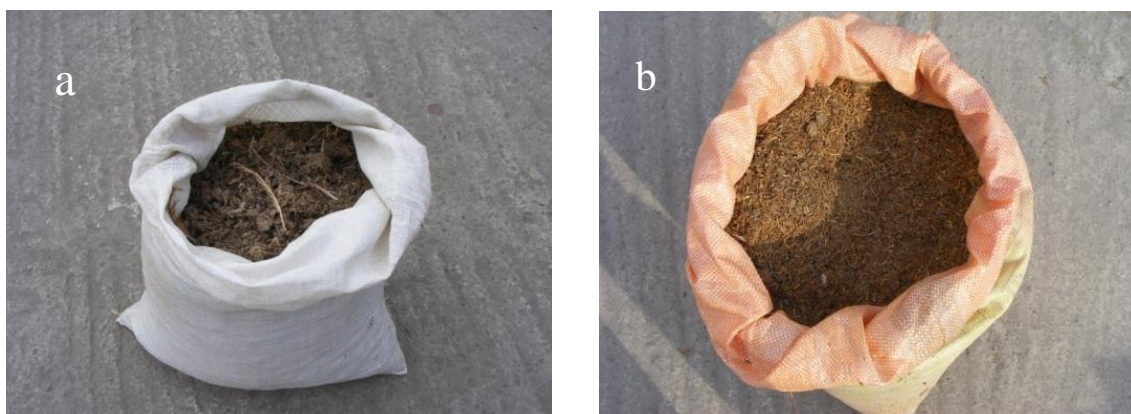


Figura 10: Materias primas seleccionados para la producción de biochar
a) Gallinaza, b) Pollinaza.

FUENTE: Elaboración propia.

3.3.2. PRODUCCIÓN DEL BIOCHAR

Las muestras seleccionadas fueron mezcladas, homogeneizadas y posteriormente separadas en porciones de tratamientos conforme al diseño de investigación formulada para el presente estudio. En cada lote de producción de biochar, luego del proceso de la pirolisis en el horno piloto se estimó el rendimiento de producción del biochar a partir de cada tipo de materia prima utilizada, se recopilaban los rangos de temperatura y el tiempo de producción. Se obtuvieron en total 12 muestras de biochar.

A continuación se detallan los pasos seguidos en el proceso de pirolisis en el horno piloto de conversión térmica como lo muestra la Figura 11 las fases del proceso con imágenes (a, b, c, d, e, f, g, h).

- a) Para cada lote de producción de biochar se controlaron las entradas de aire en ambos tambores o cámaras debido que la pirolisis se lleva a cabo en condiciones de oxígeno limitado, siendo el control principal del suministro del oxígeno sobre la cámara interna. Para ello, se acondicionaron las entradas de aire tal como se observa en la Figura 11a.
- b) Se llenó de biomasa residual o materia prima a convertir en biochar. La cantidad dependió del tipo y cantidad necesaria de material sin compactar en las cámaras. Sucesivamente se selló las cámaras para no permitir o limitar el ingreso del aire y se volteó todo el componente del horno pirolítico. Ver Figuras 11b y 11c.
- c) De igual manera la cámara interna se llenó de material combustible de podaduras (leña, ramas secas, hojas) Una vez completado todo el espacio libre, se suministró el fuego. Ver Figuras 11d, 11e.
- d) Durante el proceso de pirolisis, se controló constantemente la temperatura con un termómetro infrarrojo tanto en el tope, medio y en el fondo de la unidad exterior.
- e) Aproximadamente a unos 10-15 minutos de iniciado el calor de combustión, el material combustible mostró una llama de color amarillo de manera constante. Las muestras de biomasa inicial en la cámara interior, a los 30 minutos (aproximadamente) de la alimentación del calor de combustión comenzó arder con flama de color azul, señal evidente que la conversión térmica de la biomasa residual inicia su proceso.
- f) El proceso de pirolisis (alimentación de calor + combustión térmica de biomasa) dura un total de 2.5 a 3 horas.
- g) El enfriamiento del horno tomó unas 6 horas posteriores. Se prosiguió el pesado del biochar resultante y separado de las muestras para el análisis de laboratorio en contenedores con etiquetas de identificación por cada tratamiento. Ver Figuras 11f, 11g, 11 h.



Figura 11: Proceso de producción y muestras del biochar

FUENTE: Elaboración propia.

- a) Sistema de regulación del ingreso del aire.
- b) Llenado de la materia prima para la pirolisis.
- c) Cierre e posición del horno.
- d) Acondicionamiento de materiales de combustión para suministro de térmico.
- e) Inicio de combustión y pirolisis de materia prima y cese de la producción del biochar.
- f) Recolección de muestras del biochar.
- g) Pesado de muestras del biochar.
- h) Conservación y etiquetado de las muestra de laboratorio.

3.3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS Y DEL BIOCHAR

Para una mejor gestión de los residuos avícolas y su mejor reutilización en aplicaciones agrícolas y ambientales; la caracterización de la materia prima a utilizar y del biochar resultante de la conversión térmica, incluyen además de las características morfológicas y estructurales, algunos parámetros como la densidad aparente, rendimiento del biochar, composición elemental, contenido de cenizas, humedad, nutrientes y valores de pH.

Para evaluar la calidad del biochar en la producción de cultivos se deben medir propiedades del área superficial, volumen de la porosidad, capacidad de retención del agua (CRA), capacidad de intercambio catiónico (CEC), conductividad eléctrica (CE) y contenido de compuestos volátiles (Guo *et al.*, 2012).

Densidad aparente

Es la masa de un material. Los valores óptimos deben ser inferiores a 0.4 g/cm³. Una misma muestra de sustrato puede ocupar mayor o menor volumen según su grado de compactación o su consistencia, por lo cual la densidad aparente puede ser muy distinta en cada caso. Por ello debe atenderse a la medida en condiciones bien definidas y normalizadas (Martínez y Roca, 2011).

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Masa de materia seca}}{\text{Volumen del biochar resultante}}$$

La densidad del carbón es un dato importante para estimar el volumen del contenedor o el área donde se va almacenar, así como para estimar los costos que se puede derivar al transportarlo (Pérez, 2015).

Rendimiento

Los rendimientos de biochar de la pirólisis lenta pueden ir de 20% a 50% en una amplia variedad de materias primas o residuos, es común que se obtengan rendimientos del 35%. Existen factores que pueden influenciar el rendimiento del biochar como las velocidades de

calentamiento, presiones altas, humedad, la resistencia del vapor y composición química de la materia prima (Edmunds, 2012). El rendimiento es una forma de calcular la producción del biochar, que se obtiene entre la relación de masa de la biomasa que se coloca en el horno pirolítico, y la masa del carbón obtenido expresado en porcentaje (Capraro, 2012). El rendimiento se calculó en base a la relación entre la cantidad o peso del producto final obtenido (biochar enfriado) y de la materia prima (biomasa seca) usada al inicio del proceso. La relación es expresada en porcentaje:

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Masa del biochar}}{\text{Masa de la biomasa}} \times 100$$

El resume del análisis proximal, los elementos químicos constituyentes y el contenido de los macro y micronutrientes de la materia prima y del biochar resultante se muestran en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8: Relación de contenido de análisis y metodología aplicada

| N° | Contenido - Nutrientes | Unidad | Metodología |
|----|------------------------|-----------|--|
| 1 | pH | | AOAC 973.04 Cap. 2 Ed 19 Pág. 19. 53-54 2012 |
| 2 | Humedad | (g/100 g) | NTP 311.012 1970 |
| 3 | Cenizas | (g/100 g) | AOAC 967.04 Cap. 2 Ed 19 Pág. 19. 54 2012 |
| 4 | Carbono Total (C) | (g/100 g) | El Analizador de COT SHIMADZU L500 |
| 5 | Nitrógeno Total (N) | (g/100 g) | AOAC 955.04 Cap. 2 Ed 19 Pág. 19. 13-14 2012 |
| 6 | Fósforo Total (P) | (mg/Kg) | AOAC 958.01 Cap. 2 Ed 19 Pág. 19. 5-6 2012 |
| 7 | Potasio (K) | (mg/Kg) | AOAC 983.02 Cap. 2 Ed 19 Pág. 19. 24-27 2012 |
| 8 | Sodio (Na) | (mg/Kg) | AOAC 965.09 Cap. 2 Ed 19 Pág. 19. 29-31 2012 |
| 9 | Calcio (Ca) | (mg/Kg) | AOAC 965.09 Cap. 2 Ed 19 Pág. 29. 29-31 2012 |
| 10 | Magnesio (Mg) | (mg/Kg) | AOAC 965.09 Cap. 2 Ed 19 Pág. 29. 29-31 2012 |
| 11 | Cobre (Cu) | (mg/Kg) | AOAC 965.09 Cap. 2 Ed 19 Pág. 29. 29-31 2012 |
| 12 | Fierro (Fe) | (mg/Kg) | AOAC 965.09 Cap. 2 Ed 19 Pág. 29. 29-31 2012 |
| 13 | Manganeso (Mn) | (mg/Kg) | AOAC 965.09 Cap. 2 Ed 19 Pág. 29. 29-31 2012 |
| 14 | Cinc (Zn) | (mg/Kg) | AOAC 965.09 Cap. 2 Ed 19 Pág. 29. 29-31 2012 |

FUENTE: La Molina Calidad Total Laboratorios de la UNALM.

3.3.4. PRUEBA DE BIOENSAYO

Las pruebas de bioensayo de toxicidad se realizó con semillas de rábano de las especies *Raphanus sativus* L. en base a los principios de prueba estática de toxicidad aguda en las que se pueden evaluar los efectos fitotóxicos del biocarbón de 4 concentraciones o dosis (1%, 3%, 5%, y 7%) en el proceso de germinación de las semillas y en el desarrollo de las plántulas durante los diez primeros días de crecimiento.

Previo a la implementación de la prueba, se verificó que cada muestra de semilla utilizada tenga un porcentaje de germinación al 95%, se caracterizó las condiciones de germinación de los tratamientos: germinación en ausencia de luz y temperatura óptima de crecimiento. Se tomaron los siguientes pasos como se observa en las imágenes de la Figura 12:

- a. Se colocó en cada maceta un extracto de arena gruesa, arena fina (lavados previamente), y un tercer extracto de tierra agrícola tamizado.
- b. Se identificó cada maceta correspondiente al tratamiento (concentración del biocarbón) y el número de repeticiones correspondientes.
- c. Con la ayuda de una pinza, colocar y distribuir cuidadosamente 10 semillas de rábano previamente pesados en una balanza analítica, dejando espacio suficiente entre las semillas para permitir la elongación de las raíces.
- d. Se suministró de humedad a cada una de las macetas y se acomodó en un ambiente oscuro condicionado para la germinación en ausencia de luz por 240 horas (10 días) a una temperatura de 22 ± 2 °C.
- g. Realizar control diario de humedad y número de semillas germinadas.

Previo al cálculo de índice de germinación se calcularon dos índices: el porcentaje de germinación relativo (PGR) y crecimiento de tallo relativo (CTR) de cada tratamiento (Sobrero y Ronco, 2004).

$$\text{PGR} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de semillas germinadas en maceta}}{\text{N}^\circ \text{ de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

$$\text{CTR} = \frac{\text{Elongación del tallo de la plántula en maceta}}{\text{Elongación del tallo en el testigo}} \times 100$$

$$IG = \frac{PGR \times CTR}{100}$$

Dónde:

PGR: Porcentaje de Germinación Relativo.

CTR: Crecimiento de Tallo Relativo.

IG: Índice de Germinación



Figura 12: Pruebas de ensayo de biochar de gallinaza y pollinaza

FUENTE: Elaboración propia.

3.3.5. DISEÑO EXPERIENTAL

Producción del biochar:

En la presente investigación los residuos avícolas para la producción del biocarbón, como se muestra en la Tabla 9, se disponen en tratamientos y repeticiones:

T1: Gallinaza (**GG**) al 100%,

T2: Pollinaza (**CP**) al 100%,

T3: Mezcla Gallinaza y Pollinaza (**GG-CP**) de 50%-50%.

En las tablas 15 y 16 los resultados del análisis de los residuos avícolas como materia prima de entrada para la conversión del biochar de ha representado con R0 por razones de comparación con los resultados de los análisis del biochar.

Tabla 9: Tratamientos de los residuos avícolas para su caracterización.

| REPETICIONES | TRATAMIENTOS | | |
|--------------|--------------|-----|-----|
| | T 1 | T 2 | T 3 |
| R 1 | | | |
| R 2 | | | |
| R 3 | | | |

FUENTE: Elaboración propia.

Al realizar el modelo de diseño experimental se determinó los variables empleados en la investigación, como se muestra en la Tabla 10, para la caracterización de las muestras de los residuos y para el biochar resultante:

Tabla 10: Variables empleados en la investigación.

| Nro. | Variable |
|------|---|
| 1 | Rendimiento (%) |
| 2 | Densidad (g/cm ³) |
| 3 | pH |
| 4 | Humedad (g/100 g de muestra original) |
| 5 | Cenizas (g/100 g de muestra original) |
| 6 | Carbono Total (g/100 g de muestra original) |
| 7 | Nitrógeno Total (g/100 g de muestra original) |
| 8 | Fósforo Total (mg/Kg de muestra original) |
| 9 | Potasio (K) (mg/Kg de muestra original) |
| 10 | Sodio (Na) (mg/Kg de muestra original) |
| 11 | Calcio (Ca) (mg/Kg de muestra original) |
| 12 | Magnesio (Mg) (mg/Kg de muestra original) |
| 13 | Cobre (Cu) (mg/Kg de muestra original) |
| 14 | Hierro (Fe) (mg/Kg de muestra original) |
| 15 | Manganeso (Mn) (mg/Kg de muestra original) |
| 16 | Cinc (Zn) (mg/Kg de muestra original) |

FUENTE: Elaboración propia.

Pruebas de Bioensayos:

Para la determinación del Índice de Germinación, Crecimiento de Tallo y Peso Fresco de Plántulas de semillas de rabanito se disponen en tratamientos y repeticiones para las dosis del biochar de Gallinaza (**GG**) y Pollinaza (**CP**) según se muestra en la Tabla 11:

T1: Dosis de biochar al **1%**,

T2: Dosis de biochar al **3%**,

T3: Dosis de biochar al **5%**,

T4: Dosis de biochar al **7%**.

Tabla 11: Distribución de dosis del biochar para pruebas de ensayos.

| Tratamiento (Dosis) | | Biochar | |
|---------------------------|----------------------------|------------|------------|
| | | Gallinazas | Pollinazas |
| T 1 (1%) | Rep. 1 Rep. 2 Rep. 3 | | |
| T 2 (3%) | Rep. 1 Rep. 2 Rep. 3 | | |
| T 3 (5%) | Rep. 1 Rep. 2 Rep. 3 | | |
| T 4 (7%) | Rep. 1 Rep. 2 Rep. 3 | | |

FUENTE: Elaboración propia.

3.3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Los datos fueron analizados a través del programa estadístico InfoStat (2016), empleando el procedimiento ANOVA para el análisis de varianza ($p < 0,05$), y para determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos; cuando el análisis de varianza fuese significativo (interacción de los factores principales), se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey. Los resultados fueron considerados significativamente a $p < (0,05)$ (Steel y Torrie, 1992).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados del diseño del horno piloto, de las características y del contenido de nutrientes de la materia prima utilizada, así como el análisis y comparaciones de las características del biochar resultante de la conversión térmica y los resultados y análisis de las pruebas de bioensayo de toxicidad. La discusión los resultados de los variables de análisis se han comparado con la bibliografía disponible.

4.1. HORNO PIROLITICO PILOTO

El diseño (Anexo 1), elaboración (Figura 9) y los resultados de las evaluaciones de las condiciones operacionales (Anexo 3) del horno piloto han estado realizados para el empleo de la pirolisis lenta de la producción del biochar.

4.1.1. DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL HORNO

Los cilindros (Figura 11b) para el contenido de biomasa residual de conversión térmica requieren de agujeros para el flujo de los compuestos volátiles y de gases generados en el proceso de la pirolisis lenta. Estos cilindros tienen una cerradura hermética que permite el ingreso mínimo o ausencia de oxígeno.

El cilindro interno (Figura 11d) tiene en su base un regulador de flujo de aire per regular la intensidad de las llamas de fuego y la velocidad de calentamiento. Ante un mayor flujo de aire en el cilindro interior mayor será el consumo e suministro de biomasa de combustión y se traduce en un mejor incremento de la temperatura de combustión.

Este horno piloto genera un calor residual que puede ser aprovechable mediante el rediseño del nuevo sistema de contenedor de agua potable que incremente la temperatura del agua.

4.1.2. CONDICIONES OPERACIONALES DEL HORNO

Se evaluaron el mantenimiento constante del suministro de la temperatura de combustión y la mínima generación de las emisiones del humo en el proceso la pirolisis.

El suministro de la temperatura de combustión en la fase de carbonización de la biomasa, denominado también Fase II en el que inicia la pérdida de peso de la masa, se mantuvieron en intervalos de 480-632 °C para los residuos de la gallinaza y de 460-598°C para la pollinaza.

Al horno piloto se suministraron biomasa (leña) de combustión constante y el flujo de aireación necesaria con el fin de minimizar las emisiones de humo principalmente al inicio y durante el proceso. La velocidad de calentamiento aplicada fue baja y los tiempos de residencia de los residuos orgánicos avícolas permanecieron en el horno hasta la finalización de los compuestos volátiles y de gases evidenciados hasta la desaparición de la llama de fuego.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS

4.2.1. ANÁLISIS INMEDIATO

La caracterización de la gallinaza (T1), pollinaza (T2) y la mezcla gallinaza-pollinaza (T3) se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12: Caracterización de los residuos avícolas de análisis inmediato

| Residuos avícolas | C (g/100 g) | N (g/100 g) | C/N | Ceniza (g/100 g) | Humedad (%) | pH |
|--------------------------|--------------------|--------------------|------------|-------------------------|--------------------|-----------|
| Gallinaza (T1) | 17.61 | 1.90 | 9.27 | 62.80 | 10.63 | 8.62 |
| Pollinaza (T2) | 24.53 | 2.48 | 9.89 | 25.19 | 18.84 | 8.74 |
| Mezcla (T3) | 16.00 | 2.37 | 6.75 | 37.38 | 15.44 | 8.51 |

FUENTE: La Molina Calidad Total Laboratorios de la UNALM.

El contenido del carbono orgánico es mayor por lo general en la pollinaza (24.53 g/100g) que la gallinaza (17.61 g/100g). Estos resultados son inferiores a los valores de carbono orgánico en gallinazas reportados por Carchuancho (2012) de 31.71% para gallinaza de jaula y de 38.70% para la gallinaza de piso.

La relación carbono y nitrógeno (C/N) resulta de 9.27 para la gallinaza y de 9.89 para la pollinaza. Es datos confirman los resultados reportados por Carhuancho (2012) para la gallinaza de jaula (9.80) ligeramente inferior a la gallinaza de piso (11.48), mientras la mezcla entre la gallinaza de jaula y de piso una relación intermedia (10.99). El pH de los residuos avícolas varían entre 8.51-8.74 en la escala fuertemente alcalina.

El contenido de humedad para la pollinaza (18.84%) es mayor a la gallinaza (10.63%), estos valores son inferiores a estudios reportados por Estrada (2005) y Carhuancho (2012). La gallinaza tiene contenidos de humedad bajos debido a que estos lotes de muestras han sido secados previamente como materia prima para la conversión al biochar.

4.2.2. ANÁLISIS ELEMENTAL

Los resultados del contenido de macro y micronutrientes como se observa en el análisis inmediato en la Tabla 13:

Tabla 13: Caracterización química de los residuos avícolas

| Residuos avícolas | N (g/100 g) | P (mg/Kg) | K (mg/Kg) | Na (mg/Kg) | Ca (mg/Kg) | Cu (mg/Kg) | Fe (mg/Kg) | Mg (mg/Kg) | Mn (mg/Kg) | Zn (mg/Kg) |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Gallinaza (T1) | 1.90 | 20578.72 | 34835.73 | 7920.46 | 269822.48 | 56.51 | 6363.08 | 87539.58 | 493.95 | 425.53 |
| Pollinaza (T2) | 2.48 | 12882.65 | 12470.29 | 7208.20 | 27217.44 | 42.82 | 1770.82 | 30040.69 | 364.56 | 380.38 |
| Mezcla (T3) | 2.37 | 18312.17 | 24894.81 | 8512.91 | 74349.30 | 55.02 | 3371.57 | 58580.32 | 423.49 | 421.83 |

FUENTE: La Molina Calidad Total Laboratorios de la UNALM.

El contenido del nitrógeno de la pollinaza (2.48) es mayor que la gallinaza (1.90). Los valores son relativamente altos para la gallinaza de jaula (3.24) y gallinaza de piso (3.37) reportados por Carhuancho (2012).

Tortosa *et al.* (2012) sostienen que la gallinaza seca posee una mayor concentración de nutrientes y estos valores depende del tiempo y rapidez del secado; Los resultados de la investigación de la Tabla 13 muestran contenidos de nutrientes de P, K, Na, Ca, Cu, Fe, Mg, Mn y Zn en la gallinaza es mayor que la pollinaza.

4.3. PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR

Las propiedades físicas y químicas del biochar son claves para entender los principales efectos del biochar en el suelo.

4.3.1. ANÁLISIS FÍSICO ELEMENTAL

Características morfológicas y estructurales:



Figura 13: Muestras representativas de biomasa residual y respectivo biochar resultante. a) Muestra para gallinaza, b) Muestra para pollinaza.

FUENTE: Elaboración propia.

Las características resultantes del biochar de la gallinaza y pollinaza son como se muestra en las imágenes de la Figura 13, donde se observa que la forma y tamaño se mantienen relativamente en su forma original. Numerosos autores han evidenciado la influencia de la biomasa original sobre las propiedades físicas en el producto final, biomasa leñosas generan biocarbones prevalentemente gruesas, mientras los biocarbones de residuos avícolas son de estructuras de textura fina como al original (Sohi *et al.*, 2010).

Tiempo y temperatura de pirolisis:

Los resultados del tiempo y promedio de temperatura de pirólisis empleado, como se observa en la Tabla 14 y Anexo 03, muestran los porcentajes de rendimientos y densidad del biochar por cada tratamiento y sus respectivas repeticiones. Cada tratamiento: gallinaza (GG), pollinaza (CP) y una proporción de gallinaza y pollinaza (50% - 50%).

Tabla 14: Análisis físico elemental del biochar

| BIOCHAR | REP | BIOMASA (g) | BIOCHAR RESULTANTE (g) | RENDIMIENTO (%) | DENSIDAD g/cm ³ | PROM. T°C | TIEMPO PROM. PIROLISIS Hrs |
|----------------|-----|-------------|------------------------|-----------------|----------------------------|-----------|----------------------------|
| GALLINAZA (GG) | R1 | 4,000 | 2,567 | 64.18 | 0.567 | 556 | 3 |
| | R2 | 4,000 | 2,578 | 64.45 | 0.580 | 545 | 3 |
| | R3 | 4,000 | 2,572 | 64.30 | 0.564 | 549 | 3 |
| POLLINAZA (CP) | R1 | 3,000 | 1,291 | 43.03 | 0.333 | 529 | 3 |
| | R2 | 3,000 | 1,285 | 42.83 | 0.341 | 519 | 3 |
| | R3 | 3,000 | 1,294 | 43.13 | 0.330 | 523 | 3 |
| GG-CP | R1 | 3,000 | 1,649 | 54.97 | 0.387 | 539 | 3 |
| | R2 | 3,000 | 1,654 | 55.13 | 0.385 | 544 | 3 |
| | R3 | 3,000 | 1,660 | 55.33 | 0.383 | 550 | 3 |

FUENTE: La Molina Calidad Total Laboratorios de la UNALM.

El proceso de pirolisis registró un tiempo promedio de 3.0 horas como se observa en la Tabla 14. El tiempo de duración en la conversión termoquímica de la biomasa depende del incremento de la temperatura, de la emisión o liberación progresiva de los volátiles, de los componentes individuales (humedad) y cantidad de la biomasa.

Al monitorear la temperatura durante todo el proceso se observó un rango promedio de temperatura de 519 a 556 °C. Los resultados de la temperatura promedio y el tiempo de pirolisis evidencian que el proceso pirolisis es lento. Cueto (2016) recomienda la aplicación de estos rangos de temperatura para la producción del biochar a uso agrícola.

Rendimiento del biochar:

Los datos obtenidos y la evaluación del rendimiento del biochar se observan en la Tabla 14. Según el análisis de varianza (ver Anexo 5) el rendimiento entre los tratamientos de los biocarbones presentan diferencias significativas a intervalos de confianza del 95% y el gráfico de diagrama de cajas (Figura 14) muestra la media del rendimiento del biochar de la gallinaza mayor (64.31%) que de la pollinaza (43%) y la mezcla (55.14%).

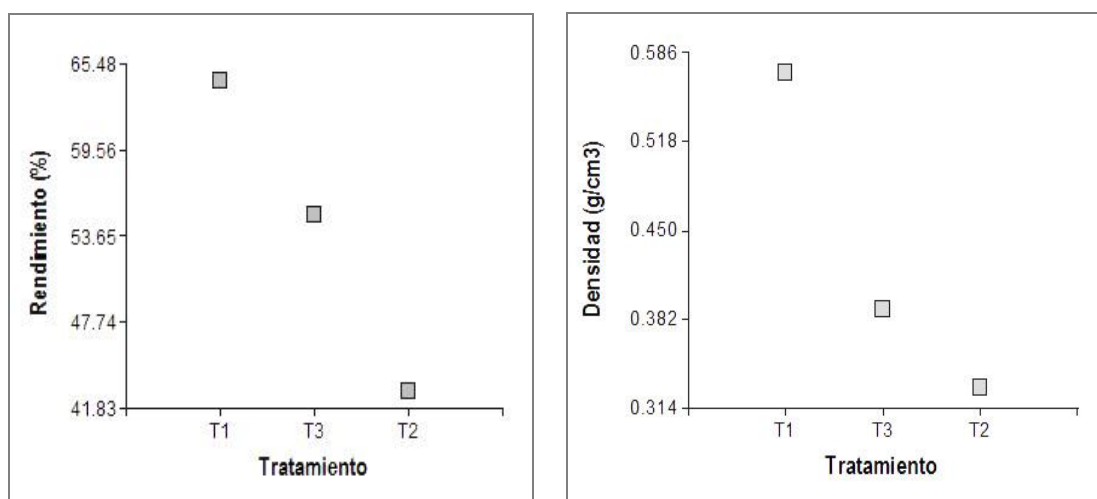


Figura 14: Rendimiento y densidad aparente del biochar

FUENTE: Elaboración propia.

La cantidad de materia prima empleada fue de 4 kg para la gallinaza y 3 kg para la pollinaza. Los rendimientos de los productos de la pirolisis dependen de la naturaleza y de la composición de la materia prima y especialmente de su contenido de lignina y en cenizas y el contenido de humedad (Cueto, 2016).

Los resultados observados de los rendimientos de la conversión térmica de los residuos avícolas en biochar reducen el volumen original de la gallinaza hasta del 61.52%, la pollinaza en 42.9% y la mezcla de la pollinaza y gallinaza en 55.14%. Estos resultados

presentan una ventaja para la conversión en biocarbones los residuos avícolas en términos de volumen y puede ser una buena alternativa de manejo y gestión de los mismos.

Densidad aparente del biochar:

Los datos obtenidos y la evaluación de la densidad aparente del biochar se observan en la Tabla 14. Según el análisis de varianza (ver Anexo 5) la densidad aparente entre los tratamientos de los biocarbones presentan diferencias significativas (p -valor > 0.05) y el gráfico de diagrama de cajas (Figura 14) muestra la media del contenido de densidad aparente del biochar de la gallinaza mayor (0.57 g/cm^3) que de pollinaza (0.33 g/cm^3) y la mezcla (0.39 g/cm^3).

De acuerdo a los resultados observados, se observa una homogeneidad en los valores de densidad aparente de las muestras de biochar a excepción del biochar de la gallinaza el cual presenta el mayor valor de la densidad aparente. En general la densidad aparente del biochar depende de la biomasa original y de la temperatura de pirolisis; según Brown *et al.* (2006), dependen principalmente de la temperatura final de pirolisis y no de la velocidad de calentamiento suministrado.

La densidad promedio optimo es de 0.3 g/cm^3 . Una baja densidad aparente se explica por la naturaleza porosa del biochar, pues presenta un amplio rango de tamaño de los poros y una elevada área superficial. Por lo expuesto, se infiere que su aplicación en los suelos puede reducir la densidad aparente total del suelo, un efecto deseable para el crecimiento de la mayoría de las plantas.

4.3.2. ANÁLISIS QUÍMICO ELEMENTAL

Los estudios recientes sostienen que la composición química de los biocarbones son muy variables pero tienen algunas propiedades comunes a todos los biocarbones: alto contenido de carbono, bajo contenido de nitrógeno, pH alcalino y baja densidad como lo hemos analizado.

Carbono Orgánico Total:

Los datos obtenidos y la evaluación del contenido de carbono orgánico total del biochar, se observa en la Tabla 15. Según el análisis de varianza (ver Anexo 5) el contenido del carbón entre los tratamientos de los biocarbones no presentan diferencias significativas (p -valor > 0.05) y el gráfico de diagrama de cajas (Figura 15) muestra la media del contenido del carbono orgánico del biochar de la pollinaza (9.48 g/100g) mayor que los biocarbones de la mezcla (5.27 g/100g) cuyos datos de este último son muy variables con respecto a los demás tratamientos.

Tabla 15: Análisis químico elemental del biochar resultante en relación a la materia prima original

| BIOCHAR | Rep | C (g/100 g) | N (g/100 g) | C/N | Ceniza (g/100 g) | Humedad (%) | pH |
|----------------|------------|------------------------|------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------|--------------|
| Gallinaza (GG) | R0 | 17.61 | 1.90 | 9.27 | 62.80 | 10.63 | 8.62 |
| | R1 | 8.47 | 1.07 | 7.92 | 80.36 | 0.95 | 10.23 |
| | R2 | 7.85 | 1.08 | 7.27 | 81.84 | 0.59 | 10.21 |
| | R3 | 8.47 | 1.00 | 8.47 | 83.86 | 0.57 | 10.02 |
| Pollinaza (CP) | R0 | 24.53 | 2.48 | 9.89 | 25.19 | 18.84 | 8.74 |
| | R1 | 9.53 | 1.97 | 4.84 | 55.20 | 1.57 | 10.68 |
| | R2 | 10.83 | 2.27 | 4.77 | 52.29 | 1.89 | 10.98 |
| | R3 | 8.07 | 1.91 | 4.23 | 56.47 | 1.93 | 11.01 |
| (GG-CP) | R0 | 16.00 | 2.37 | 6.75 | 37.38 | 15.44 | 8.51 |
| | R1 | 2.71 | 1.43 | 1.90 | 71.53 | 1.27 | 10.18 |
| | R2 | 6.67 | 1.29 | 5.17 | 71.65 | 1.59 | 9.73 |
| | R3 | 6.44 | 1.31 | 4.92 | 69.28 | 1.33 | 10.12 |

FUENTE: La Molina Calidad Total Laboratorios de la UNALM.

Los resultados de concentración media de carbono orgánico total del biochar gallinaza fue 8.26 g/100g pero inferior al contenido en materia prima original (17.61 g/100g), mientras la pollinaza tiene 9.48 g/100g inferior al contenido de materia prima original (24.53 g/100g), la mezcla del biochar contiene un resultado medio de 5.27 g/100g inferior al contenido en materia prima original (16 g/100g).

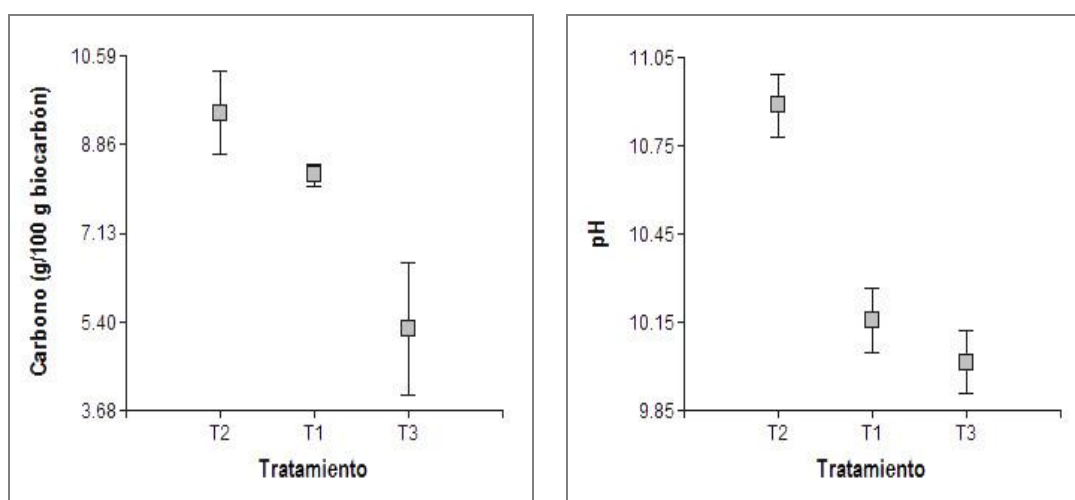


Figura 15: Carbono orgánico total y valores del pH

FUENTE: Elaboración propia.

Los contenidos del carbono orgánico son una característica importante del biochar en los residuos avícolas cuya aplicación a los suelos beneficia la agricultura pues tiene la capacidad de enriquecer el suelo con carbono orgánico, vinculándose con la cantidad y disponibilidad de nutrientes. En el biochar el contenido de carbono puede ser inmovilizado y potencialmente pueden ser estables durante un periodo de tiempo largos y es importante su cuantificación (Mateo, 2013).

Guo *et al.* (2012), reportan intervalos de contenido de carbono total entre 29.0 a 46.10 g/100 de biochar a temperaturas de pirolisis entre 350 - 700°C. Mientras Novak *et al.* (2009), reportaron contenidos de carbono de 46.1 y 44.00 g/Kg de biochar de gallinaza a temperatura de pirolisis de 350°C y 700°C respectivamente. Estos resultados están por debajo de los resultados obtenidos de otros investigadores; podrían haber influido las condiciones de pre tratamiento de secado industrial.

Relación C/N:

Los resultados de la relación C/N en los biocarbones obtenidos entre la media de biocarbones de la gallinaza es de 7.88 y en el biochar de la pollinaza es de 4.61, mientras la mezcla gallinaza - pollinaza resultó una media inferior (3.99). De acuerdo a los datos

observados la media de la relación C/N con respecto a los residuos avícolas originales se reducen significativamente en el biochar de la pollinaza de 9.89 a 4.61 y de 9.27 a 7.88 en la gallinaza. Estos resultados resultaron inferiores a los obtenidos por De Andrade *et al.* (2015) en biocarbones de cama de pollo (13).

La relación C/N del biochar a partir de los residuos avícolas varía ampliamente entre 7 y 400 según Capraro (2012). Esta relación es usada como indicador de la habilidad de un substrato orgánico de mineralizar e introducir el nitrógeno inorgánico aplicado a los suelos. Si la relación es alta causaría una inmovilización de N por los microorganismos y podría causar deficiencia de N para el crecimiento de las plantas. Para evitar esta inmovilización se ha fijado la relación C/N entre 25 y 30 en el caso del compost (García *et al.*, 2014).

Valores de pH:

Según el análisis de varianza (ver Anexo 5) el pH entre la media de los tratamientos presentan diferencias significativas (p -valor < 0.05). En el gráfico de diagrama de cajas (Figura 15) se muestra la media de los valores pH del biochar de la pollinaza mayor (10.89) que de la gallinaza (10.15) y de la mezcla (10.01). Los datos de los valores del pH tienen una distribución homogénea entre los tratamientos.

De acuerdo a los datos observados los valores de pH del biochar de la pollinaza, gallinaza y la mezcla se incrementan en su alcalinidad con respecto a la materia prima original. Por otro lado, el pH del biochar es dependiente del tipo de materia prima empleada, de su composición y de las condiciones de pirolisis. Los valores obtenidos en los diferentes tratamientos son similares a las investigaciones realizados por De Andrade *et al.* (2015), quienes observaron el valor de pH (10.2) muy alcalinos en biochar de camas de pollo.

Según Bedussi (2016) la variación de los valores de pH del biochar es ampliamente demostrado al incrementar la temperatura de combustión e resultan tener valores alcalinos. La mayoría de los biochars producidos a pirolisis lenta puede ir de 7.5 a 10.5, es decir de medianamente alcalinos a fuertemente alcalinos.

4.3.3. ANÁLISIS PROXIMAL

Humedad:

Los datos obtenidos y la evaluación del rendimiento del biochar se observan en la Tabla 15. Según el análisis de varianza (ver Anexo 5) el contenido de humedad entre los tratamientos de los biocarbones presentan diferencias significativas (p -valor < 0.05) y el gráfico de diagrama de cajas (Figura 16) muestra la media del contenido de humedad del biochar de la pollinaza mayor (1.80%) que de la mezcla del biochar gallinaza-pollinaza (1.40%) y de la gallinaza (0.70%).

De acuerdo a los datos observados la media del contenido de humedad del biochar con respecto a los residuos avícolas originales se reducen significativamente, la reducción en la pollinaza fue de 18.84% a 1.80%, mezcla pollinaza-gallinaza de 15.44% a 1.40% y en la gallinaza de 10.63% a 0.70%.

En general, el contenido de humedad del biochar depende de su manejo y de las condiciones de su almacenamiento y transporte. La cantidad de humedad presente en el biochar dependerá del incremento de la temperatura en el proceso de la pirolisis y también del método usado para su determinación que en la presente investigación se usó la norma peruana NTP 311.012 1970.

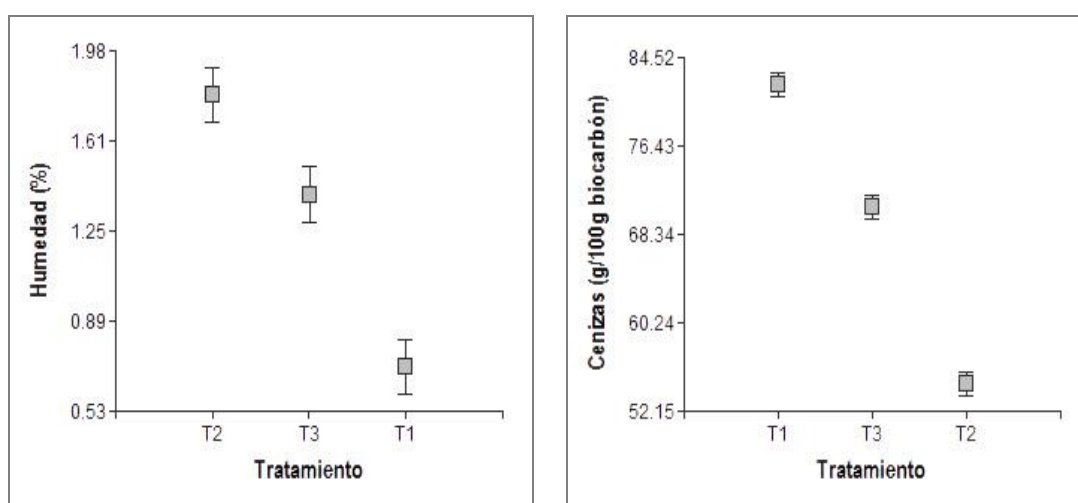


Figura 16: Humedad y cenizas del biochar
FUENTE: Elaboración propia.

Cenizas:

En base a los cálculos del análisis de estadístico del Anexo 5, el contenido de cenizas entre los tratamientos de los biocarbones muestran diferencias significativas (p -valor < 0.05) entre la media de los tratamientos. En el diagrama de cajas (Figura 16) el contenido de cenizas en los tratamientos sigue la secuencia: gallinaza $>$ mezcla gallinaza- pollinaza $>$ pollinaza.

El contenido de cenizas presente en el biochar resultante se incrementa significativamente en relación al contenido en la materia prima original. De acuerdo a los resultados el contenido de cenizas en el biochar de la gallinaza (82.02 g/100 g) es superior a la pollinaza (54.65 g/100 g), esto se debe al mayor contenido de materia inorgánica en la gallinaza y a la temperatura alta de conversión térmica. El contenido de cenizas de biochar de pollinazas son superiores a los resultados reportados por Cantrell *et al.* (2012) de 30.7% y 46.2% en peso a conversión térmica de 350°C y 700°C respectivamente.

Tabla 16: Análisis del contenido de materia inorgánica del biochar

| BIOCHAR | Rep | N (g/100 g) | P (mg/Kg) | K (mg/Kg) | Na (mg/Kg) | Ca (mg/Kg) | Cu (mg/Kg) | Fe (mg/Kg) | Mg (mg/Kg) | Mn (mg/Kg) | Zn (mg/Kg) |
|-------------------|-----|----------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Gallinaza (GG) | R0 | 1.90 | 20578.72 | 34835.73 | 7920.46 | 269822.48 | 56.51 | 6363.08 | 87539.58 | 493.95 | 425.53 |
| | R1 | 1.07 | 36232.88 | 68664.52 | 784.43 | 168798.73 | 101.94 | 6820.06 | 94776.18 | 852.97 | 741.82 |
| | R2 | 1.08 | 36202.59 | 57554.02 | 14809.57 | 218355.81 | 94.92 | 8097.47 | 99560.02 | 825.12 | 717.83 |
| | R3 | 1.00 | 30211.80 | 44683.31 | 13750.12 | 156466.34 | 91.18 | 7910.44 | 89293.98 | 735.10 | 617.36 |
| Pollinaza (CP) | R0 | 2.48 | 12882.65 | 12470.29 | 7208.20 | 27217.44 | 42.82 | 1770.82 | 30040.69 | 364.56 | 380.38 |
| | R1 | 1.97 | 30128.04 | 71165.96 | 764.05 | 64704.42 | 103.14 | 4878.31 | 69302.70 | 925.81 | 706.13 |
| | R2 | 2.27 | 29454.86 | 63095.44 | 14852.05 | 56112.77 | 72.88 | 3755.60 | 63722.21 | 832.86 | 628.33 |
| | R3 | 1.91 | 28618.14 | 61839.87 | 769.25 | 55236.33 | 75.83 | 5552.68 | 61578.07 | 769.25 | 564.60 |
| (GG-CP) | R0 | 2.37 | 18312.17 | 24894.81 | 8512.91 | 74349.30 | 55.02 | 3371.57 | 58580.32 | 423.49 | 421.83 |
| | R1 | 1.43 | 29202.75 | 57816.37 | 14294.83 | 238768.75 | 93.75 | 6193.56 | 97784.22 | 756.60 | 714.87 |
| | R2 | 1.29 | 31553.87 | 59907.88 | 15686.71 | 259249.40 | 103.44 | 5413.49 | 92284.84 | 780.15 | 714.31 |
| | R3 | 1.31 | 27083.38 | 52609.86 | 9707.99 | 304813.26 | 100.29 | 5919.38 | 99263.69 | 735.64 | 705.72 |

FUENTE: La Molina Calidad Total Laboratorios de la UNALM

4.3.4. ANALISIS DE LOS NUTRIENTES

Los biochar derivados de estiércol de animales son relativamente ricos en nutrientes si se comparan con los de plantas. Pero en las condiciones en las que se maneja la pirolisis afecta la composición del biochar, produciendo diferencias significativas en el contenido y disponibilidad de los nutrientes (Martínez, 2015). Los resultados de los análisis de nutrientes del biochar resultante de residuos avícolas se muestran en la Tabla 16.

Nitrógeno Total:

Según el análisis de varianza (ver Anexo 5) el pH entre la media de los tratamientos presentan diferencias significativas (p -valor < 0.05). El gráfico de diagrama de cajas (Figura 17) muestra la media de contenido de nitrógeno total del biochar de la pollinaza mayor (2.05 g/100 g) que de la gallinaza (1.05 g/100 g) y de la mezcla (1.34 g/100 g).

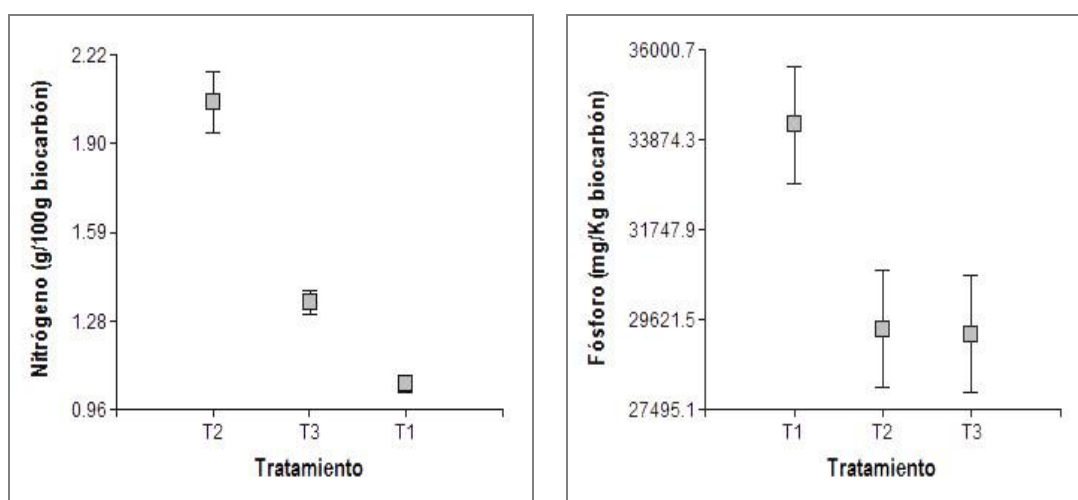


Figura 17: Contenidos de nitrógeno y fósforo total

FUENTE: Elaboración propia.

Entre los macronutrientes, el nitrógeno es el más sensible al calor y por ende los resultados del contenido del nitrógeno en los biocarbones de han reducido por las elevadas temperaturas. La pérdida del contenido de nitrógeno a la conversión térmica de los residuos avícolas favorece la reducción en la contaminación del agua, olores y emisiones de metano. Otras investigaciones realizadas por De Andrade *et al.* (2015) obtuvieron

resultados superiores en contenido de nitrógeno total (3.18 g/100g) en biochar de la pollinaza.

Fósforo Total:

El análisis de varianza (ver Anexo 5) del contenido de fósforo entre la media de los tratamientos no presenta diferencias significativas (p -valor < 0.05). El gráfico de diagrama de cajas (Figura 17) muestra la media de contenido de fósforo total del biochar de la pollinaza mayor que de la gallinaza y de la mezcla gallinaza-pollinaza.

El contenido de fósforo presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. Las variabilidades de resultados en contenido de fósforo total, considera Capraro (2012), pueden ser atribuidas a la calidad de la materia prima y a las diferentes condiciones del proceso productivo. Generalmente niveles significativos de fósforo disponible se han encontrado en los biocarbones producidos de biomásas de origen animal (gallinazas, pollinazas o camas de aves de corral) que la biomasa vegetal.

Potasio:

El análisis de varianza (ver Anexo 5) del contenido de potasio entre la media de los tratamientos no presenta diferencias significativas (p -valor < 0.05). El gráfico de diagrama de cajas (Figura 18) muestra la media de contenido de potasio del biochar de la pollinaza mayor que de la gallinaza y mezcla gallinaza - pollinaza.

El contenido de potasio presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. La concentración media de potasio del biochar de gallinaza fue de 56967.28 mg/kg, el biochar de pollinaza tiene 65367.09 mg/kg, mientras para la mezcla resultó 56778.04 mg/Kg. Los datos son superiores a los reportados por De Andrade *et al.* (2015) donde reportan contenidos de potasio de 47.2 g/kg en biocarbones de camas de pollos y Cantrell *et al.* (2012) reportan concentraciones similares de 48.5 - 74.0 g/kg para conversiones térmicas a 350°C-700°C.

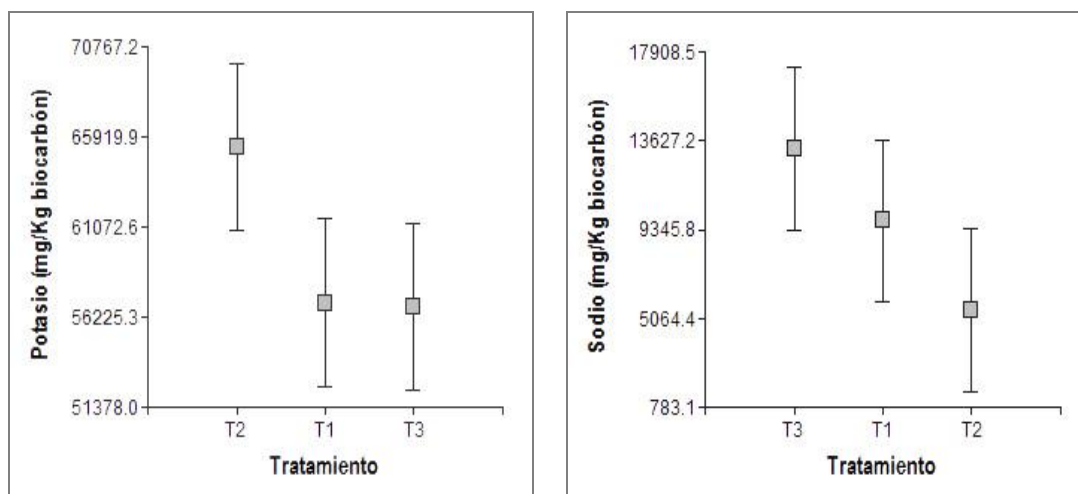


Figura 18: Contenidos de potasio y sodio
 FUENTE: Elaboración propia.

Estudios de Guo *et al.* (2012) reportaron variaciones desde 28.0 a 70.6 g/kg para procesos de pirólisis a temperaturas desde 400°C a 620°C. Los mismos investigadores al procesar la pollinaza a 400°C, 500°C y 550°C el contenido de potasio fueron de 85.70, 87.92 y 89.69 g/kg respectivamente. Mientras Capraro (2012) posicionó contenidos de fósforo total de 22.1 g/kg en biochar de camas de pollo.

Sodio:

El análisis de varianza (ver Anexo 5) del contenido de sodio entre la media de los tratamientos no presenta diferencias significativas (p -valor < 0.05). El gráfico de diagrama de cajas (Figura 18) muestra la media de contenido de sodio del biochar de la gallinaza mayor que de la pollinaza.

El contenido de sodio presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. La concentración media de sodio del biochar de gallinaza es de 9781.37 mg/kg, el biochar de pollinaza tiene 5461.78 mg/kg, mientras para la mezcla resultó 13229.84 mg/kg. Estos resultados son inferiores al contenido de sodio (17220 mg/Kg) reportado por Reiter y Middleton (2016) quienes obtuvieron los biocarbones de pollinaza a temperatura de 450°C.

Calcio:

El análisis de varianza (ver Anexo 5) del contenido de calcio entre la media de los tratamientos presenta diferencias significativas (p -valor < 0.05). El gráfico de diagrama de cajas (Figura 19) muestra la media de contenido de calcio del biochar de la gallinaza mayor que de la pollinaza este último con datos de distribución homogénea.

El contenido de calcio presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. La concentración media de calcio del biochar de pollinaza fue de 58684.51 mg/kg, el biochar de gallinaza reporta un contenido medio de 181206.96 mg/Kg, mientras la mezcla contiene 267610.47 mg/Kg. superiores a los De Andrade *et al.* (2015).

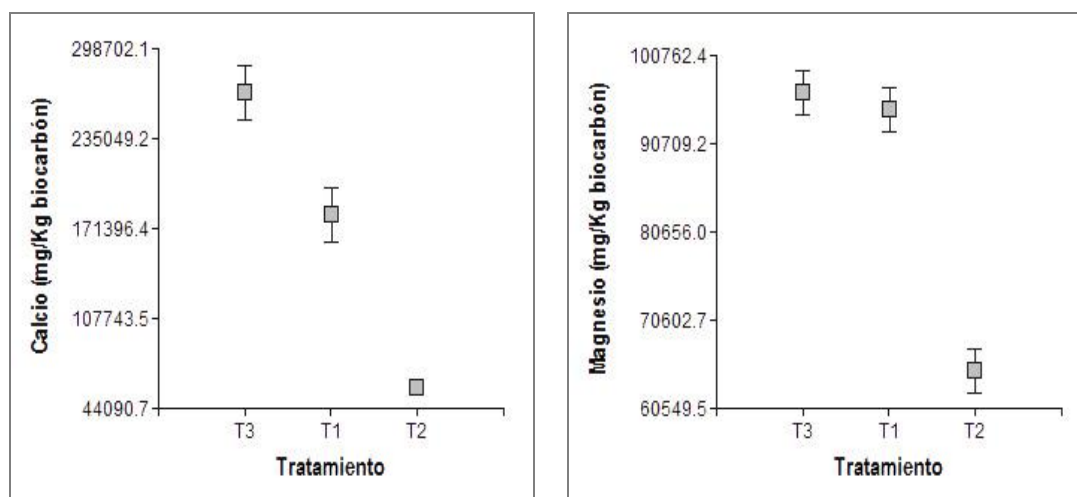


Figura 19: Contenidos de calcio y magnesio

FUENTE: Elaboración propia.

Magnesio:

El análisis de varianza (ver Anexo 5) del contenido de magnesio entre la media de los tratamientos presenta diferencias significativas (p -valor < 0.05). El gráfico de diagrama de cajas (Figura 19) muestra la media de contenido de magnesio del biochar de la gallinaza mayor que de la pollinaza.

El contenido de magnesio presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. Las concentraciones de

potasio, calcio y magnesio en el biochar de los residuos avícolas aplicado a los suelos otorgan el efecto enclavado con la posibilidad de influir en la fertilidad del suelo, disminución de la saturación del aluminio particularmente en los suelos ácidos.

Cobre:

El análisis de varianza (ver Anexo 5) del contenido de cobre entre la media de los tratamientos no presenta diferencias significativas (p -valor < 0.05). El gráfico de diagrama de cajas (Figura 20) muestra la media de contenido de cobre del biochar de la gallinaza mayor que de la pollinaza este último con datos de distribución heterogénea. El contenido de cobre presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza.

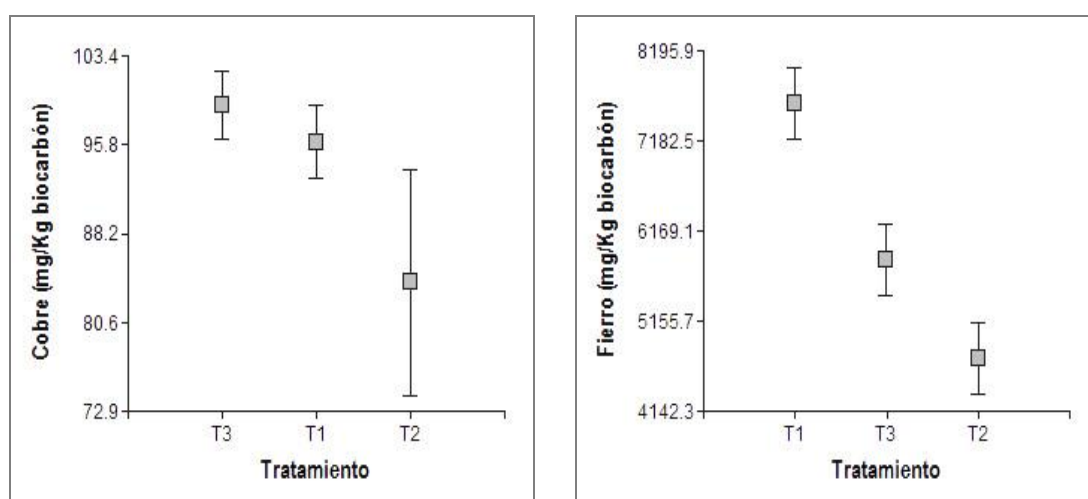


Figura 20: Contenidos de cobre y fierro
FUENTE: Elaboración propia.

La concentración media de cobre del biochar de gallinaza es 96.01 mg/kg, el biochar de la pollinaza tiene 83.95 mg/kg, mientras para la mezcla resultó 83.95 mg/kg. Los resultados obtenidos del contenido de cobre son similares a los biocarbones de cama de pollo a los reportados por Reiter y Middleton (2016), quienes obtuvieron un contenido de 84.10 mg/kg. a 400°C de conversión térmica.

Hierro:

Los cálculos del análisis de estadístico del Anexo 5 muestran los resultados de concentraciones del hierro entre tratamientos es significativa (p -valor < 0.05); es decir hay una diferencia significativa entre la media de las concentraciones de Fe entre el biochar de la gallinaza y pollinaza. En el diagrama de cajas (Figura 20) el contenido del hierro siguen la secuencia: gallinaza $>$ mezcla gallinaza - pollinaza $>$ pollinaza.

El contenido del hierro presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. La concentración media del hierro del biochar de gallinaza fue mayor (7609.32 mg/kg), de la pollinaza tuvo un contenido inferior (4728.86 mg/kg), mientras para la mezcla resultó intermedio (5842.14 mg/Kg). Reiter y Middleton (2016) reportaron resultados similares de 6010 mg/Kg. en biocarbones de cama de pollo a conversión térmica de 400°C.

Manganeso:

Los cálculos del análisis de estadístico del Anexo 5 muestran los resultados donde la media de concentraciones del manganeso entre tratamientos no es significativa. La media del contenido de los tres tratamientos es 801.50 mg/kg y con 21.05 de error estadístico. En el diagrama de cajas (Figura 21) el contenido de mangnesio siguen la secuencia: pollinaza $>$ gallinaza $>$ mezcla gallinaza - pollinaza.

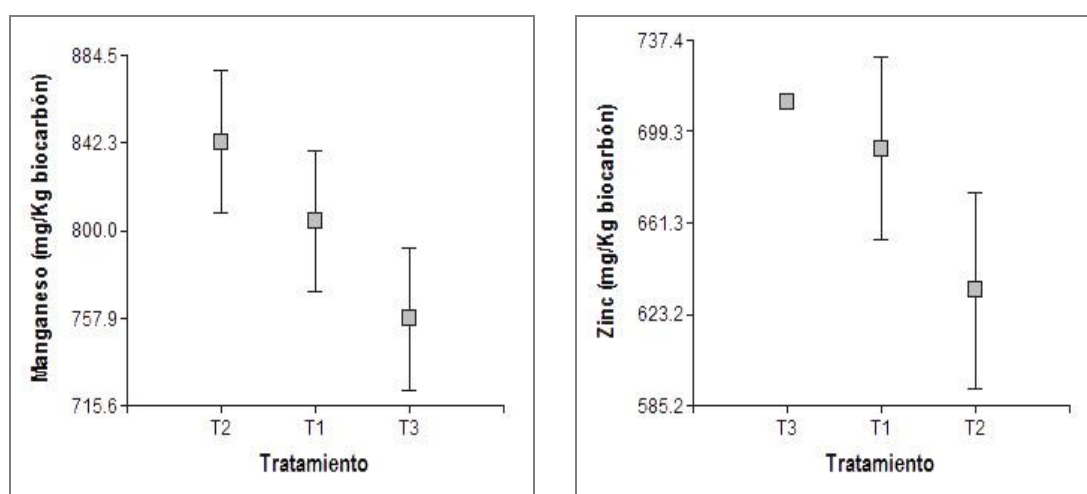


Figura 21: Contenidos de manganeso y cinc
FUENTE: Elaboración propia.

El contenido de manganeso presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. La concentración media de manganeso del biochar de pollinaza es de 842.64 mg/kg, de gallinaza resultó 804.40 mg/kg, mientras la mezcla gallinaza - pollinaza reportó una media de 757.46 mg/kg. Estos resultados están dentro del intervalo reportado por Cantrell *et al.* (2012) para conversiones térmicas de camas de pollo de 350°C - 700°C obtuvieron concentraciones de manganeso de 640 - 948 mg/kg respectivamente.

Cinc:

Los cálculos del análisis estadístico del Anexo 5 muestran los resultados donde la media de concentraciones del cinc entre tratamientos no es significativa. La media del contenido de los tres tratamientos es 679.00 mg/kg y con 20.03 de error estadístico. En el diagrama de cajas (Figura 21) el contenido de cinc siguen la secuencia: mezcla gallinaza - pollinaza > gallinaza > pollinaza.

El contenido del cinc presente en el biochar resultante se incrementa con respecto al contenido en la materia prima original de la gallinaza y pollinaza. La concentración media de cinc del biochar de pollinaza fue inferior de 633.02 mg/kg, de la gallinaza resultó de 692.34 mg/kg, mientras la mezcla gallinaza - pollinaza reportó una media de 711.63 mg/kg. Los resultados son inferiores a los reportados por Reiter y Middleton (2016) quienes obtuvieron un contenido de 948.90 mg/kg. en biocarbones de cama de pollo para conversión térmica a 400°C.

Al examinar las características fisicoquímicos del biochar que presentan una relación lineal entre las variables a un intervalo de confianza ($p\text{-value} < 0.05$) como se muestra en la Tabla 17, se ha encontrado que algunas variables tienen una correlación alta y directa o inversa.

En el biochar de la gallinaza la correlación entre el contenido del Cinc-Manganeso es alta y directa así como entre el contenido del Hierro-Sodio. El coeficiente de determinación (R^2) entre el Cinc-Manganeso indica que el 99.79% de la variabilidad del contenido de Cinc en el biochar de la gallinaza depende del contenido del Manganeso, mientras el coeficiente de determinación (R^2) entre Hierro-Sodio indica que el 99.54% de la variabilidad del contenido del Hierro en el biochar de la gallinaza depende del contenido del Sodio. La

correlación entre el contenido del Potasio-Ceniza del biochar de la gallinaza la correlación es alta pero inversa. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido indica que el 99.78% de la variabilidad del contenido del Potasio en el biochar de la gallinaza depende del contenido de la Ceniza.

En el biochar de la pollinaza la correlación es alta y directa entre los entre los valores del pH-humedad, entre el Calcio-Potasio y del Cinc-Manganeso, mientras la correlación es perfecta e inversa para los valores del pH-Calcio, la humedad-Calcio y del Cinc-Manganeso.

Tabla 17: Correlacione entre contenido fisicoquímico del biochar

| Biochar de la Gallinaza | | | | | |
|---|---------|----------|----------------|----------------------|----------------|
| | | n | Pearson | R² | p-value |
| Zn | Mn | 3 | 0.9990 | 0.9979 | 0.028856 |
| K | Ceniza | 3 | -0.9989 | 0.9978 | 0.029597 |
| Fe | Na | 3 | 0.9977 | 0.9954 | 0.043345 |
| Biochar de la Pollinaza | | | | | |
| pH | Ca | 3 | -1.00000 | 1.0000 | 0.000998 |
| Humedad | Ca | 3 | -0.99984 | 0.9996 | 0.011253 |
| pH | Humedad | 3 | 0.99981 | 0.9996 | 0.012250 |
| Ca | K | 3 | 0.99918 | 0.9983 | 0.025785 |
| K | pH | 3 | -0.99912 | 0.9982 | 0.026783 |
| Zn | Mn | 3 | 0.99873 | 0.9974 | 0.032111 |
| Biochar de la mezcla Gallinaza-Pollinaza | | | | | |
| P | Mn | 3 | 0.999993 | 0.9999 | 0.002331 |
| pH | Humedad | 3 | -0.99853 | 0.9970 | 0.034507 |
| K | Na | 3 | 0.998338 | 0.9966 | 0.036700 |

FUENTE: Elaboración propia.

El coeficiente de determinación (R^2) obtenido indica que el 100% de la variabilidad de los valores del pH en el biochar de la pollinaza depende del contenido del Calcio. El 99.96%

de la variabilidad del contenido de humedad en el biochar de la pollinaza depende del contenido del Calcio. El 99.96% de la variabilidad de los valores del pH en el biochar de la pollinaza depende de la humedad. El 99.83% de la variabilidad del contenido de Calcio en el biochar de la pollinaza depende del contenido de Potasio. El 99.82% de la variabilidad del contenido del Potasio en el biochar de la pollinaza depende de los valores del pH. El 99.74% de la variabilidad del contenido de Cinc en el biochar de la pollinaza depende del contenido del Manganeso.

En el análisis de la correlación del biochar de la mezcla gallinaza- pollinaza es alta y directa para el contenido del Fósforo-Manganeso y del Potasio-Sodio. Mientras para los valores de pH-humedad la correlación es alta e inversa. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido indica que el 99.99% de la variabilidad del contenido de Fósforo en el biochar de la gallinaza-pollinaza depende del contenido del Manganeso. El 99.70% de la variabilidad de los valores de pH en el biochar de la gallinaza-pollinaza depende del contenido de la humedad. El 99.66% de la variabilidad del contenido de Potasio en el biochar de la gallinaza-pollinaza depende del contenido de Sodio.

En nuestro país no existen estudios para los tipos de materia prima empleados en esta presente investigación. Se ha logrado que las condiciones operacionales de pirolisis lenta en el horno piloto sea óptimo para la generación del biochar.

En el resumen de los análisis de variables de investigación, como se muestra en la Tabla 18, los rendimientos del biochar resultaron superiores para los biocarbones de la gallinaza (64.31%) y de la mezcla (55.14%) e inferior la pollinaza (43.00%). La densidad aparente se mantuvo superior a los límites de aceptación (0.30 g/cm^3) en los tres tratamientos donde los biocarbones de la gallinaza fueron superiores (0.57 g/cm^3).

El contenido de cenizas en el biochar de la gallinaza fue superior (82.02 g/100 g) a la pollinaza (54.65 g/100 g). Los valores del pH de biochar se incrementaron con respecto a la materia prima original y resultaron fuertemente alcalinos con valores de 10.89 en la pollinaza, 10.15 para la gallinaza y la mezcla de biocarbones el pH fue de 10.01. El contenido de humedad en los biocarbones se redujeron hasta 0.70% en la gallinaza, en la pollinaza fue del 1.80% y de la mezcla de 1.40%.

Tabla 18: Resumen de análisis de variables de investigación de biochar de gallinaza y pollinaza

| BIOCHAR | Variables de análisis de los biocarbones de investigación | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|------------------------------|-------------------|-----------|-------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Rend. (%) | Densid. (g/cm ³) | Cenizas (g/100 g) | Humd. (%) | pH | C (g/100 g) | N (g/100 g) | P (mg/Kg) | K (mg/Kg) | Na (mg/Kg) | Ca (mg/Kg) | Cu (mg/Kg) | Fe (mg/Kg) | Mg (mg/Kg) | Mn (mg/Kg) | Zn (mg/Kg) |
| Gallinaza (T1) | 64.31 | 0.570 | 82.02 | 0.70 | 10.15 | 8.26 | 1.05 | 34215.76 | 56967.283 | 9781.3733 | 181206.96 | 96.013 | 7609.32 | 94543.39 | 804.4 | 692.34 |
| Pollinaza (T2) | 43.00 | 0.335 | 54.65 | 1.80 | 10.89 | 9.48 | 2.05 | 29400.35 | 65367.09 | 5461.7833 | 58684.507 | 83.95 | 4728.86 | 64867.66 | 842.64 | 633.02 |
| Gallinaza-Pollinaza (T3) | 55.14 | 0.385 | 70.82 | 1.40 | 10.01 | 5.27 | 1.34 | 29280 | 56778.037 | 13229.843 | 267610.47 | 99.16 | 5842.14 | 96444.25 | 757.46 | 711.63 |

FUENTE: Elaboración propia.

El contenido de carbono orgánico total y del nitrógeno se reduce levemente con respecto a la materia prima original, cuyos contenidos en biocarbón de la pollinaza fue 9.48 g/100g y 2.05 g/100g respectivamente.

A excepción del contenido del nitrógeno todos los macro y microelementos en los biocarbones tienen contenidos superiores respecto a la materia prima original. El contenido medio de los tratamientos de los biocarbones de Fósforo (34215.76 mg/Kg), Sodio (9781.3733 mg/Kg), Calcio (181206.96 mg/Kg), Cobre (96.013 mg/Kg), Hierro (7609.32 mg/Kg), Magnesio (94543.39 mg/Kg), y Cinc (9781.3733 mg/Kg) fueron superiores en el biochar de la gallinaza.

El contenido de Carbono (9.48 g/100g), Nitrógeno (2.05 g/100g), Potasio (29400.35 mg/Kg) y Manganeso (842.64 mg/Kg) resultaron superiores en el biochar de la pollinaza con respecto al biochar de la gallinaza.

4.4. ANÁLISIS DE BIOENSAYO DE GERMINACIÓN

Siguiendo la metodología del test para la determinación del Índice de Germinación (IG), se determinó la media del porcentaje de Índice de Germinación (IG) como el producto del Porcentaje de Germinación Relativa (PGR) y el Crecimiento del Tallo Relativo (CTR), cuyos resultados se pueden observar en la Tabla 19 y el Anexo 3.

Los indicadores de los bioensayos para los biocarbones de la gallinaza aplicados en las semillas de rabanito resultaron mayores (100%) para el Porcentaje de Germinación Relativo (PGR) en tratamientos del 3% y 7%, pero el crecimiento del tallo relativo (CTR) mostró un buen crecimiento (134.02%) en el tratamiento del 3% mientras resultó inferior (96.39%) al tratamiento del 7%. En todos los tratamientos el Índice de Germinación (IG) fue superior (109.61%).

Los indicadores de los bioensayos para los biocarbones de la pollinaza aplicados en las semillas de rabanito como se muestran en la Figura 22, resulta mayor (103.70%) para el Porcentaje de Germinación Relativo (PGR) en el tratamientos del 1%, pero el Crecimiento

del Tallo Relativo (CTR) fue mayor (95.62%) en el tratamiento del 1%, mientras resultaron inferiores en todos los demás tratamientos.

Tabla 19: Indicadores de bioensayos de toxicidad del biochar

| TRATS | Gallinaza (GG) | | | Pollinaza (CP) | | | |
|-------|----------------|---------------|---------------|----------------|---------------|--------------|--------------|
| | PGR | CTR | IG (%) | PGR | CTR | IG (%) | |
| T 1 | R1 | 80.83 | 159.44 | 128.88 | 111.11 | 86.69 | 96.32 |
| | R2 | 69.28 | 93.13 | 64.52 | 100.00 | 92.85 | 92.85 |
| | R3 | 92.38 | 146.59 | 135.42 | 100.00 | 107.33 | 107.33 |
| | | 80.83 | 133.05 | 109.61 | 103.70 | 95.62 | 98.84 |
| T 2 | R1 | 92.38 | 132.26 | 103.18 | 88.89 | 89.64 | 79.68 |
| | R2 | 103.93 | 124.50 | 116.07 | 100.00 | 37.23 | 37.23 |
| | R3 | 103.93 | 145.30 | 109.62 | 88.89 | 61.31 | 54.50 |
| | | 100.08 | 134.02 | 109.62 | 92.59 | 62.73 | 57.14 |
| T 3 | R1 | 92.38 | 109.76 | 111.77 | 66.67 | 26.68 | 17.78 |
| | R2 | 92.38 | 135.34 | 110.34 | 55.56 | 32.01 | 17.78 |
| | R3 | 92.38 | 126.81 | 110.58 | 66.67 | 63.98 | 42.65 |
| | | 92.38 | 123.97 | 110.90 | 62.96 | 40.89 | 26.07 |
| T 4 | R1 | 115.47 | 63.57 | 110.60 | 33.33 | 26.91 | 8.97 |
| | R2 | 115.47 | 104.93 | 110.69 | 55.56 | 17.85 | 9.92 |
| | R3 | 80.83 | 120.67 | 110.73 | 55.56 | 13.03 | 7.24 |
| | | 103.93 | 96.39 | 110.68 | 48.15 | 19.26 | 8.71 |

FUENTE: Elaboración propia. PRG=Porcentaje de Germinación Relativa;
CTR= Crecimiento de Tallo Relativo; IG= Índice de Germinación.

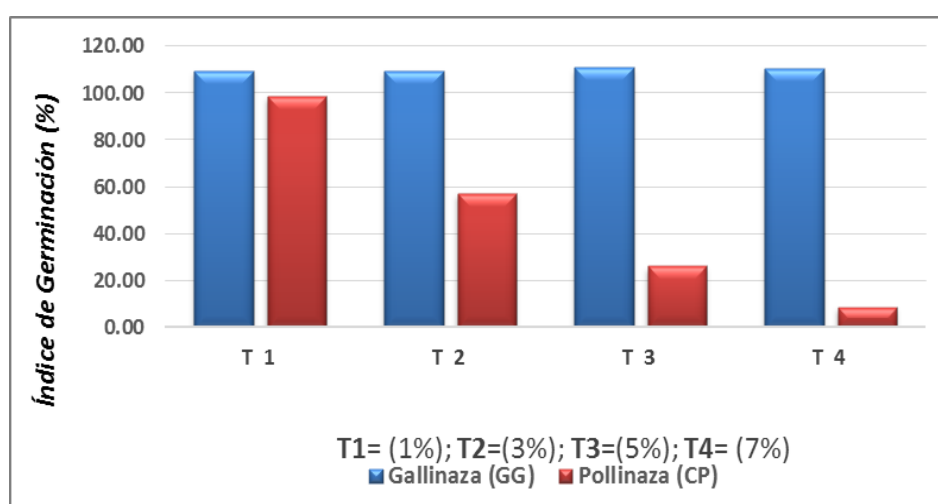


Figura 22: Índice de germinación en los cuatro tratamientos del biochar

FUENTE: Elaboración propia.

En base a estos resultados, según Zucconi *et al.* citado por Varnero (2007), establece criterio de interpretación: valores de IG $\geq 80\%$ indicarían que no hay sustancias fitotóxicas o están en muy baja concentración; si el IG $\leq 50\%$ indicaría que hay una fuerte presencia de sustancias fitotóxicas y si se obtiene un valor entre 50% y 80% se interpretaría como la presencia moderada de estas sustancias.

Los rabanitos son especies que son sensibles a sustancias fitotóxicas y la concentración pueden inhibir la germinación de las semillas. Los resultados de las pruebas de bioensayos de biocarbones de origen de la pollinaza en tratamientos de 5% y 7% indican fuerte presencia de sustancias fitotóxicas.

Los resultados de los 10 días de Crecimiento de Tallo y Peso Fresco de plántulas de semillas de rabanito de los cuatro tratamientos y sus respectivas dosis de biochar se observa en la Tabla 20.

Tabla 20: Crecimiento de tallo y peso fresco de plántulas de semillas de rabanito

| Trats. (%) | Crecimiento de Tallo (cm) | | Peso Fresco (g) | |
|---------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Gallinaza (GG) | Pollinaza (CP) | Gallinaza (GG) | Pollinaza (CP) |
| T 1 | 10.99 | 6.12 | 0.9340 | 0.6993 |
| | 6.42 | 6.56 | 0.4618 | 0.6455 |
| | 10.10 | 7.58 | 0.8429 | 0.8116 |
| | 9.17 | 6.75 | 0.7462 | 0.7188 |
| T 2 | 9.11 | 6.26 | 0.6790 | 0.5227 |
| | 8.58 | 3.31 | 0.7983 | 0.4464 |
| | 10.01 | 4.38 | 0.8027 | 0.4138 |
| | 9.23 | 4.65 | 0.7600 | 0.4610 |
| T 3 | 7.56 | 1.88 | 0.6032 | 0.2426 |
| | 9.33 | 2.26 | 0.7980 | 0.2107 |
| | 8.74 | 4.52 | 0.8024 | 0.4394 |
| | 8.54 | 2.89 | 0.7345 | 0.2976 |
| T 4 | 4.38 | 1.90 | 0.5444 | 0.1008 |
| | 7.23 | 1.26 | 0.8048 | 0.1306 |
| | 8.31 | 0.92 | 0.6052 | 0.1738 |
| | 6.64 | 1.36 | 0.6515 | 0.1351 |

FUENTE: Elaboración propia.

Al evaluar el crecimiento de las plántulas de las semillas de rabanito como muestra la Figura 23, presenta una media de crecimiento mayor (9.23 cm) el tratamiento al 3% de biochar de la gallinaza (GG) y un crecimiento menor (6.64 cm) en tratamientos de 7%. Mientras para el biochar de la pollinaza (CP) aplicados en tratamientos al 1%, la media de crecimiento de las plántulas fueron altos (6.75 cm), pero en tratamientos al 3%, 5% y 7% los resultados tienden a disminuir. Se concluye que la elongación de los tallos es mejor en suelos donde se aplican los biocarbones de la gallinaza.

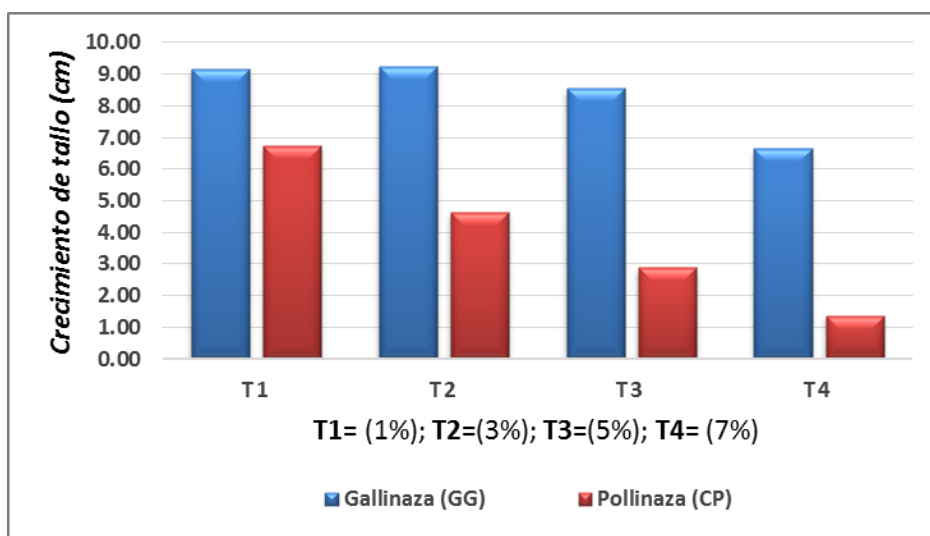


Figura 23: Crecimiento de tallo de plántulas de rabanito.
FUENTE: Elaboración propia.

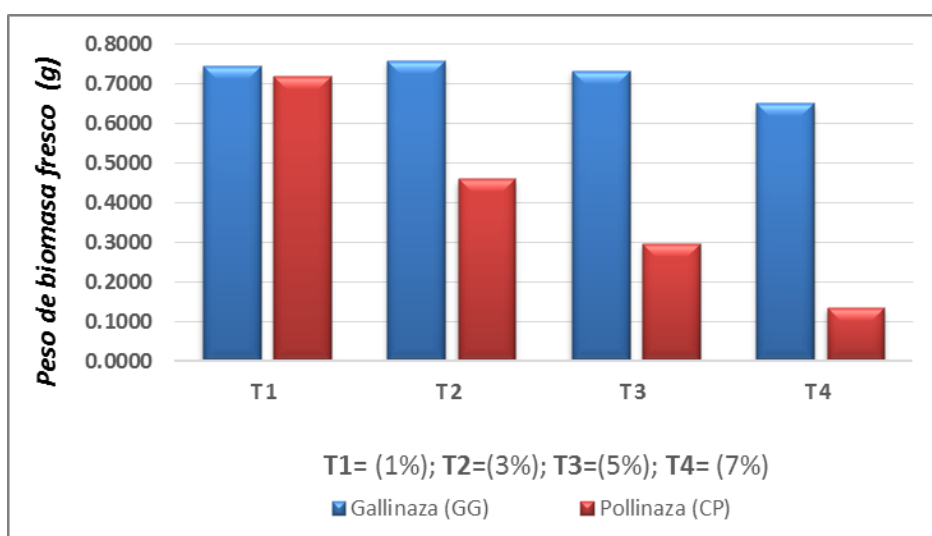


Figura 24: Peso fresco de la longitud del crecimiento de las plántulas de rabanito.
FUENTE: Elaboración propia.

Con relación al Peso Fresco de las plántulas de rabanito de los primeros diez días, como se observa en la Tabla 20 y la Figura 24, se evidencia las medias del tratamiento al 3% de biochar de la gallinaza (GG) presenta un peso fresco mayor (0.7600 g) y el tratamiento al 7% evidencia un peso fresco muy bajo (0.6515 g).

El biochar de la pollinaza (CP) aplicados en tratamientos de 1% de dosis, la media de peso fresco de las plántulas fueron altos (0.7188 g), pero en tratamientos al 3%, 5% y 7% la media del peso fresco de los tallos fueron inferiores de 0.4610 g, 0.2976 g y 0.1351 g respectivamente.

V. CONCLUSIONES

1. Se diseñó un horno piloto de doble tambor con fines exclusivos de análisis e investigación del biochar de residuos avícolas. En el funcionamiento del horno se alcanzaron condiciones operacionales de pirolisis lenta óptima para la producción del biochar. La temperatura promedio fue de 540°C y en tiempo de residencia de 2.5-3 horas para obtener un conjunto mínimo de datos analíticos para su evaluación.
2. Los rendimientos del biochar resultaron superiores para los biocarbones de la gallinaza (61.52%) y de la pollinaza (42.9%). La densidad aparente se mantuvo superior (0.33 g/cm³) a los límites de aceptación (0.30 g/cm³). Los valores de pH resultaron fuertemente alcalinos en todas las muestras del biochar. El contenido de cenizas en el biochar de la gallinaza (82.02 g/100 g) fue superior a la pollinaza (54.65 g/100 g) que resulta cuantitativo para el contenido de materia inorgánica. La humedad en los biocarbones se redujeron hasta 0.70% en la gallinaza.
3. Los contenidos de C, P, K, Cu, Mg, y Zn no tienen diferencias significativas entre la media de los tratamientos. Mientras el contenido de N, Ca, Fe y Mg resultaron tener diferencias significativas. El contenido de P, Na, Ca, Mg, Cu, Fe y Zn fueron mayores en el biochar de la gallinaza, mientras el contenido de C, N, P, K y Mn resultaron superiores en el biochar de la pollinaza.
4. En las pruebas de bioensayos, el índice de germinación resulta significativo para dosis del 3% en biocarbones de la gallinaza (80.06%) y en dosis del 1% en el biochar de la pollinaza (62.82%). Mientras el crecimiento del tallo resulta significativo en dosis del 3% en el biochar de la gallinaza y en el 1% de la pollinaza. Similarmente el peso fresco del tallo resulta significativo en dosis del 3% en el biochar de la gallinaza y en el 1% de la pollinaza.

VI. RECOMENDACIONES

1. Para aprovechar los co-productos del proceso de pirolisis es necesario implementar mejor la salida de compuestos volátiles y del syngas en el reactor. Esta energía potencial pueden ser utilizados en cocinas mejoradas diseñadas para su aprovechamiento o en sistemas de calefacción de ambientes o infraestructuras que permiten la disminuir del consumo de otros combustibles.
2. Se recomienda un estudio técnico y cálculo de emisiones de gases producidos en el reactor durante el proceso de la pirolisis.
3. Es necesarios realizar investigaciones para mejorar las condiciones del reactor, optimizar la producción del biochar con diferentes tipos de materias primas de origen agronómico. Ampliar el análisis del contenido de otros nutrientes no realizados en la presente investigación.
4. Es necesario establecer y manejar lineamientos estandarizados para el análisis de las características básicas del biochar puesto que se plantean diferentes metodologías ajustadas para cada investigación. La producción de biochar puede considerarse un nuevo modelo de agricultura sostenible de aprovechamiento de la biomasa residual.
5. Para la aplicación del biochar en los suelos es necesario realizar diversas pruebas experimentales para establecer las cantidades para cada tipo de suelos y cultivos.
6. Para el cumplimiento de las normas legales de gestión de los residuos orgánicos de origen agropecuario se recomienda divulgar esta alternativa de tecnología medioambiental en todos los sectores interesados en incrementar el valor agregado de los subproductos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABENZA, DP. 2012. Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Memoria del Proyecto de fin de carrera en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona. España. 111 p.
2. AKER NARVÁEZ, CE; SOTO, G; IMBACH, A; CASTILLO, X Y GARRO, F. 2014a. VII. Artículo 1. Efecto de la aplicación de biocarbón, gallinaza y fertilizantes sintéticos en la retención de humedad y otras características del suelo en el rendimiento de maíz (*Zea mays*), en tres texturas de suelo en León, Nicaragua. 15-33 p. Disponible en internet http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/.../Efecto_de_la_aplicacion_de_biocarbo_n.pdf
3. ALVARADO, E; LANZA, G; SIERRA, O; FLORES, C Y MEJÍA, L. 2009. Guía de producción más limpia para la producción avícola. International Resources Group (IRG), Centro Nacional de Producción más Limpia de Honduras (CNP+LH). Honduras. 97 p. Consulta: 12 de dic. 2017. Disponible en internet en: <http://www.fedavih.com/pdf/pdf2.pdf>
4. BARRES BENLLOCH, T. 2012. Producción y consumo sostenible y residuos agrarios. Ministerio de Agricultura, alimentación y Medio Ambiente. España. 92 p.
5. BECAGLI, M. 2016. Studio sugli effetti sinergici tra compost e biochar del miglioramento della qualità del suolo. Elaborato finale per ottenere il Titolo di Laurea Magistrale Scienze Agrarie, Alimentari e Agroambientali. Universidad de Pisa. Italia. 128 p.
6. BEDUSSI, F. 2016. Valutazione delle potenzialità del biochar come componente dei substrati di coltivazione. Tesi de Dottorato di Ricerca in Ecología Agraria. Università degli Studi di Milano. Italia. 142 p.

7. BOLAN, NS; SZOGI, AA; CHUASAVATHI, B; SESHADRI, MJ; ROTHROCK JR., MJ Y PANNEERSELVAM, P. 2010. Uses and management of poultry litter. *World's Poultry Science Journal* 66 (4): 673 - 698.
8. BRICK, S Y WISCONSIN, M. 2010. Biochar: Assessing the promise and risks to guide U.S. policy. NRDC Issue Paper nov. 2010. Natural Resources Defense Council. USA. Consulta: 20 de dic. 2016. Disponible en internet en http://www.nrdc.org/energy/files/biochar_paper.pdf.
9. BROWN, RA; KERCHER, AK; NGUYEN, TH; NAGLE, DC Y BALL, WP. 2006. Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents. *Organic Geochemistry*, 37(3), 321-333.
10. BRUVOLL, A. 1998. Taxing virgin materials: an approach to waste problems. *Resources, Conservation and Recycling* 22(1):15-29. Consulta: 10 de setiembre del 2016. Disponible en internet en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344997000402>
11. CABALEIRO NUÑEZ, FA. 2013. Valorización agronómica del estiércol deshidratado y granulado de pollos en cultivos hortícolas. Tesis doctoral Universidad Santiago de Compostela. 217 p.
12. CANTRELL, KB; HUNT, PG; UCHIMIYA M, NOVAK, JM Y RO, KS. 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, 107, 419-428 p.
13. CAPRARO, G. 2012. Il biochar como mezzo per la riduzione delle emissioni di CO₂ in atmosfera. Tesi de Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio. Universidad de Bologna. Italia. 356 p.
14. CARHUANCHO LEÓN, FM. 2012. Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración del biol en biodigestores tipo Batch como propuesta al manejo de residuo avícola. Tesis para optar el título de Ingeniera Ambiental. Universidad Nacional Agraria-La Molina. Lima. 148 p.
15. CASTELLANOS RUELAS, AF. y MURGUÍA OLMEDO, M. 2002. Comportamiento de la contaminación microbiológica en alimentos balanceado para

rumiantes elaborados con pollinaza. Revista Biomedica, (Julio - Septiembre de 2002). 13(3), 171 – 177 p.

16. CASTELLS, XE. 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Consulta: 13 de setiembre del 2017. Disponible en internet en [http://www. books.google.com](http://www.books.google.com)
17. CELY, P; GASCÓ, G; PAZ-FERREIRO, J Y MÉNDEZ, A. 2015. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 111, 173-182.
18. COLLARD, FX Y BLIN, J. 2014. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38, 594-608. Consulta: 2 de enero del 2017. Disponible en internet en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400450X>
19. CUETO GARCÍA, MJ. 2016. Potencial de producción de biochar en España a partir de residuos de la industria papelera, de lodos de E.D.A.R., de residuos sólidos urbanos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: Estudio de la fijación de carbono. Tesis Doctoral en Ciencias Ambientales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. España. 236 p.
20. DE ANDRADE, CA; BIBAR, MPS; COSCIONE, AR; PIRES, AMM Y SOARES, AG. 2015. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 50(5), 407-416.
21. DELGADO ARROYO, MM; MIRALLES DE IMPERIAL, R; MARTÍN SÁNCHEZ, JV; LEÓN CÓFRECES, C Y GARCÍA GONZÁLEZ, MC. 2007. Evaluación de residuos orgánicos de origen animal procedentes de granjas avícolas. Universidad del Valle, Cali-Colombia. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, n° 6. 33-39 p.
22. DE LUCAS HERGUEDAS, AI Y DEL PESO TARANCO, C. 2012. Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad. Bloque I: Materias Primas. Centro Tecnológico

- Agrario y Agroalimentario. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal sostenible. Universidad de Valladolid. España. 216 p.
23. DUMROESE, RK; HEISKANEN, J; ENGLUND, K Y TERVAHAUTA, A. 2011. Pelleted biochar: chemical and physical properties show potential use as a substrate in container nurseries. *biomass and bioenergy*, 35(5), 2018-2027.
 24. ESCALANTE REBOLLEDO, AM; PÉREZ LÓPEZ, G; HIDALGO MORENO, C; LÓPEZ COLLADO, J; CAMPO ALVES, J; VALTIERRA PACHECO, E Y ETCHEVERS BARRA, JD. 2016. Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. México. Terra Latinoamericana*, vol. 34, núm. 3, 2016, pp. 367-382. Consulta: 20 de dic. 2016. Disponible en internet: <http://www.redalyc.org/pdf/573/57346617009.pdf>
 25. ESTRADA PAREJA, MM. 2005. Manejo y Procesamiento de la gallinaza. Corporación Universitaria Lasallista. Antioquia, Colombia. *Revista Lasallista de investigación*, vol. 2(1)43-48.
 26. GARCÍA DE LA FUENTE, R. 2011. Caracterización y uso de compost de alperujo como enmienda orgánica. *Evaluación Agronómica y medioambiental. Memoria de la Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España. 488 p.*
 27. GARCÍA, Y; ELÍAS, A Y HERRERA, FR. 2005. Dinámica microbiana de la fermentación *in vitro* de las excretas de gallinas ponedoras. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola, Cuba. Tomo 39(1)1-7*
 28. GÓMEZ, A; KLOSE, W Y RINCÓN, S. 2008. *Pirolisis de Biomasa. Cuesco de palma de aceite. Kassel University Press GmbH. Germany. 133 p.*
 29. GUEVARA MARTÍNEZ, OE; PARADA ZAMORA, KM Y LEONÉS ARÉVALO, YY. 2016. Anteproyecto de modelo arquitectónico de complejo alimentario, por medio de granjas agrícolas de la Geo. Tesis para optar el título de Arquitecto. Universidad de El Salvador. 172 p.
 30. GUO, M; YUFANG, S Y HE, Z. 2012. Chapter 8. Poultry Litter-Based Biochar: Preparation, characterization and utilization. *Applied Research of Animal Manure. Book Chapter, 169-202.*

31. HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, MT. 2014. Enmiendas orgánicas de nueva generación: Biochar y otras biomoléculas. Ed. Mundi-Prensa. España. 171 p. (en línea) Consulta: 23 jun. 2017. Disponible en internet en: <https://books.google.it/books?isbn=8484766926>
32. HENRÍQUEZ L; MANTILLA, J Y NIÑO, M. 2006. Influencia de la temperatura interna en digestores tipo batch cargados con pollinaza. Univ. Nacional de Colombia. 8 p.
33. KLUG, M. 2012. Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. Revista de Química, 26(1-2), 37-40.
34. LAIRD, DA; BROWN, RC; AMONETTE, JE Y LEHMANN, J. 2009. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 3(5), 547-562.
35. LEHMANN, J Y JOSEPH, S. 2009. Biochar for Environmental Management: An Introduction. London, Earthscan. 1-12 p. Consulta: 13 de dic. 2016. Disponible en internet en: http://www.biocharinternational.org/images/Biochar_book_Chapter_1.pdf
36. LINDBERG, A; MÄKINEN, I; MÄKELÄ, M; OTTELIN, J; KURIA, P. AND KAGIRI, E. 2010. Household Level Pyrolytic Stove. SHALIN Finland in collaboration with Aalto University. 39 p.
37. MACHÍN HERNÁNDEZ, MM. 2007. Gestión empresarial. Desafíos y oportunidades desde la perspectiva de la gestión ambiental. Revista futuros. N°17 vol. V. 10 p.
38. MAIENZA,A; BARONTI,S; GENESIO,L; VACCARI, F.P; Y MIGLIETTA, F. Il biochar una soluzione sostenibile per agricoltura ed ambiente. Istituto di Biometrologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze. Edizione 2015/2016.
39. MARTÍNEZ CHÁVEZ, CC. 2015. Efectos enmiendas de biochar sobre el desarrollo en *Cucumis sativus* L. Var. (SMR-58). Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Biosistamática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas. Universidad de Guadalajara. México. 94 p.

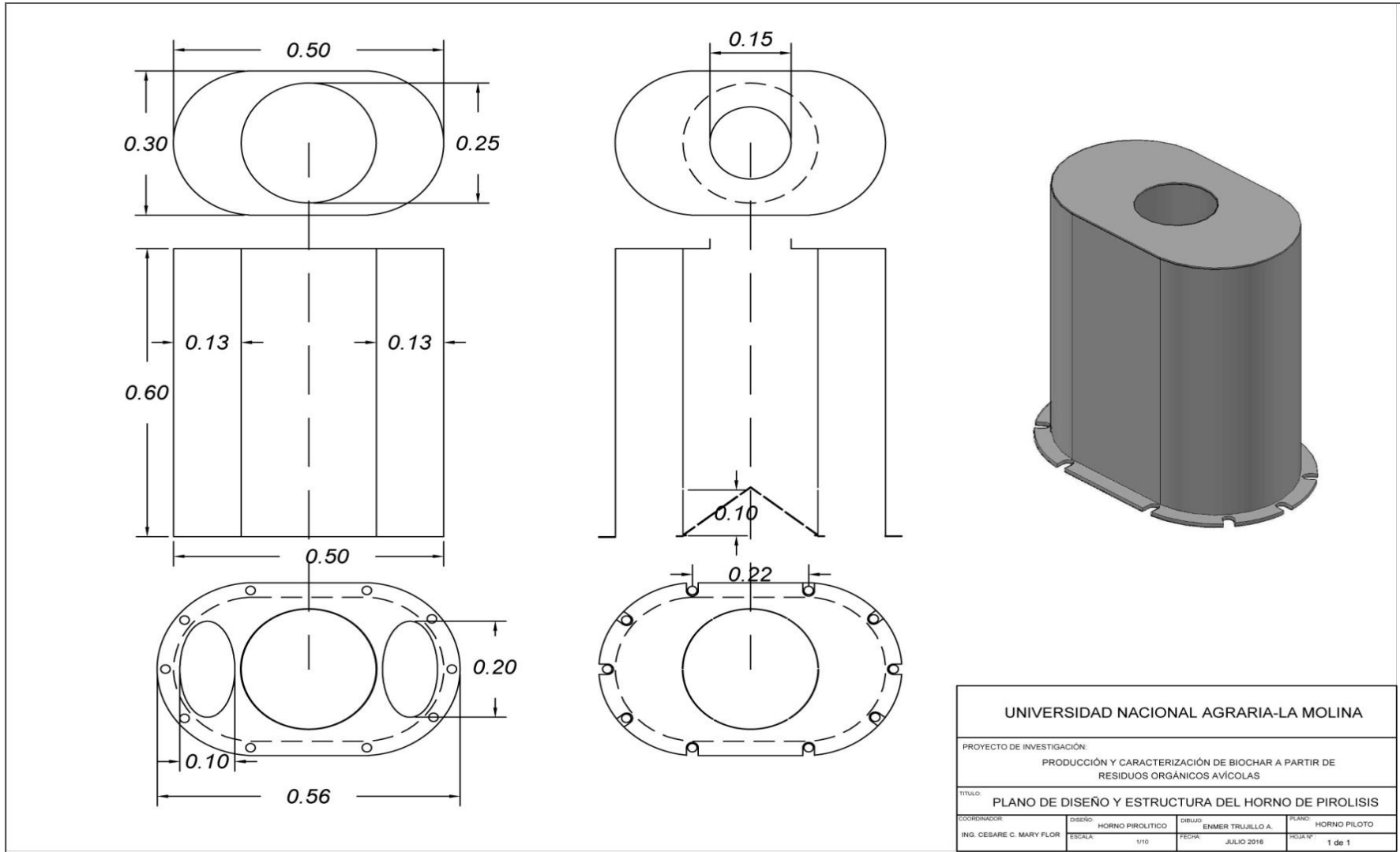
40. MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, J. 2014. Cap. 19 Residuos: Conceptos, clasificación y gestión. Los residuos sanitarios. Nociones de Salud Pública. 2º Edición. Consultado el 20 de julio de 2017. Disponible en internet en <https://books.google.com.pe/books?isbn=8499697925>
41. MARTÍNEZ, PF Y ROCA, D. 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. En: Flórez R., V.J. (Ed). Sustratos, Manejo del Clima, Automatización y Control en Sistemas de Cultivo sin Suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. 37-77 p.
42. MAYOR, J. 2010. Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more. *Literatura Review*. 45 p. Consulta: 23 dic. 2016. Disponible en internet en www.gara.de/fileadmin/gara/.../BiocharSoilFertility.pdf
43. MCGAHAN, E; KOLOMINSKAS, C; BAWDEN, K. Y ORMEROD R. 2002. Strategies to reduce odour emissions from meat chicken farms. *Proceedings 2002 Poultry Information Exchange*. 14 p.
44. MOHAN, D; PITTMAN, CU Y STEELE, PH. 2006. Pyrolysis of wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy&Fuels*, 20(3), 848-889.
45. NICLÓS, FJ; MIÑANA SÁNCHEZ, C Y GINER SANTONJA, G. 2010. Guía de mejoras técnicas disponibles para el sector de explotaciones intensivas de aves en la Comunitat Valenciana. Ed. Centro de Tecnologías Limpias 1ra Edición. 132 P.
46. NIETO MARTÍN, A. 2015. Fabricación, caracterización y utilización de biochar como sustituto de la turba en la preparación de sustratos de cultivo. Tesis Doctoral para optar el título en Ciencias Ambientales. Universidad Politécnica de Madrid. España. 248 p.
47. NOVAK, J.M; LIMA, I; XING, B; GASKIN, JW; STEINER, C; DAS, KC; WATTS, DW; BUSSCHER, WJ Y SCHOMBERG, H. 2009. Characterization of designer at different temperatures and their effects on a loamy sand. *JM Novavak Annals of Environmental Science*, vol 3, 195-206.
48. OLMO PRIETO, M. 2016. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. España. 157 p.

49. OSES ORBEGOSO, A. 2013. Efectos de la aplicación de biochar en el modelo jerárquico de agregación de un suelo forestal bajo condiciones oceánicas. Informe del Proyecto Final de Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona. España. 97 p.
50. PÉREZ MARTÍNEZ, EY. 2015. Evaluación de un carbonizador portátil de bajo costo en la valorización de residuos biomásicos lignocelulósicos. Proyecto Final de Graduación para optar el grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental. Tecnológico de Costa Rica. 119 p.
51. REITER, MS Y MIDDLETON, A. 2016. Nutrient availability from poultry litter co-products. Reiter, M. S., & Middleton, A. Nutrient Availability from Poultry Litter Co-Products. Appendix F of the Farm Manure-to-Energy Final Report.
52. RINCÓN MARTÍNEZ, JM Y SILVA LORA, EE. 2014. Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía. 1º Ed. 332 p. Consulta en línea 30 de marzo de 2017. Disponible en internet en <https://books.google.com.pe/books?isbn=9585888009>.
53. RIVERA O., RODRIGUEZ A.,Y RIZO C. 2000. Bioseguridad en la Industria Avícola. 2da. Edición. Bogotá. Colombia. 2000. P 204, 215.
54. RODRÍGUEZ, C. 2002. Residuos Ganaderos. Introducción Animal. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Rio Cuarto (UNRC). Argentina. 1-7 p.
55. ROSAS MAYORAL, JG. 2015. Producción de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirólisis en reactor a escala piloto y en reactor móvil energéticamente sostenible. Tesis para optar el grado de Doctor en Ingeniería Química. Universidad de León. España. 231 p.
56. SIERRA, FE Y KLOSE, W. 2008. Producción de Gas combustible a partir de biomasa en un Horno Rotatorio., Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo, Vol. 3, 2008.

57. SIMS, JT; BERGSTRÖM, L; BOWMAN, BT Y OENEMA, O. 2005. Nutrient management for intensive animal agriculture: policies and practices for sustainability. *Soil Use Manage.* 21: 141-151.
58. SOBRERO, MC Y RONCO, A. 2004. Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). En: *Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas*. Castillo (Ed.). IDRC/IMTA. Canadá, Capítulo, 4, 71-79.
59. SOHI, SP; KRULL, E; LOPEZ-CAPEL, E Y BOL, R. 2010. A review of Biochar and its use and function in soil. Editor: Donald L. Parks. *Advances in agronomy*, Vol. 105. Chapter Two. 47-81 p.
60. STEEL, RGD Y TORRIE, JH. 1992. *Bioestadística: Principios y procedimientos*. McGraw-Hill Segunda edición. México 622p
61. STEINER, C; DAS, KC; MELEAR, N Y LAKLY, D. 2010. Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 39(4) 1236-1242.
62. STINGONE, JA Y WING, S. 2011. Poultry litter incineration as a source of energy: reviewing the potential for impacts on environmental health and justice. *New Solutions*. 21(1): 27-42.
63. TIQUIA, SM; RICHARD, TL Y HONEYMAN, MS. 2002. Carbon, nutrient, and mass loss during composting. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 62(1), 15-24.
64. TORTOSA, G; ALBURQUERQUE, JA; AIT-BAD GG Y CEGARRA, J. 2012. The production of Commercial Organic Amendments and Fertilisers by Composting of two-phase Olive mill waste (“alperujo”). *Journal of Cleaner Production* 26:48-55
65. URIEN PINEDO, A. 2013. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. Trabajo de Fin de Máster de Investigación. Universidad de Educación a Distancia. España. 83 p.
66. VARNERO, MT; ROJAS, C Y ORELLANA, R. 2007. Índices de fitotoxicidad en residuos orgánicos durante el compostaje. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(1), 28-37.

67. WILLIAMS, CM. 2013. Características de la gallinaza de las aves de corral. En Revisión de Desarrollo Avícola. FAO. Disponible en internet en <http://www.fao.org/docrep/019/i3531s/i3531s.pdf>

VIII. ANEXOS



ANEXO 1: Diseño estructural del horno piloto.

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO 2: Costo de diseño y elaboración del horno piloto.

| FABRICACIÓN DEL HORNO | MEDIDA (cm) | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO S/. |
|---------------------------|-------------|----------|---------------------|
| Diseño | | | 100.00 |
| <i>Materiales</i> | | | |
| Lamina de fierro 1.5 mm | 134 X 60 | 1 | 54.30 |
| Lamina de fierro 1.5 mm | 78 X 60 | 1 | 31.90 |
| Lamina de fierro 1.5 mm | 50 X 30 | 1 | 10.20 |
| Lamina de fierro 1.5 mm | 56 X 36 | 1 | 13.60 |
| Barrilla de fierro 3.00mm | 50 | 1 | 10.00 |
| Lana de vidrio | 50 x 30 | 1 | 10.00 |
| Pernos y tuercas | | 6 | 12.00 |
| Tamiz de fierro 3.00 mm | | 1 | 8.00 |
| Subtotal | | | 150.00 |
| <i>Mano de obra</i> | | | |
| Corte y soldadura | | | 400.00 |
| TOTAL | | | 650.00 |

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO 3: Tabla resume de datos del proceso de pirolisis de residuos avícolas.

| RESIDUOS ORGÁNICOS AVÍCOLAS | N° MUESTRA | PESO INICIAL (Gr) | BIOCHAR (Gr) | % DE REND. BIOCHAR | VOL. INICIAL (cm3) | VOL. FINAL (cm3) | TIEMPO PROM. PIROLESIS Hrs | TEMPERATURA DE PIROLISIS | | DENSIDAD BIOCHAR g/cm3 | |
|-----------------------------|----------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------------|------------------|----------------------------|--------------------------|-----------|------------------------|-------|
| | | | | | | | | T°C | PROM. T°C | | |
| CONTROL | GALLINAZA (GG) | 1 | 200 | | | | | | | | |
| | POLLINAZA (CP) | 2 | 200 | | | | | | | | |
| | GG/CP | 3 | 200 | | | | | | | | |
| T1 | GALLINAZA (GG) | R1 | 4,000 | 2,567 | 64.18 | 10225.50 | 4523.55 | 3 | 488-623 | 556 | 0.567 |
| | | R2 | 4,000 | 2,578 | 64.45 | 10339.54 | 4447.52 | 3 | 480-610 | 545 | 0.580 |
| | | R3 | 4,000 | 2,572 | 64.30 | 10377.55 | 4561.56 | 3 | 482-616 | 549 | 0.564 |
| T2 | POLLINAZA (CP) | R1 | 3,000 | 1,291 | 43.03 | 9959.41 | 3877.33 | 3 | 460-598 | 529 | 0.333 |
| | | R2 | 3,000 | 1,285 | 42.83 | 10073.45 | 3763.29 | 3 | 462-575 | 519 | 0.341 |
| | | R3 | 3,000 | 1,294 | 43.13 | 9997.42 | 3915.34 | 3 | 466-580 | 523 | 0.330 |
| T3 | (GG-CP) | R1 | 3,000 | 1,649 | 54.97 | 11137.81 | 4257.46 | 3 | 472-605 | 539 | 0.387 |
| | | R2 | 3,000 | 1,654 | 55.13 | 11251.85 | 4295.47 | 3 | 475-612 | 544 | 0.385 |
| | | R3 | 3,000 | 1,660 | 55.33 | 11175.82 | 4333.48 | 3 | 478-621 | 550 | 0.383 |

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO 4: Cuadro de resumen de Bioensayo

A) Siembra y medición del crecimiento de plántulas para biochar de gallinaza (GG).

| TRATS | | N° Sem. sembr. | Peso de semillas (g) | N° Sem. germin. | Elongación del tallo de plántulas de rábano (cm) | | | | | | | | | | Prom. elongación tallo (cm) | Índice de Germin. | Prom. biomasa fresco (g) |
|-------|-------|----------------|----------------------|-----------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----------------------------|-------------------|--------------------------|
| (%) | REPT. | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| | R1 | | 0.0831 | 8 | 5.9 | 8.2 | 5.6 | 8.6 | 6.4 | 9.8 | 8.5 | 4.6 | 0.0 | 0.0 | 7.20 | | 0.8032 |
| T0 | R2 | 10 | 0.0843 | 9 | 6.8 | 9.7 | 6.3 | 8.8 | 6.3 | 3.2 | 4.4 | 6.3 | 10.3 | 0.0 | 6.90 | | 0.6685 |
| | R3 | | 0.0830 | 9 | 5.6 | 9.6 | 5.3 | 6.4 | 4.9 | 7.6 | 7.2 | 6.3 | 6.1 | 0.0 | 6.56 | | 0.6271 |
| | R1 | | 0.0874 | 7 | 11.4 | 11.5 | 14.1 | 9.8 | 12.3 | 12.6 | 5.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 10.99 | 76.93 | 0.9340 |
| T1 | R2 | 10 | 0.0717 | 6 | 6.9 | 11.8 | 10.3 | 3.8 | 4.5 | 1.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6.42 | 38.52 | 0.4618 |
| | R3 | | 0.0870 | 8 | 14.2 | 12.8 | 14.6 | 1.9 | 12.9 | 13.1 | 5.1 | 6.2 | 0.0 | 0.0 | 10.10 | 80.80 | 0.8429 |
| | R1 | | 0.0779 | 8 | 9.3 | 7.2 | 10.4 | 12.5 | 11.6 | 6.9 | 5.4 | 9.6 | 0.0 | 0.0 | 9.11 | 72.88 | 0.6290 |
| T2 | R2 | 10 | 0.0875 | 9 | 7.9 | 12.1 | 1.1 | 8.4 | 13.0 | 6.8 | 8.8 | 12.3 | 6.8 | 0.0 | 8.58 | 77.22 | 0.6801 |
| | R3 | | 0.0817 | 9 | 10.2 | 12.0 | 6.7 | 13.1 | 11.4 | 11.4 | 7.4 | 9.2 | 8.7 | 0.0 | 10.01 | 90.09 | 0.6750 |
| | R1 | | 0.0852 | 8 | 7.2 | 8.1 | 9.5 | 3.4 | 7.9 | 6.4 | 7.6 | 10.4 | 0.0 | 0.0 | 7.56 | 60.48 | 0.5892 |
| T3 | R2 | 10 | 0.0812 | 8 | 6.3 | 9.7 | 12.4 | 12.6 | 6.8 | 10.9 | 8.8 | 7.1 | 0.0 | 0.0 | 9.33 | 74.64 | 0.7980 |
| | R3 | | 0.0967 | 8 | 6.9 | 8.2 | 7.4 | 7.8 | 6.1 | 13.5 | 10.8 | 9.2 | 0.0 | 0.0 | 8.74 | 69.92 | 0.8024 |
| | R1 | | 0.0925 | 10 | 7.3 | 3.9 | 1.4 | 7.6 | 3.8 | 1.9 | 3.1 | 2.0 | 7.4 | 5.4 | 4.38 | 43.80 | 0.5444 |
| T4 | R2 | 10 | 0.0832 | 10 | 10.8 | 8.5 | 3.8 | 8.5 | 11.9 | 1.7 | 6.3 | 5.1 | 7.8 | 7.9 | 7.23 | 72.30 | 0.8048 |
| | R3 | | 0.0858 | 7 | 5.2 | 10.2 | 17.2 | 7.8 | 6.4 | 1.8 | 9.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 8.31 | 58.17 | 0.6052 |

FUENTE: Elaboración propia.

B) Siembra y medición del crecimiento de plántulas para biochar de pollinaza (CP).

| TRATS | | N° Sem. sembr. | Peso de semillas (g) | % Sem. germin. | Elongación del tallo de plántulas de rábano (cm) | | | | | | | | | | Prom. elongación tallo (cm) | Índice de Germin. | Prom. biomasa fresco (g) |
|-------|-------|----------------|----------------------|----------------|--|------|------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----------------------------|-------------------|--------------------------|
| (%) | REPT. | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| | R1 | | 0.0815 | 9 | 10.8 | 8.6 | 8.2 | 9.7 | 4.8 | 7.1 | 6.9 | 4.2 | 2.5 | 0.0 | 6.28 | | 0.6184 |
| T0 | R2 | 10 | 0.0764 | 10 | 8.9 | 7.3 | 3.9 | 8.1 | 4.8 | 9.8 | 9.8 | 6.9 | 6.3 | 6.1 | 7.19 | | 0.6948 |
| | R3 | | 0.0839 | 8 | 3.8 | 5.1 | 8.7 | 10.6 | 6.7 | 6.4 | 11.2 | 9.1 | 0.0 | 0.0 | 7.70 | | 0.6759 |
| | R1 | | 0.0894 | 10 | 6.4 | 11.1 | 8.2 | 12.6 | 3.9 | 6.1 | 8.4 | 2.0 | 1.2 | 1.3 | 6.12 | 61.20 | 0.6993 |
| T1 | R2 | 10 | 0.0797 | 9 | 9.9 | 4.4 | 4.8 | 10.5 | 0.9 | 10.2 | 10.2 | 5.5 | 2.6 | 0.0 | 6.56 | 59.04 | 0.6455 |
| | R3 | | 0.0875 | 9 | 2.7 | 4.5 | 9.5 | 9.7 | 4.5 | 6.4 | 12.3 | 9.1 | 9.5 | 0.0 | 7.58 | 68.22 | 0.8116 |
| | R1 | | 0.0794 | 8 | 4.6 | 5.0 | 10.3 | 2.9 | 8.2 | 6.1 | 7.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6.33 | 50.08 | 0.4721 |
| T2 | R2 | 10 | 0.0915 | 9 | 2.1 | 8.2 | 0.8 | 2.3 | 1.5 | 1.3 | 2.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.63 | 29.79 | 0.3533 |
| | R3 | | 0.0767 | 8 | 5.4 | 5.3 | 5.2 | 3.5 | 1.2 | 1.3 | 8.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.33 | 35.04 | 0.3992 |
| | R1 | | 0.0923 | 6 | 2.2 | 5.2 | 1.1 | 0.8 | 0.8 | 1.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.88 | 11.28 | 0.2426 |
| T3 | R2 | 10 | 0.0864 | 5 | 3.2 | 3.0 | 3.1 | 1.4 | 0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.26 | 11.30 | 0.2107 |
| | R3 | | 0.1116 | 6 | 5.3 | 6.5 | 3.4 | 7.2 | 1.7 | 3.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4.52 | 27.12 | 0.4394 |
| | R1 | | 0.0925 | 3 | 1.1 | 2.2 | 2.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.90 | 5.70 | 0.1008 |
| T4 | R2 | 10 | 0.0884 | 5 | 1.6 | 1.4 | 0.9 | 0.8 | 1.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.26 | 6.30 | 0.1306 |
| | R3 | | 0.0739 | 5 | 1.2 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 1.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.92 | 4.60 | 0.1738 |

FUENTE: Elaboración propia.

ANEXO 5: Resumen del análisis de varianza de los variables analizados con InfoStat (software para análisis estadístico-2016.11.17).

RENDIMIENTO

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|------|
| Rendto | 9 | 1.00 | 1.00 | 0.29 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|--------|----|--------|----------|---------|
| Modelo. | 685.83 | 2 | 342.91 | 13870.67 | <0.0001 |
| Trats | 685.83 | 2 | 342.91 | 13870.67 | <0.0001 |
| Error | 0.15 | 6 | 0.02 | | |
| Total | 685.98 | 8 | | | |

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.39391

Error: 0.0247 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|--------|---|------|---|
| T2 | 43.00 | 3 | 0.09 | A |
| T3 | 55.14 | 3 | 0.09 | B |
| T1 | 64.31 | 3 | 0.09 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

DENSIDAD

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|------|
| Densidad | 9 | 1.00 | 1.00 | 1.40 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|---------|----|---------|---------|---------|
| Modelo. | 0.09 | 2 | 0.05 | 1275.75 | <0.0001 |
| Trats | 0.09 | 2 | 0.05 | 1275.75 | <0.0001 |
| Error | 2.2E-04 | 6 | 3.6E-05 | | |
| Total | 0.09 | 8 | | | |

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.01508

Error: 0.0000 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|--------|---|---------|---|
| T2 | 0.33 | 3 | 3.5E-03 | A |
| T3 | 0.39 | 3 | 3.5E-03 | B |
| T1 | 0.57 | 3 | 3.5E-03 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

pH

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|------|
| pH | 9 | 0.86 | 0.82 | 1.82 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|------|----|------|-------|---------|
| Modelo. | 1.34 | 2 | 0.67 | 18.85 | 0.0026 |
| Trats | 1.34 | 2 | 0.67 | 18.85 | 0.0026 |
| Error | 0.21 | 6 | 0.04 | | |
| Total | 1.55 | 8 | | | |

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.47187

Error: 0.0355 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|--------|---|------|---|
| T3 | 10.01 | 3 | 0.11 | A |
| T1 | 10.15 | 3 | 0.11 | A |
| T2 | 10.89 | 3 | 0.11 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

HUMEDAD

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|-------|
| Humedad | 9 | 0.89 | 0.85 | 14.98 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|------|----|------|-------|---------|
| Modelo. | 1.84 | 2 | 0.92 | 24.24 | 0.0013 |
| Trats | 1.84 | 2 | 0.92 | 24.24 | 0.0013 |
| Error | 0.23 | 6 | 0.04 | | |
| Total | 2.06 | 8 | | | |

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=0.48750

Error: 0.0379 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|--------|---|------|---|
| T2 | 1.80 | 3 | 0.11 | A |
| T3 | 1.40 | 3 | 0.11 | B |
| T1 | 0.70 | 3 | 0.11 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

CENIZAS

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|------|
| Cenizas | 9 | 0.98 | 0.98 | 2.57 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|---------|----|--------|--------|---------|
| Modelo. | 1135.74 | 2 | 567.87 | 180.06 | <0.0001 |
| Trats | 1135.74 | 2 | 567.87 | 180.06 | <0.0001 |
| Error | 18.92 | 6 | 3.15 | | |
| Total | 1154.66 | 8 | | | |

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=4.44902

Error: 3.1538 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|--------|---|------|---|
| T2 | 54.65 | 3 | 1.03 | A |
| T3 | 70.82 | 3 | 1.03 | B |
| T1 | 82.02 | 3 | 1.03 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

CARBONO

Modelo ajustado

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|-------|
| Carbono | 9 | 0.67 | 0.56 | 19.88 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|-------|----|-------|------|---------|
| Modelo. | 28.08 | 2 | 14.04 | 3.87 | 0.0832 |
| Trats | 28.08 | 2 | 14.04 | 3.87 | 0.0832 |
| Error | 13.95 | 6 | 2.33 | | |
| Total | 42.03 | 8 | | | |

Test:Tukey Alfa=0.05 DMS=3.82022

Error: 2.3253 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|--------|---|------|-----|
| T3 | 5.27 | 3 | 1.28 | A |
| T1 | 8.26 | 3 | 0.21 | A B |
| T2 | 9.48 | 3 | 0.80 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

NIRÓGENO

Modelo ajustado

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|-----------|---|----------------|-------------------|------|
| Nitrógeno | 9 | 0.95 | 0.93 | 8.25 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|------|----|------|-------|---------|
| Modelo. | 1.59 | 2 | 0.79 | 53.04 | 0.0002 |
| Trats | 1.59 | 2 | 0.79 | 53.04 | 0.0002 |
| Error | 0.09 | 6 | 0.01 | | |
| Total | 1.68 | 8 | | | |

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=0.30626

Error: 0.0149 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|--------|---|------|---|
| T2 | 2.05 | 3 | 0.11 | A |
| T3 | 1.34 | 3 | 0.04 | B |
| T1 | 1.05 | 3 | 0.03 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

FÓSFORO

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|------|
| Fósforo | 9 | 0.57 | 0.43 | 7.82 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|-------------|----|-------------|------|---------|
| Modelo. | 47564350.66 | 2 | 23782175.33 | 4.05 | 0.0769 |
| Trats | 47564350.66 | 2 | 23782175.33 | 4.05 | 0.0769 |
| Error | 35193910.55 | 6 | 5865651.76 | | |
| Total | 82758261.21 | 8 | | | |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

POTASIO

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|-------|
| Potasio | 9 | 0.28 | 0.04 | 13.11 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|--------------|----|-------------|------|---------|
| Modelo. | 144364403.50 | 2 | 72182201.75 | 1.18 | 0.3701 |
| Trats | 144364403.50 | 2 | 72182201.75 | 1.18 | 0.3701 |
| Error | 367541926.46 | 6 | 61256987.74 | | |
| Total | 511906329.96 | 8 | | | |

SODIO

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|-------|
| Sodio | 9 | 0.25 | 0.00 | 71.18 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|--------------|----|-------------|------|---------|
| Modelo. | 90893559.27 | 2 | 45446779.64 | 1.00 | 0.4232 |
| Trats | 90893559.27 | 2 | 45446779.64 | 1.00 | 0.4232 |
| Error | 273818218.11 | 6 | 45636369.69 | | |
| Total | 364711777.38 | 8 | | | |

CALCIO

Modelo ajustado

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|----|
|----------|---|----------------|-------------------|----|

Calcio 9 0.94 0.92 16.16

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|----------------|----|----------------|-------|---------|
| Modelo. | 66127376265.90 | 2 | 33063688132.95 | 44.22 | 0.0003 |
| Trats | 66127376265.90 | 2 | 33063688132.95 | 44.22 | 0.0003 |
| Error | 4486642502.28 | 6 | 747773750.38 | | |
| Total | 70614018768.18 | 8 | | | |

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=68506.79960

Error: 747773750.3792 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|-----------|---|----------|---|
| T2 | 58684.51 | 3 | 15787.90 | A |
| T1 | 181206.96 | 3 | 15787.90 | B |
| T3 | 267610.47 | 3 | 15787.90 | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

COBRE

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|-------|
| Cobre | 9 | 0.37 | 0.16 | 11.32 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|---------|----|--------|------|---------|
| Modelo. | 386.77 | 2 | 193.38 | 1.74 | 0.2529 |
| Trats | 386.77 | 2 | 193.38 | 1.74 | 0.2529 |
| Error | 665.28 | 6 | 110.88 | | |
| Total | 1052.05 | 8 | | | |

FIERRO

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|-------|
| Fierro | 9 | 0.81 | 0.75 | 11.50 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|-------------|----|------------|-------|---------|
| Modelo. | 12659367.32 | 2 | 6329683.66 | 13.04 | 0.0065 |
| Trats | 12659367.32 | 2 | 6329683.66 | 13.04 | 0.0065 |
| Error | 2913347.60 | 6 | 485557.93 | | |
| Total | 15572714.93 | 8 | | | |

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1745.69794

Error: 485557.9339 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|---------|---|--------|---|
| T2 | 4728.86 | 3 | 402.31 | A |
| T3 | 5842.14 | 3 | 402.31 | A |
| T1 | 7609.32 | 3 | 402.31 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

MAGNESIO

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|------|
| Magnesio | 9 | 0.94 | 0.93 | 5.06 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|---------------|----|--------------|-------|---------|
| Modelo. | 1881343440.97 | 2 | 940671720.48 | 50.56 | 0.0002 |
| Trats | 1881343440.97 | 2 | 940671720.48 | 50.56 | 0.0002 |
| Error | 111625564.02 | 6 | 18604260.67 | | |
| Total | 1992969004.99 | 8 | | | |

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=10805.74661

Error: 18604260.6706 gl: 6

| Trats | Medias | n | E.E. | |
|-------|----------|---|---------|---|
| T2 | 64867.66 | 3 | 2490.27 | A |
| T1 | 94543.39 | 3 | 2490.27 | B |
| T3 | 96444.25 | 3 | 2490.27 | B |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

MANGANESO

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|-----------|---|----------------|-------------------|------|
| Manganeso | 9 | 0.34 | 0.12 | 7.38 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|----------|----|---------|------|---------|
| Modelo. | 10920.35 | 2 | 5460.18 | 1.56 | 0.2845 |
| Trats | 10920.35 | 2 | 5460.18 | 1.56 | 0.2845 |
| Error | 20981.53 | 6 | 3496.92 | | |
| Total | 31901.89 | 8 | | | |

CINC

Modelo ajustado

| Variable | N | R ² | R ² Aj | CV |
|----------|---|----------------|-------------------|------|
| Cinc | 9 | 0.35 | 0.13 | 8.25 |

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

| F.V. | SC | gl | CM | F | p-valor |
|---------|----------|----|---------|------|---------|
| Modelo. | 10070.88 | 2 | 5035.44 | 1.61 | 0.2764 |
| Trats | 10070.88 | 2 | 5035.44 | 1.61 | 0.2764 |
| Error | 18820.98 | 6 | 3136.83 | | |
| Total | 28891.87 | 8 | | | |