



UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS
José Martí Pérez



Facultad de Ciencias
Técnicas y Empresariales

UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS “JOSÉ MARTÍ PÉREZ”
FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS Y EMPRESARIALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniería Industrial

Título: Evaluación de impacto ambiental del tratamiento de la gallinaza usando rutas sostenibles de termo y bioconversión

Autor: Rolando Gómez Gómez

Tutores: Dr. C. Ernesto L. Barrera Cardoso

MSc. Leyanet Odales Bernal

Sancti Spíritus, 2021.
“Año 63 de la Revolución”

“La ciencia es el alma de la prosperidad de las naciones y la fuente de vida de todo progreso”

Louis Pasteur

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por ayudarme y apoyarme siempre.

A mis tutores Ernesto y Leyanet, por ayudarme y confiar en mí.

A mis compañeros de aula y a los profesores del departamento de Ingeniería Industrial de la UNISS.

A los trabajadores del CEEPI por su colaboración en la realización de esta investigación

A todos ¡muchas gracias!

Resumen

La gallinaza es uno de los desechos más secos y voluminosos producidos en la agricultura. La gestión eficiente de este residuo podría minimizar la contaminación ambiental. La presente investigación tiene como objetivo analizar el impacto ambiental de la gallinaza sin y con tratamiento a través de herramientas de análisis de ingeniería industrial y análisis de ciclo de vida. Se realizó un diagnóstico inicial a la granja avícola "La botella" con un grupo de expertos seleccionados, que permitió identificar ineficiencias en la granja, además de determinar a juicio de estos expertos que el aire es la categoría de impacto ambiental que más afecta la disposición al medio ambiente de la gallinaza sin adecuado tratamiento. Para el análisis de ciclo de vida se propusieron tres escenarios, el primer escenario considerado como base fue la gallinaza sin tratar, el segundo la digestión anaerobia de la gallinaza y el tercer escenario fue la combinación de digestión anaerobia y conversión hidrotérmica. Este último presentó el mejor resultado en términos de disminución del impacto ambiental. Finalmente se expusieron los beneficios de aplicar el sistema tecnológico propuesto, para orientar a los responsables de toma de decisiones a lograr un tratamiento adecuado de la gallinaza en Sancti Spíritus, de esta forma adquirir autonomía en las granjas de energía y nutrientes e impulsar el desarrollo local.

Palabras clave: gallinaza, digestión anaerobia, conversión hidrotérmica, análisis de ciclo de vida, impacto medioambiental

Abstract

Chicken manure is one of the driest and bulkiest wastes produced in agriculture. Efficient management of this waste could minimize environmental pollution. The present work aims to analyse the environmental impact of chicken manure without and with treatment through industrial engineering analysis tools and life cycle assessment. An initial diagnosis was made to the poultry farm "La Botella" with a group of selected experts, which allowed the identification of inefficiencies in the farm, in addition to determining, in the opinion of these experts, that air is the category of environmental impact that most affects disposal to the environment of the chicken manure without adequate treatment. For the life cycle assessment, three scenarios were proposed, the first scenario considered as the basis was untreated chicken manure, the second was anaerobic digestion of chicken manure, and the third scenario was the combination of anaerobic digestion and hydrothermal conversion. The latter, presented the best result in terms of reducing the environmental impact. Finally, the benefits of applying the proposed technological system were presented, to guide decision-makers to achieve an adequate treatment of chicken manure in Sancti Spíritus, in this way to acquire autonomy in energy and nutrient farms and to promote the local development.

Key words: Chicken manure, life cycle assessment, anaerobic digestion, hydrothermal conversion, environmental impact

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	8
1.1 Problemática ambiental generada por los desechos de la industria avícola	9
1.2 Factores que impiden el uso sostenible de la gallinaza	13
1.3 Tecnologías de tratamiento para la gallinaza	13
1.4 Análisis de ciclo de vida (ACV) como herramienta para la evaluación ambiental	17
1.5 Necesidad de la aplicación del ACV para la evaluación ambiental de las diferentes alternativas de tratamiento de la gallinaza	19
1.6 Conclusiones parciales del Capítulo 1	20
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1 ETAPA 1: Diagnóstico la situación ambiental de las granjas avícolas de Sancti Spíritus sin tratamiento de sus residuales	21
2.1.1 Proceso de selección de los expertos.....	21
2.1.2 Diagrama Ishikawa o Causa - Efecto	22
2.1.2 Diagrama de Pareto	22
2.2 ETAPA 2: Análisis de ciclo de vida de los escenarios tecnológicos	22
2.3 Conclusiones parciales del Capítulo 2	29
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.1 ETAPA 1: Situación ambiental de las granjas avícolas de Sancti Spíritus.....	30
3.1.1 Caracterización de la Granja “La botella”	30
3.1.2 Diagnóstico de la Granja “La botella”	33
3.2 ETAPA 2: Resultados del Análisis de Ciclo de Vida	36
3.2.1 Resultados de la caracterización	36
3.3 Beneficios del Escenario E-3 Integración de HTC y AD.....	39
CONCLUSIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	41

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la acción medioambiental asociada con los procesos agrícolas está tomando un papel cada vez más importante debido a que la agricultura es responsable de notables impactos medioambientales ([Dennehy et al., 2017](#)). Cada año en el mundo, se generan 140 mil millones de toneladas de biomasa del sector agrícola, este gran volumen de desechos puede convertirse en energía, que está relacionada con aproximadamente 50 mil millones de toneladas de petróleo y puede promover sustancialmente la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero ([Forster-Carneiro et al., 2013](#)).

La gallinaza es uno de los desechos más secos y voluminosos producidos en la agricultura. Consiste en una mezcla de material de cama, excretas, desechos y plumas de las aves de corral ([Lynch et al., 2013](#)). La inexistencia de un sistema de tratamiento adecuado representa un riesgo potencial de contaminación ambiental. La utilización de la gallinaza para la generación de energía ofrece múltiples ventajas, tales como: el aprovechando de su potencial como combustible, la reducción de gases de efecto invernadero y el reaprovechamiento de los nutrientes contenidos en la gallinaza, los cuales pueden ser destinados para usos agrícolas ([Abelha et al., 2003](#)). Sin embargo, existen factores físico químicos que impiden su uso sostenible como biomasa energética, tales como: elevado pH, elevada concentración de NH₃, baja relación Carbono Nitrógeno y baja digestibilidad del material de camada. Un sistema de tratamiento novedoso es la conversión hidrotérmica unido a la digestión anaerobia, el cual resulta de interés debido a la obtención de productos energéticos y de alto valor agregado. Sin embargo, no se conoce el impacto ambiental de la combinación de estas tecnologías para el tratamiento de residuales avícolas.

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite identificar, evaluar y cuantificar los impactos ambientales de productos o servicios de una forma global porque considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final y todos los vectores involucrados; logrando el desarrollo sostenible y la ecoeficiencia de las producciones y servicios ([Díaz Peña et al., 2013](#)).

Por lo antes mencionado se declara el siguiente **Problema científico**: ¿Cuál es el impacto ambiental del tratamiento de la gallinaza usando rutas sostenibles de termo y bioconversión?

Para darle solución al problema de la investigación se declara como **objetivo general**: Evaluar el impacto ambiental de la gallinaza sin y con tratamiento a través de herramientas de análisis de ingeniería industrial y análisis de ciclo de vida.

En relación con el problema científico y el objetivo general se formularon los siguientes **objetivos específicos**:

1. Construir el marco teórico referencial derivado de un análisis crítico de la literatura científica, nacional e internacional, sobre el tratamiento de la gallinaza y estudios de análisis de ciclo de vida.
2. Diagnosticar la situación ambiental de las granjas avícolas de la provincia de Sancti Spíritus sin tratamiento de sus residuos mediante herramientas de análisis industrial.
3. Determinar cuál es la alternativa más sostenible para el tratamiento de la gallinaza a través de un análisis de ciclo de vida.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

El propósito de este capítulo es elaborar el marco teórico–referencial de la investigación, donde se analizan los antecedentes del tema objeto de estudio, la literatura especializada y otras fuentes consultadas, con la siguiente estructura (Ver Figura 1).

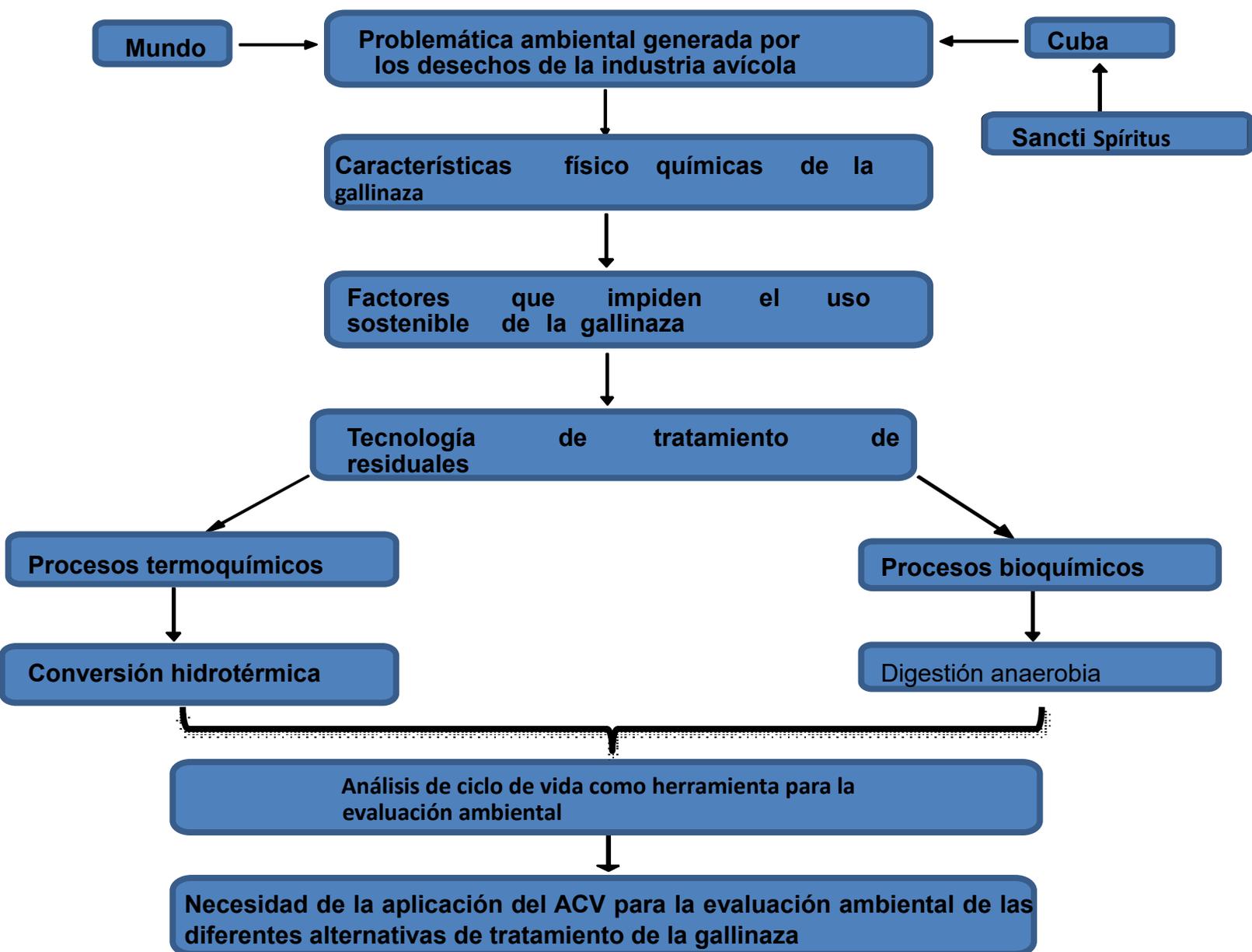


Figura 1. Estrategia para la construcción del Marco Teórico-Referencial de la investigación. **Fuente:** Elaboración propia.

1.1 Problemática ambiental generada por los desechos de la industria avícola

La gallinaza es uno de los desechos más secos y voluminosos producidos en la agricultura. Consiste en una mezcla de material de cama, excretas, desechos y plumas de las aves de corral (Lynch, Maconachie et al. 2013). Además, también contiene residuos de antibióticos y antimicrobianos, que se utilizan como promotores del crecimiento y para el tratamiento de infecciones (Jenkins 2006 ; 2018). También, podría contener disruptores endocrinos como los productos metabólicos del pollo y los residuos de pesticidas y herbicidas utilizados en el cultivo de los granos para la producción de alimentos (Santos Dalólio et al., 2015).

Los sistemas intensivos de producción de aves pueden crear enormes problemas de contaminación, debido a las grandes cantidades de sustancias contaminantes que producen. Además, originan grandes volúmenes de estiércol que se depositan en el suelo. El fósforo, una vez en el suelo, se libera mediante la acción de las fitasas que producen los microorganismos de este ecosistema. Después, pasa a ríos y lagos, lo que da lugar a los fenómenos de eutrofización de las corrientes de agua y de los reservorios acuáticos. En estas circunstancias, hay un crecimiento acelerado de las algas y un agotamiento del contenido de oxígeno del agua, lo que provoca la mortalidad de la fauna acuática. La sensación de suciedad que acompaña a estos vertimientos, así como la aparición de síntomas evidentes de la degradación ambiental en el entorno, son otros factores que afectan la calidad de vida. Al manipular la alimentación para los animales, las operaciones de producción no se manejan adecuadamente, la descarga de nutrientes, materia orgánica, patógenos y emisión de gases, a través de los desechos puede causar una contaminación significativa de los recursos esenciales para la vida (agua, suelo u aire) (<http://www.engormix.com>. 2007).

Al respecto, se divide en tres bloques los problemas que los residuos avícolas ocasionan al medio ambiente, y se generaliza de la siguiente forma: los que afectan a la atmósfera, a los suelos y a las aguas (ver figura 2).

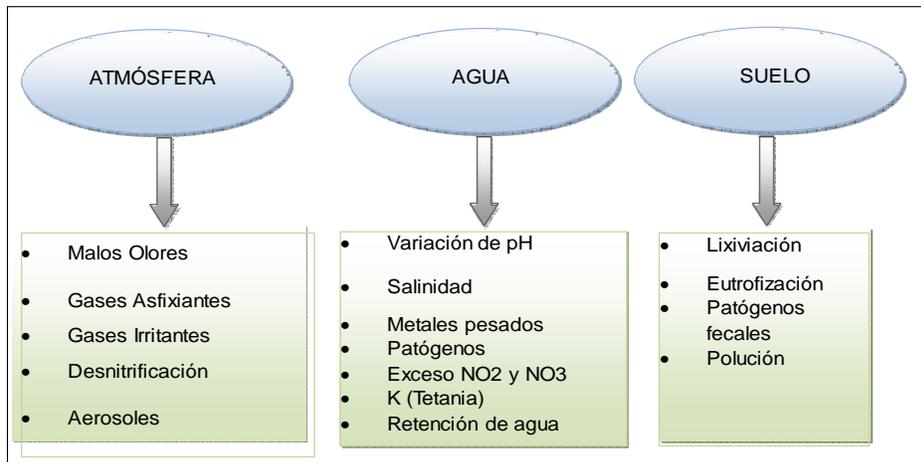


Figura 2. Efectos de los residuales avícolas en el ambiente.

Si los residuos se manejan de forma incorrecta pueden tener un impacto negativo sobre el ambiente. A continuación, se describen algunos de los problemas derivados del mal uso de los residuos ([Rhttp://www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org), 2008).

Atmósfera

La calidad del aire puede verse afectada por la emisión en el aire de contaminantes procedentes de las instalaciones de producción de aves de corral. Cabe afirmar que el amoníaco que se emite en la atmósfera es el contaminante vinculado con la producción de aves de corral con mayor impacto ecológico (FAO, 2009). observaron que la agitación de los purines en pozos situados debajo de los animales puede dar lugar a un rápido aumento del sulfuro de hidrógeno ambiente llegando a concentraciones letales en cuestión de segundos. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2000) indica una calidad de aire para el sulfuro de hidrógeno de 0,15 mg/m³ como promedio durante un período de 24 horas. Las partículas (o polvo) son un contaminante aéreo que despierta aún más preocupación que el sulfuro de hidrógeno y los COV se produce en las explotaciones avícolas típicas, donde se crían en confinamiento un número apreciable de aves. Las emisiones de polvo pueden contener materia fecal seca, así como bacterias, endotoxinas, hongos, ácaros y partes de insectos (Clark, Rylander et al. 1983). Las emisiones de polvo procedentes de los gallineros son muy variables. Dependen del clima, el diseño del edificio, la consistencia del pienso y los mecanismos de control para prevenir que las partículas grandes de polvo salgan de la zona cercana al edificio. A este respecto hay que señalar que, en los últimos años, se han realizado

considerables avances en el desarrollo de barreras contra el polvo de bajo costo para evitar la dispersión del polvo (Santos Dalólio et al., 2015). Las partículas finas (por ejemplo, PM finas), resultantes de la conversión de gas amoníaco en la atmósfera en sales de amonio, pueden tener mayores consecuencias para la salud humana y es menos probable que puedan ser mitigadas mediante métodos de barrera contra el polvo para prevenir las partículas de polvo más grandes.

Aguas

Debido a los altos niveles de MO y nutrientes de la gallinaza, si esta es vertida (o en su defecto las aguas procedentes de las operaciones de limpieza de los galpones) en ríos, manantiales, fuentes freáticas, ocasionan problemas como la eutrofización, la cual consiste en una disminución dramática del oxígeno al ser empleado este para la oxidación de material orgánica y nutrientes. Con el agotamiento del oxígeno, desaparece la vida acuática. Igualmente, los contenidos de amonio y nitritos generan toxicidad para los organismos del ecosistema acuático ([Rhttp://www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org). 2008).

Suelo

Cuando la gallinaza se aplica al terreno que se quiera en forma indiscriminada y continuada, ocasiona en primera instancia una acción mecánica, la cual consiste en una colmatación por taponamiento de los poros de suelo, disminuyendo la capacidad de drenaje del terreno. Posteriormente comienza una acción química en donde se presentan una degradación estructural del suelo, ocasionando por alto contenido de sales y nutrientes; como consecuencia de la acumulación progresiva de los residuos, se genera una acción biológica consistente en el desarrollo de microorganismo potencialmente patógenos para los animales y el hombre. Finalmente, el exceso de materia orgánica y nutrientes puede ocasionar una disminución del oxígeno (hasta anaerobiosis) en el medio dificultando la mineralización del nitrógeno; de otra parte, las plantas absorben nitrógeno en cantidades mayores a las que pueden asimilar, presentándose una acumulación como por ejemplo de nitratos, que puede generar problemas de intoxicaciones ([Rhttp://www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org). 2008). Otras de las áreas afectadas por los desechos en la industria avícola son: la salud humana y animal e impacto económico.

Salud Humana y Animal

El alto contenido de nitrógeno lleva a la formación de nitratos, los cuales al mezclarse con aguas para el consumo humano puede dar a la formación de compuestos halometanos y organoclorados, dándole mal gusto al agua y a concentraciones elevadas de toxinas. La disposición incorrecta de las excretas propicia también el desarrollo de microorganismos potencialmente patógenos para los mismos animales, quienes, a su vez, pueden transmitir enfermedades como, Rotavirus, Colibacilosis, Parásitos Gastrointestinales, Salmonella, Newcastle, *E. coli*, entre otros ([Rhttp://www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org). 2008).

- La alimentación de animales con restos frescos como la gallinaza, induce a la propagación cruzada entre especies de diferentes enfermedades, debido a los patógenos que pueden portar las excretas.
- Generación de olores ofensivos.

Impacto Económico

En Cuba en la última década se han realizado numerosas investigaciones acerca de sus recursos naturales, la diversidad biológica, los peligros naturales y la situación ambiental, los que aportan una excelente base informativa acerca de la sostenibilidad del país. Sin embargo como objeto de estudio, el desarrollo sostenible ha sido el menos examinado debido a su complejidad, el vínculo que contrae con dimensiones como la económica, la productiva y la social, así como la carencia de indicadores pertinentes para su investigación. A pesar del brutal y genocida bloqueo comercial y financiero impuesto por los Estados Unidos a la isla, lo que dificulta el suministro de combustible y nos obliga a adquirirlos por terceros países, el desarrollo del sector energético en Cuba ha llegado a cubrir gran parte de la población. Expertos de la Organización Latinoamericana de Energía han concluido que Cuba es el país latinoamericano de mayor potencial bioenergético aprovechable de residuales orgánicos ([Fernández 1999](#)). Según estudios realizados ([Sánchez Borroto, Melo Espinosa et al. 2014](#)), el aporte de las fuentes renovables de energía en Cuba en 2014, representó el 4,91% del total de la producción de energía primaria del país. La provincia de Sancti Spíritus cuenta con recursos disponibles para su uso energético, los que pueden ser una fuente

primordial para la producción de biogás y fertilizantes. Estudios muestran que en la provincia existe un potencial de residuos biodegradables (Oria Gómez 2010).

1.2 Factores que impiden el uso sostenible de la gallinaza

Existen varios factores que limitan el uso sostenible de la gallinaza en las biorrefinerías, como la digestibilidad limitada de la cama, la alta humedad, la alta composición química elemental (principalmente nitrógeno, calcio, potasio) y el pH alto (Pareja 2005). Otros factores que limitan el uso sostenible de la biomasa mediante combustión o tratamiento termoquímico son: humedad, contenido de cenizas y composición química elemental (Khan et al., 2009; McKendry, 2002). El alto contenido de humedad y cenizas en los combustibles de desechos biológicos puede causar problemas de ignición y combustión (Fatih Demirbas, 2009). El valor calorífico del material de camada disminuye al aumentar el contenido de humedad, las muestras secadas al aire tienen un valor típico de 13,5 GJ / tonelada, que es aproximadamente la mitad que el carbón (Kelleher et al., 2002).

1.3 Tecnologías de tratamiento para la gallinaza

La gallinaza puede ser tratada a través de procesos bioquímicos (compostaje y digestión anaerobia) con la lixiviación como pretratamiento de la digestión anaerobia o termoquímicos (combustión directa, pirolisis, gasificación y conversión hidrotérmica).

Digestión anaerobia

La Digestión Anaerobia es un proceso en el que microorganismos en ausencia de oxígeno u otros agentes oxidantes fuertes degradan la materia orgánica, con el fin de obtener un producto gaseoso conocido como "biogás". Mayoritariamente los productos resultantes de este proceso son el Dióxido de Carbono (CO₂) en un 30 a 50% (Lorenzo and Obaya, 2005) y Metano (CH₄) en un 50 a 70% (Caicedo Messa, 2006) y en menor proporción se puede encontrar N₂, NH₃, H₂ y H₂S (Bermúdez, et al., 1988).

Para que se produzca el proceso de Digestión Anaerobia se requiere de un grupo de bacterias conviviendo de forma simbiótica como las: hidrolíticas-acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas, las mismas que permiten desdoblar las

macromoléculas (carbohidratos, lípidos y proteínas) a compuestos más simples como el hidrogeno y acetato (Limaico Santillán, 2018).

Conversión hidrotermal

Los procesos hidrotérmicos de conversión de la biomasa son aquellos que tienen lugar en presencia de agua en condiciones sub- o supercríticas. Esta situación viene determinada por el punto crítico del agua que está establecido en 374 °C y 22 MPa. Por debajo de dicha temperatura y hasta los 100 °C se trata de condiciones subcríticas y por encima, de condiciones supercríticas (Peterson, A.A. et al., 2008). Cuando el agua se encuentra a condiciones cercanas a las del punto crítico sus características cambian rápidamente. La constante dieléctrica disminuye de manera pronunciada cambiando su capacidad de disolución. En estas condiciones, el agua actúa como un compuesto no polar lo que lo convierte en un buen solvente para los compuestos orgánicos no polares. El incremento de la temperatura también afecta a su viscosidad y densidad, que se ven reducidas en gran medida, lo que aumenta su coeficiente de difusión, mejorándose las condiciones de reacción para un radio de reacción superior (Guo, Y. et al., 2010). De acuerdo con el diagrama de fases del agua y sus diferentes regiones por encima de la presión de vapor y la temperatura crítica, la conversión hidrotérmica (HT) se puede clasificar en: gasificación hidrotermal (HTG), licuefacción hidrotermal (HTL) y carbonización hidrotermal (HTC) (Figura 3) (Kang et al., 2013; Kannan et al., 2020). Las convenciones HT son una tecnología exitosa para el tratamiento de desechos animales (Gollakota et al., 2018; Posmanik et al., 2017). Se distinguen diferentes tipos de procesos hidrotérmicos, dependiendo del rango de temperaturas y presiones a los que somete a la materia prima y a su finalidad (Peterson, A.A. et al., 2008).

Licuefacción hidrotermal

La licuefacción es un proceso catalítico en presencia de agua, CO e hidrógeno (Ghatak, 2011). Este proceso tiene lugar por debajo del punto crítico en un rango de temperaturas entre 200 y 350 °C y de presiones entre 4 y 20 MPa. Los tiempos de residencia suelen variar según el autor, por ejemplo, Peterson et al. (2008) establecen unos tiempos de residencia de 10 a 60 minutos. La finalidad de este proceso es la

obtención de un líquido orgánico (biocrudo). Tiene ventajas sobre los demás procesos termoquímicos, ya que no necesita pretratamientos de secado porque se realiza en fase acuosa, lo que además permite una alta conversión de la materia prima a biocrudo (Van Doren et al., 2017).

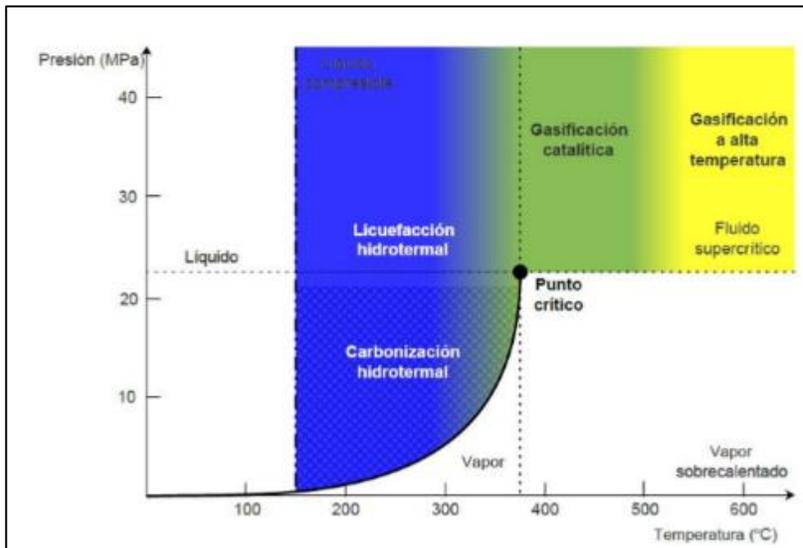


Figura 3. Procesos de conversión hidrotérmica para el tratamiento de residuales

Gasificación hidrotermal

Este proceso empieza a tener lugar a condiciones muy cercanas al punto crítico, pudiéndose dar tanto en agua subcrítica como supercrítica, con el fin de incrementar la producción de la fase gaseosa formada por H_2 , CO_2 , CH_4 , CO e hidrocarburos ligeros (Modell, M., 1985). Hasta los 500 °C, el proceso se denomina gasificación catalítica debido a que requiere de la acción de un agente catalizador para alcanzar unos radios de reacción y selectividad razonables. Por otro lado, si la temperatura sobrepasa los 500 °C la gasificación es homogénea y la termólisis tiene lugar sin problemas, por lo que se pasa a denominar gasificación a alta temperatura (Peterson, A.A. et al., 2008).

Carbonización hidrotermal

La carbonización hidrotermal o HTC (por sus siglas en inglés) es un proceso novedoso, aunque ya empezó a ser estudiado para la obtención de carbón en 1913. Este sistema trabaja a bajas temperaturas (180 – 350 °C) y a una presión lo

suficientemente alta como para mantener el agua en estado líquido. La presión de operación depende de los productos que se quieran obtener, por lo que puede variar desde los 0,9 MPa (Poerschmann, J. et al., 2013), hasta los 20,68 MPa (Singh, K. et al., 2014). Permite la transformación de la biomasa lignocelulósica en carbón, denominado hidrocarbón, además de una fase líquida y gaseosa (Libra, J.A. et al., 2011; Poerschmann, J. et al., 2013; Reza, M.T., 2011; Titirici, M.-M. et al., 2007). El HTC es similar al HTL, pero ocurre a una temperatura de (menos de 300 ° C). Ambas técnicas son más sostenibles que la pirólisis debido al ahorro de energía, la alta eficiencia energética y el bajo rendimiento de alquitrán (Gollakota et al., 2018).

Aplicaciones de los productos generados por la conversión hidrotermal

Durante la conversión hidrotérmica se generan biocrudo, fase gaseosa y fase acuosa, hidrocarburo. La fase gaseosa se compone principalmente de CO₂. El aceite biocrudo se puede mejorar para su uso comercial. No se requiere un mecanismo de reacción complicado para la mejora del biocrudo de HTL porque tiene menos humedad, contenido de oxígeno y, por lo tanto, el hidrotratamiento fino mejorará su calidad (Gollakota et al. 2018). Según (Vardon et al., 2011), se detectaron algunos grupos funcionales como: alifáticos cortos, alifáticos de ramificación larga, alcoholes, éteres, carbohidratos, aromáticos, olefinas, ésteres, ácidos carboxílicos cetonas y aldehídos en aceite biocrudo de HTL de lodos anaeróbicos. Estos compuestos se pueden utilizar ampliamente en la industria de la biorrefinería para fabricar productos químicos.

Hay muchas diferencias entre el hidrocarburo y el hidrochar. El hidrocarburo tiene menos contenido de cenizas en comparación con el biocarbón producido mediante pirólisis lenta, también tiene muchos grupos funcionales que contienen oxígeno que se retienen sobre su superficie, esto hace que tenga una gran cantidad de aplicaciones (Sharma et al., 2020). Hydrochar podría emplearse como fertilizante sólido (Ma & You, 2019), también como remediación de suelos contaminantes y tratamiento de aguas residuales debido a su alta capacidad de adsorción, centrándose en la adsorción de iones de metales pesados. Otras aplicaciones se encuentran como secuestro de carbono, producción de bioenergía y como materia prima para el extracto de compuestos químicos (Sharma et al. 2020).

1.4 Análisis de ciclo de vida (ACV) como herramienta para la evaluación ambiental

El análisis de ciclo de vida es un proceso para evaluar las descargas ambientales asociadas con un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando los materiales y la energía utilizada y los residuos liberados al ambiente; para evaluar el impacto del uso de esos materiales y energía y de las descargas al ambiente; y para identificar y evaluar oportunidades para efectuar mejoras ambientales ([Azapagic, 1999](#)).

Generalidades

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) clásico es un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando tanto el uso de materia y energía como las emisiones al entorno, para poder así determinar su impacto, llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental y realizar declaraciones ambientales. Esta metodología para evaluación de los impactos ambientales se integra con facilidad a la de evaluación de los impactos socioeconómicos, con la que comparte elementos, lo que favorece y aporta datos comparativos para la toma de decisiones frente a nuevos proyectos o acciones de mejora. De esta forma, integrando las dimensiones económica y social, el ACV se aproxima a lo que se ha denominado la Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida. El ACV no es una evaluación de riesgo. Es una herramienta que permite aumentar la eficacia e introducir mejoras mediante la identificación y cuantificación de las emisiones y el impacto real de las emisiones en función de cuándo, dónde y cómo se transfieren al ambiente. Como salidas u outputs se incluyen las emisiones a la atmósfera, al agua y al suelo, los residuos y los subproductos afectados en cada proceso o fase del sistema. El inventario es la plataforma donde se recopilan las entradas y salidas para el análisis. Se lo denomina Inventario de Ciclo de Vida (ICV) y es la fase correspondiente a la recopilación y la cuantificación de las entradas y salidas de un sistema durante su ciclo de vida. Para estudiar el ciclo de vida de un producto o servicio se tienen en cuenta todas las entradas y salidas de los procesos que tienen lugar en su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta el reciclado o disposición final. Las etapas intermedias del proceso y acciones como el transporte

y almacenaje, siempre que cuenten con relevancia dentro del ciclo de vida en cuanto a su impacto, también se incluyen en el análisis. Cuando el ACV tiene este alcance se lo denomina “de la cuna a la tumba”. En cambio, si el alcance del sistema en estudio abarca solamente las entradas y salidas, desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se lanza en el mercado, se conoce como “de la cuna a la puerta”. Finalmente, si las entradas y salidas se limitan a las inherentes al proceso de fabricación, se denomina “de la puerta a la puerta”(Olivera, Cristobal et al. 2016).

Etapas

Según la norma ISO 14040(2006) (Olivera, Cristobal et al. 2016), el estudio de ACV se compone de cuatro fases:

a) **Definición del objetivo y el alcance.** Establecimiento de los objetivos y cometidos del estudio, su alcance de acuerdo a los límites fijados para el sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación.

b) **Análisis del inventario.** Fase en la que se recopilan los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema en estudio. Los datos se refieren a la unidad funcional definida en la fase anterior.

c) **Evaluación del impacto del ciclo de vida.** Al inventario de entradas y salidas se le incorporan los indicadores correspondientes a los potenciales impactos hacia el medio ambiente, la salud humana y la disponibilidad de recursos naturales.

d) **Interpretación.** Los resultados del ICV y la Evaluación de Impactos se interpretan en función del objetivo y alcance establecidos. Luego de realizar el análisis de los resultados, considerando su integridad, sensibilidad y coherencia, se plasman las conclusiones, limitaciones y recomendaciones que surgen del estudio.

Análisis de Ciclo de Vida y Diseño de Procesos

Con el fin de optimizar los procesos teniendo en cuenta su desempeño ambiental, se han empleado varios enfoques que buscan ante todo la minimización de los residuos: generación de la menor cantidad posible de aguas residuales, reducción de los costos de tratamiento de los residuos y empleo del concepto de Cero Contaminación Evitable (Azapagic, 1999). Sin embargo estas visiones se orientan de nuevo a analizar los efectos de la planta sobre los alrededores sin considerar el ciclo de vida del proceso.

La incorporación del LCA en la optimización de procesos conduce a la formulación de una función multiobjetivo en la cual, además de una función de costos o de utilidades, se incluyen metas ambientales tales como la minimización de las descargas y de los impactos ([Azapagic, 1999](#)).

En Cuba se ha hecho un gran esfuerzo por la conservación ambiental, aún cuando se ha trabajado para solucionar las dificultades. Las limitaciones económicas agravadas por el bloqueo imperialista no han permitido revertir en la magnitud necesaria las deficiencias heredadas, además, el desarrollo vertiginoso de programas económicos no siempre contó con priorizar la solución adecuada respecto al tratamiento de residuales, esto ha estado influido por falta de conciencia y educación ambiental, además de los problemas regionales. Con el triunfo de la Revolución se ha insistido en la búsqueda de alternativas de producciones más limpias. Desde 1998 el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente ha venido realizando esfuerzos para promover, introducir e implementar estrategias de Producción Más Limpia en los sectores prioritarios de la economía ([Berro, 2005](#)).

1.5 Necesidad de la aplicación del ACV para la evaluación ambiental de las diferentes alternativas de tratamiento de la gallinaza

El desarrollo sustentable en Cuba, como un nuevo concepto de avance económico, se presenta como un proceso donde la política energética debe formularse de manera que logre el desarrollo sustentable desde el punto de vista económico, social y ecológico, siendo los recursos energéticos renovables una prioridad en el nuevo Modelo de economía cubano ([ONEI 2019](#)). La sostenibilidad de las actividades agrícolas y su contribución al desarrollo local de las comunidades rurales también están en el centro de las prioridades cubanas, buscando ingresos de la transformación de los recursos locales disponibles, la autonomía de las empresas y nuevos modelos comerciales para las pequeñas empresas agrícolas a pequeña escala. En los últimos 30 años, las granjas avícolas han jugado un papel importante para asegurar la disponibilidad de una fuente rápida de proteínas para los cubanos. La producción de pollo la realiza, en su mayor parte, el Grupo Empresarial Ganadero (GEGAN), de propiedad estatal. Las empresas avícolas se subdividen en granjas, las cuales se clasifican en: postura, reemplazo y reproductoras ([Suárez-Hernández et al., 2018](#)). En Cuba existen alrededor de 220 granjas avícolas con 13 834 miles de cabezas en total,

a fines de 2018 (ONEI 2019), con una generación de 2075 toneladas de la gallinaza por día (considerando 0,15 kg excretas-día / animales).

El uso de la gallinaza como biomasa para la generación de energía ha sido poco estudiado y, por lo tanto, escasamente implementado en Cuba; no existen estudios de sustentabilidad sobre el impacto de tecnologías termoquímicas en el contexto cubano. Si se estudian diferentes alternativas para el tratamiento de la gallinaza es posible obtener un sistema de tecnologías que permitan el aprovechamiento de la misma para la obtención de energía y productos de alto valor agregado con una disminución del impacto ambiental. Los productos energéticos podrían ser utilizados para cubrir el 100% de la demanda térmica y eléctrica de las granjas avícolas cubanas y aumentar sus niveles de producción en base a la nueva disponibilidad de energía. El digestato de DA, la fase acuosa y el hidrocarburo de HTC podrían emplearse como recurso nutritivo. De esta forma, se reduce el uso intensivo de fertilizantes inorgánicos. Además, la sustitución de las importaciones es de vital importancia para el crecimiento económico.

1.6 Conclusiones parciales del Capítulo 1

La gestión eficiente de residuos avícolas podría minimizar la contaminación ambiental, reciclar o reutiliza los desechos conlleva a un efecto económico, social y ambiental considerable. Existen varios factores que limitan el uso sostenible de la gallinaza, como la digestibilidad limitada de la camada, la alta humedad, la alta composición química elemental (principalmente nitrógeno, calcio, potasio) y el pH alto. La gallinaza puede ser tratada a través de la combinación de la digestión anaerobia y conversión hidrotérmica. El análisis de ciclo de vida es una herramienta ampliamente usada para la evaluación del impacto ambiental, la cual puede ser aplicada a diferentes escenarios. Existe la necesidad de un análisis del impacto ambiental de las diferentes alternativas para que el sistema de gestión de residuos de gallinaza en Cuba sea sostenible.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

Para lograr el cumplimiento de los objetivos específicos este capítulo se dividió en dos etapas. En una primera etapa se describe lo relacionado al diagnóstico de la situación ambiental de las granjas avícolas sin tratamiento de sus residuales y en una segunda etapa se describen los métodos empleados para la evaluación del impacto medioambiental del tratamiento de la gallinaza a través de un análisis de ciclo de vida.

2.1 ETAPA 1: Diagnóstico la situación ambiental de las granjas avícolas de Sancti Spíritus sin tratamiento de sus residuales

Se realiza con compañeros de la administración y los expertos seleccionados (ver acápite 2.1.1 Proceso de selección de los expertos), un recorrido por diferentes áreas de Granjas avícolas de la provincia, entre las que se pueden identificar sistema de tratamiento de residuales, naves, cocinas, áreas de cultivos y otras, determinándose a través del método de observación directa, tormenta de ideas y fijación fotográfica con cámara digital (marca Samsung), la situación actual de los sistemas de residuales convencionales de forma interrelacionada con los diferentes factores ambientales, así como actividades realizadas por los obreros que se relacionan y otros elementos de interés para la investigación.

2.1.1 Proceso de selección de los expertos

Se empleó este método para identificar las principales causas de contaminación de la gallinaza en el Medio Ambiente. Para determinar el número de expertos se utilizó la siguiente ecuación:

$$M = \frac{p(1-p)k}{i^2} \quad (4)$$

Donde M: cantidad necesaria de expertos, p: proporción estimada de errores de los expertos, I: nivel de precisión deseada en la estimación, k: constante asociada al nivel de confianza elegido la cual se determina por:

$$k = (Z \alpha/2)^2 \quad (5)$$

Donde $(Z \alpha/2)^2$: percentil de la distribución Normal para $(1-\alpha)$ para un 95% de confianza.

2.1.2 Diagrama Ishikawa o Causa - Efecto

Con los expertos seleccionados se procedió de forma individual al llenado de una hoja con las principales causas de la contaminación del medio ambiente en las granjas avícolas de la provincia de Sancti Spíritus, así como a determinar las causas de las causas por consenso del equipo de trabajo indicando no más de 6 – 8 causas principales. Después de seleccionar todas las aportadas se redujo la lista eliminando las redundantes.

Posteriormente se buscó el consenso en el orden de manera individual, a través de hojas donde se dan numeradas las causas y se solicita a cada experto su orden de importancia desde 1 hasta 7, considerando la más importancia la de mayor número y la menos importante la de menor número (Anexo 1).

Una vez emitidas las valoraciones, se condensa en una tabla o matriz de juicios donde se realiza el cálculo de R_j con la sumatoria de los valores otorgados por cada uno de los expertos (E), calculándose la concordancia (C) con la siguiente ecuación:

$$C = (1 - V_n / V_t) * 100$$

Donde:

C: concordancia expresada en porcentaje.

V_n : cantidad de experto en contra del criterio predominante.

V_t : cantidad total de expertos.

Se confecciona el Diagrama Ishikawa o Causa – Efecto, el problema fundamental se ubica en la punta de la saeta como efecto, en las “espinas” sus causas principales y como espinas secundarias las causas de las causas.

2.1.2 Diagrama de Pareto

Con el empleo del Microsoft Excel se introducen datos que generan un gráfico del Diagrama de Pareto, tomando las 7 causas principales que afectan el medio ambiente en las granjas avícolas con un orden de importancia según los R_j y la frecuencia relativa acumulada del porciento de los R_j .

2.2 ETAPA 2: Análisis de ciclo de vida de los escenarios tecnológicos

2.2.1 Objetivo y alcance

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño ambiental de un sistema tecnológico para la gestión de la gallinaza a través de rutas de termo y bioconversión. Para ello se utilizó una metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) considerando escenario base la gallinaza sin tratamiento y. escenarios de producciones más limpia. La unidad funcional, los límites del sistema, la descripción de los diferentes escenarios propuestos, las principales consideraciones, el análisis del inventario del ciclo de vida, la evaluación e interpretación del ACV se describen en detalle a continuación.

2.2.1 Unidad funcional y límites del sistema

El sistema incluye todos los procesos del ciclo de vida, desde la recolección de la gallinaza hasta la utilización del hidrochar, así como todo el intercambio de energía y las emisiones asociadas (Figura 2). La unidad funcional para este estudio se definió como el manejo de 1000 kg de gallinaza fresca.

El enfoque realizado es de la puerta a la puerta (*gate-to gate*). El consumo de gallinaza es considerado como entrada de la tecnosfera (material). Las emisiones de la utilización de la gallinaza como fertilizante son consideradas como emisiones al aire (ecosfera). Las emisiones de nitratos son consideradas emisiones al agua. El consumo de agua es considerado como recurso tomado de la naturaleza (ecosfera). La electricidad es considerada como una entrada de la tecnosfera. El contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en la gallinaza, digestato procedente de la digestión anaerobia y el hidrocarbón fueron considerados como salidas conocidas a la tecnosfera y como sustitutos de fertilizante sintético.

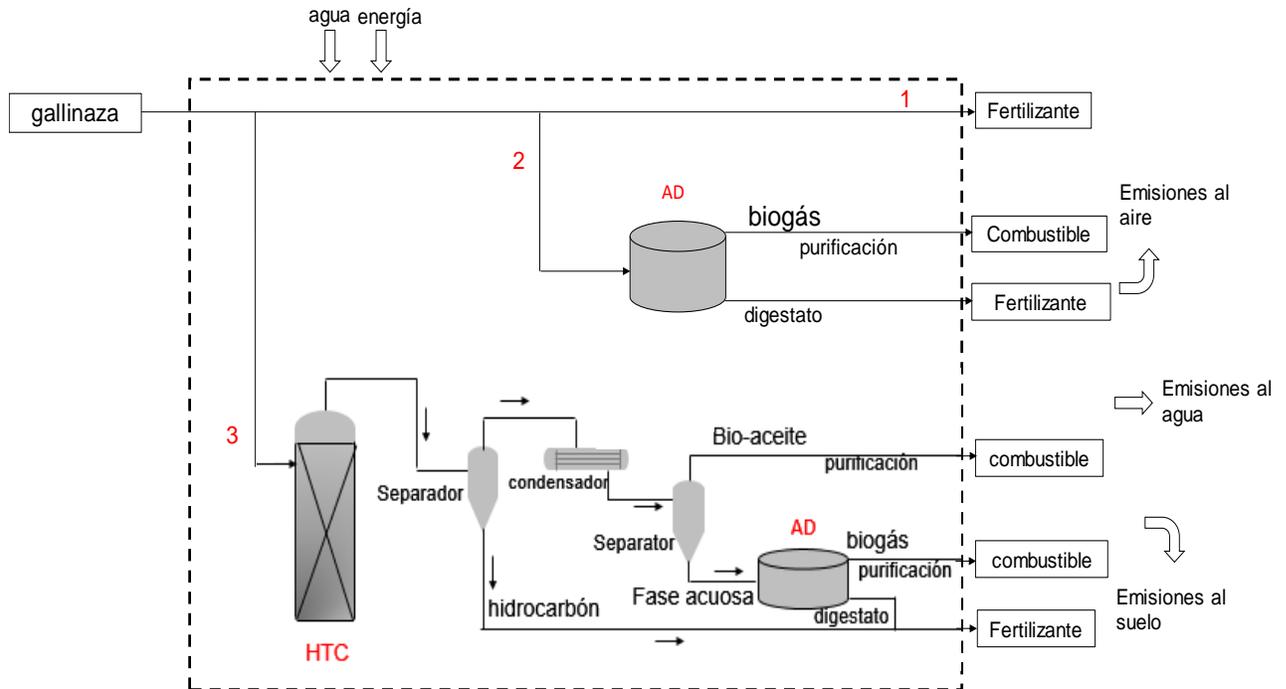


Figura 4: Límites del sistema para los diferentes escenarios tecnológicos propuestos para el tratamiento de la gallinaza. E-1: Aplicación directa al suelo, E-2: Digestión anaerobia E-3: Combinación de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia.

2.2.3 Descripción de escenarios tecnológicos

Se tuvieron en cuenta cuatro escenarios tecnológicos para la gestión de la gallinaza. A continuación, se describen en detalle los diferentes escenarios evaluados.

- Aplicación directa al suelo (E-1): Escenario base que consiste en aplicar directamente la gallinaza al suelo (sin tratamiento).

La aplicación directa de la gallinaza en la tierra como fertilizante se considera la opción de tratamiento más común, porque contiene nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, aunque en concentraciones variables. La relación de NPK (Nitrógeno, fósforo y potasio) determinada en la gallinaza en Cuba es de 2:0,5:1 (Ortiz et al., 2009). Estos son macronutrientes esenciales para las plantas y el suelo. Sin embargo, antes de la aplicación de la gallinaza al suelo, ésta debe pasar por un proceso de saneamiento y esterilización, para no incorporar parásitos u otros microorganismos patógenos al suelo y a los cultivos. Además, se debe tener en cuenta que en consecuencia a la aplicación directa se producen grandes emisiones atmosféricas de CH_4 , NH_3 , monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y óxido de

dinitrógeno (N_2O), siendo el NH_3 el 92% del total de las emisiones de Nitrógeno, causando un impacto perjudicial al medio ambiente (Billen et al., 2015).

- Digestión anaerobia (E-2): En este escenario se consideró el tratamiento de la gallinaza para producir biogás, el cual se limpia y se quema por completo para generar vapor y electricidad. Para la DA se consideraron las condiciones descritas por Villamil et al. (2020) en condiciones mesofílicas en una sola etapa (1.00 bar, 35.0 °C) y un tiempo de retención hidráulica de 34 días en condiciones de estudio a Batch. El biogás consistió en un 56% de metano.
- Combinación de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia (E-3): Diseño que consiste en tratar a la gallinaza en un reactor HTC para la producción de hidrocarburos e hidrochar. La fase acuosa del HTC se utiliza como sustrato en un reactor anaerobio de para producir biogás. Los gases de la combustión se utilizan para producir calor y electricidad.

Para el proceso de HTC se consideraron las condiciones experimentales siguiendo un proceso típico según lo reportado por Ghanim et. al., (2017). Se utilizó un reactor de presión con agitación Parr de 8,0 litros equipado con un revestimiento de vidrio extraíble, con un calentador eléctrico para mantener la temperatura del reactor a 220 ° C durante 1 h. La materia prima del reactor fue la gallinaza con un contenido de humedad del 25 % mezclada con un litro de agua. Las corrientes de salida procedentes del HTC se separaron en dos fracciones: sólida (hidrochar) y líquida (fase acuosa) por filtración.

La fase acuosa fue sometida a un estudio a *Batch* de digestión anaerobia, siguiendo la metodología descrita por Pagés-Díaz & Huiliñir (2020). Todo el set experimental se llevó a cabo en un digestor de vidrio de 300 mL con 210 mL como volumen de trabajo. Cada botella fue alimentada con 10 mL de la solución nutritiva madre y una cantidad adecuada de sustrato e inóculo para una relación de 0,5. Todos los recipientes se cubrieron con papel de aluminio. Para evitar el contacto con la luz solar y luego sellar adecuadamente con goma tapones y silicona para garantizar condiciones anaeróbicas. Además, los digestores se mantuvieron en condiciones mesofílicas ($35 \pm 2^\circ\text{C}$) en un baño de agua con calentadores controlados automáticamente. El biogás producido se midió diariamente por desplazamiento de líquido después de pasar por

una solución de hidróxido de sodio (NaOH) (3% p / p) para disolver CO₂. El gas restante se asumió a ser el volumen de metano (CH₄), el cual fue normalizado a 0° C y 101,325 kPa.

Se utilizaron balances de masa y energía para los principales procesos del sistema, y los valores utilizados se obtuvieron de datos de la literatura. Los balances de carbono (C) y nitrógeno (N) para los procesos también se incorporaron en los cálculos (Tabla 2).

Las principales consideraciones de este estudio fueron las siguientes:

- La gallinaza generada fue calculada considerando 0,15 kg excretas-día / animales (Suárez-Hernández et al 2018).
- En este estudio, se consideró que 1000 kg de gallinaza contenían en promedio 14 GJ de energía primaria, 350 kg C, 46 kg N, 12 kg P y 20 kg K. Se supuso que el contenido de humedad es del 25% (Zhu et al., 2019).
- Para el consumo de energía, se asumió el desglose de la electricidad cubana considerando cuatro fuentes eléctricas diferentes según ONEI (2019): centrales térmicas centralizadas y descentralizadas (81,66%), ciclos combinados con turbina de gas utilizando gas licuado de petróleo (13,04%), cogeneración sistemas que utilizan bagazo (4,63%) y otras tecnologías que utilizan fuentes renovables (0,67%).
- La composición de la gallinaza fue la reportada por (Ortiz et al., 2006) (Tabla 1)

Tabla 2. Composición de la gallinaza

Parámetros	Gallinaza
C	42.22-42.30
H	5.43-5.51
O	29.91-29.97
S	0.60-0.66
ST	81.2-82.6 %
SV	78.3-88.3 %ST
Ceniza	11.7-21.7 %
NT	1.9-2.2 % ST
Celulosa	26.5-28.5 %ST
Lignina	4.1-7.5 %ST
P ₂ O ₅	0.4-0.6 %ST
K ₂ O	0.8-1.1 %ST

pH	7.8-8.0
ST: sólidos totales; SV: sólidos volátiles; NT: nitrógeno total	

- No se consideraron pérdidas en el sistema (ej. agua, arrastre, escapes de gases, etc.). El consumo de energía en el reactor HTC se estimó de 65kWh/d.
- La composición del producto y subproductos a la salida del HTC fueron las consideradas por [Pagés-Díaz & Huiliñir \(2020\)](#). Siendo, Hydrochar 50-80% (22-29 MJ/kg), gases (principalmente CO₂) 2-5%, fase acuosa (principalmente ácidos volátiles: acético, propiónico, butírico, valérico, fenoles, furanos y compuestos aromáticos nitrogenados) 5-20%.
- Se estimó una producción de biogás de 63.82Nm³/d y 10.96 t/d de digestato.

2.2.3 Inventario del análisis de ciclo de vida

La evaluación ambiental presentada en este estudio se realizó utilizando un enfoque de ACV (determinado por los límites del sistema representados en la Figura 1). Los datos para el análisis del inventario fueron proporcionados por estudios de la literatura sobre el tratamiento de la gallinaza y ACV. No se estimó transporte de la gallinaza pues se considera que los sistemas de tratamientos están situados en las mismas granjas donde se generan los residuos.

Tabla 4. Análisis de inventario para los diferentes escenarios. Aplicación directa al suelo (*E-1*), Digestión anaerobia (*E-2*), Combinación de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia (*E-3*).

Entradas/Salidas	Unidades	Escenarios			Referencias
		E-1	E-2	E-3	
Gallinaza	kg	1000	1000	1000	Unidad funcional (de Graaff et al., 2017) ^a , (Beausang., 2020) ^b (de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^b
Energía (electricidad)	kWh/año	-	28000 ^a	140400 ^b	
Agua	kg	-	0.14 ^a	4.34E-02 ^b	
Emisiones					
<i>Al agua</i>					
Nitrato	kg	18.7	1.87	0.84	(de Graaff et al., 2017)
<i>Al aire</i>					
CO _{2,biogenic}	kg	0.810 ^a	1.58E+0 ^b	1.38E+00 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}

CH ₄	kg	0.136 ^a	9.80E-03 ^b	2.17E-06 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , Adapted from Nielsen et al. (2010) ^{b,c}
NH ₃	kg	0.003 ^a	3.81E-17 ^b	5.83E-06 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
H ₂ S	kg	0.027 ^a	2.02E-23 ^b	5.02E-23 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
CO	kg	0.026 ^a	7.00E-03 ^b	3.53E-05 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , Adapted from Nielsen et al. (2010) ^b , Owsianiak et al. (2016) ^c
SO ₂	kg	0.006 ^a	9.51E-04 ^b	8.53E-06 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
NO ₂	kg	0.329 ^a	2.15E-04 ^b	2.73E-05 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
N ₂ O	kg	39 ^a	1.27E-05 ^b	2.79E-03 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
<i>Al suelo</i>					
Cd	mg kg ⁻¹	7.67 ^a	1.27 ^b	0.80 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
Cu	mg kg ⁻¹	37.1 ^a	21 ^b	10 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
Ni	mg kg ⁻¹	78 ^a	37 ^b	21 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
Pb	mg kg ⁻¹	199 ^a	145 ^b	91 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
Zn	mg kg ⁻¹	1990 ^a	1611 ^b	1021 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
Hg	mg kg ⁻¹	8.12 ^a	1.51 ^b	0.96 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
Cr	mg kg ⁻¹	441 ^a	81 ^b	48 ^c	(de Graaff et al., 2017) ^a , (Medina-Martos et al., 2020) ^{b,c}
Producto evitado					
Fosfato de amonio	kg	6.7	5.8	4.35	Consideraciones del autor
Superfosfato triple	kg	1.5	1.3	0.97 (P ₂ O ₅)	Consideraciones del autor
Cloruro de potasio	kg	1.2	1.0	0.78 (K ₂ O)	Consideraciones del autor

2.2.4 Impacto e interpretación del análisis de ciclo de vida

Se consideró como metodología de evaluación de impacto el método ReCiPe (Goedkoo

p et al., 2013) (Ali et al., 2017; Cherubini et al., 2015; Gonzalez-García et al., 2015; Lamnatou et al., 2016; Noya et al., 2017; Stone et al., 2012). Las categorías de impacto se consideraron en perspectiva jerárquica utilizando la base de datos Ecoinvent v2.2 con la ayuda de OpenLCA v1.3.0. software (Green Delta, 2014). Tras la identificación de las categorías de impacto, como parte de la metodología ACV y teniendo en cuenta las principales emisiones dentro del referido límite del sistema (CH_4 , CO_2 , CO , NO_2 , N_2O , NH_3 , H_2S , SO_2), se identificaron cinco categorías de impacto como las más utilizadas en estudios de ACV (Noya et al., 2017; Stone et al., 2012): ecotoxicidad del agua dulce, toxicidad humana, toxicidad marina, agotamiento de los minerales y ecotoxicidad terrestre.

2.3 Conclusiones parciales del Capítulo 2

Con la aplicación de métodos de expertos, diagrama causa y efecto (Ishikawa) y diagrama de Pareto se realizó un estudio del estado actual de la granja avícola “La botella” y se hace extensiva a la situación de las demás granjas de la provincia; se identificaron las causas que tienen un impacto negativo al medio ambiente. Por otra parte, con el análisis de ciclo de vida fueron establecidos los requisitos para la determinación del impacto ambiental de escenarios tecnológicos propuestos para el tratamiento de la gallinaza.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ETAPA 1: Situación ambiental de las granjas avícolas de Sancti Spíritus

La Empresa Avícola Sancti Spíritus, líder de su tipo en la región central del país, tiene como misión producir y comercializar con eficiencia huevos, carne de aves y otros productos agropecuarios en función de satisfacer las necesidades del consumo de acuerdo a la política estatal definida para la avicultura. Cuenta con 13 Unidades Empresariales de Base, 4 dedicadas al propósito de Ponedoras, 2 al propósito de Reemplazo de ponedoras, 2 al propósito aves semirrásticas y 5 unidades de apoyo. La Unidad La Botella es una granja de Ponedoras situada en la Carretera Central (21.9113; -79.3696). Se efectuó un diagnóstico para determinar la situación ambiental de dicha granja y se consideró que su situación puede ser representativa para las demás granjas avícolas de la provincia de Sancti Spíritus.

3.1.1 Caracterización de la Granja “La botella”

Para el cálculo del número de expertos (expresión), se consideró que $i=0,10$; $p=0,01$; $K=6,6564$; $1-\alpha=0,99$, resultando necesario la opinión de 7 expertos, cuyo censo según el coeficiente de Kendall (donde $\sum \Delta^2: S = 1001$ $\alpha = 0.01$; $S_{\text{tabulada}} = 737.0$) no mostraron evidencias estadísticas que indiquen la falta de concordancia en el juicio entre estos 7 expertos.

Los expertos seleccionados fueron:

1. Subdirector
2. Especialista principal
3. Jefe de servicio
4. Médico veterinario
5. Operario agropecuario especializado
6. Director del CEEPI
7. Profesor del CEEPI

A continuación, se muestra los resultados de las observaciones de los expertos durante el recorrido por la unidad.

El centro consta de 15 naves arquitectónicamente compuestas por estructuras metálicas (Figura 5), techo cubierto de planchas de fibro cemento y piso de cemento donde se desarrolla la cría de 72 165 aves, 4600 por naves.



Figura 5. Naves de aves de la Unidad “La Botella”. Izquierda estera de jaulas, derecha zona de conducto con desechos ubicada debajo de las jaulas.

En la figura 5, se aprecian las zonas de conductos por donde cae la gallinaza junto con residuos de comida y plumas. Este residuo es retirado una vez al año, a pesar que lo que está estipulado es retirarla a los tres meses. Esto trae como consecuencia la mortalidad de algunas aves por asfixia debido a la alta concentración de amoníaco cuando se acumula la gallinaza durante un año ([Comunicación personal con el especialista principal](#)).

La unidad cuenta con una fosa séptica (Figura 6) para el tratamiento primario de las aguas residuales de las instalaciones sanitarias de la entidad, también se depositan ahí gallinas muertas, huevos rotos o en mal estado, plumas, además de las aguas con que limpian las naves una vez terminado el ciclo productivo.



Figura 6. Fosa séptica de la Unidad “La Botella”

En la periferia del centro existen cuatro hectáreas de suelo, en ellas se observan sembrados de yuca, boniato, habichuela, melón entre otros, los cuales son destinados al autoconsumo de los trabajadores de la unidad. En la figura 7 se puede observar la cocina de leña con la cual se elaboran dichos alimentos. Las condiciones para trabajar en esta cocina no son las más idóneas debido a que el obrero se somete a las radiaciones del calor y humo, lo cual a largo plazo pudiera ser perjudicial para su salud, además que es muy difícil mantener las condiciones higiénico-sanitarias. En la figura 7 (derecha) se observa una concentración de madera talada, acción que a largo plazo favorece a la deforestación y afectación del medio ambiente. Además, en este centro existe una garita, naves, dormitorio, oficinas, almacenes, nevera y bomba para agua, que tienen equipos consumidores de energía eléctrica.



Figura 7. Cocina con leña (izquierda) y almacenamiento de leña (derecha) de la unidad “La botella”

Actualmente la unidad “La botella” es la mejor granja de la provincia de Sancti Spíritus debido a que tiene mayor número de utilidades con menos gastos y a su alto porcentaje de puesta. Sin embargo, luego del recorrido con los especialistas se pudieron detectar un grupo de deficiencias que se pudieran transformar en oportunidades de existir un adecuado tratamiento para todos los residuos de esta entidad.

Durante el recorrido de los expertos se conoció que la gallinaza extraída una vez al año es transportada a depósitos de la agricultura donde se vierte junto a los residuos avícolas de las demás granjas de la provincia, sin tratamiento. A continuación, se muestran los resultados de los expertos seleccionados sobre cuál es su impacto ambiental.

3.1.2 Diagnóstico de la Granja “La botella”

Los valores de los criterios de cada experto sobre las causas principales y de los Rj se representan en la tabla 3, siendo la más importante la contaminación del aire con un Rj = 47 y la de menor importancia la afectación el consumo de recursos naturales con un Rj = 10.

Tabla 3. Matriz de las valoraciones de los expertos.

No. Expertos	Causas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Rj
1	Contaminación del agua	5	5	4	5	4	5	5	33
2	Afectación de la población vegetal	3	4	5	3	2	4	2	23
3	Contaminación del aire	7	7	6	6	7	7	7	47
4	Salud del hombre	4	3	3	4	5	3	4	26
5	Afectación de la fauna	1	1	2	2	3	1	3	13
6	Contaminación y erosión de suelos	6	6	7	7	6	6	6	44
7	Consumo de recursos naturales	2	2	1	1	1	2	1	10
Total		28							

En el cálculo de la concordancia entre los expertos (C) para cada una de las causas principales se obtiene que oscilan entre el 70% y 80%, por lo que se cumple la condición de $C \geq 60\%$ por tanto, se acepta un buen nivel de consenso.

Los resultados de los expertos se encuentran en concordancia con la literatura pues muchas investigaciones científicas alertan sobre las emisiones al aire de gases de efecto invernadero tales como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de dinitrógeno (N₂O) y amoníaco (NH₃) (Billen et al., 2015). Este último se emite en grandes concentraciones, en comparación a otros estiércoles como el porcino y el vacuno. Esto se debe a que la gallinaza presenta alta concentración de Nitrógeno Total Amoniacal (TAN, por sus siglas en inglés) (1,9-2,2 % TAN del % sólidos totales

(Ortiz et al., 2006). La causa de esta alta concentración de nitrógeno es que la conversión del mismo en la dieta de las aves es relativamente ineficiente, donde el 50-80% del nitrógeno es excretado (Gerber et al., 2007). Estas emisiones junto al sulfuro de hidrógeno son las causantes de la fuerte fetidez que tiene la gallinaza. Otros de los gases emitidos es el CH₄ debido a la descomposición espontánea que ocurre durante el almacenamiento de la gallinaza. Según Chaump et. al (2019) los lixiviados preparados a partir de la gallinaza almacenada posee menos ácido úrico y más concentración de ácido acético que la gallinaza fresca, lo que indica condiciones favorables para la emisión no controlada de biogás (en su mayoría CH₄). Esto tiene alto impacto al medio ambiente debido a que su potencial de calentamiento global es 34 veces mayor que el que puede causar el CO₂ durante 100 años (Myhre et al., 2013). Otra de las emisiones de gases contaminantes por la acumulación de excremento animal en el campo son los gases de N₂O. Globalmente se estima una emisión de 5,3 T N₂O-N por año, donde un 66 % se debe al sector agrícola (Davidson & Kanter, 2014). En excrementos sin tratar, las emisiones de N₂O aumentan a medida que aumente la desnitrificación con el incremento de la concentración de sólidos volátiles (Baral et al., 2016).

El consumo de recursos naturales fue el de menor Rj (10) a juicio de los expertos. Esto pudiera deberse a que la granja “La botella” es una de las más pequeñas de la provincia y por tanto no tienen gran consumo de recursos como corriente eléctrica o agua. Sin embargo, esta causa pudiera tener un mayor valor cuantitativo en granjas de mayor capacidad y mayor producción donde el consumo de luces en oficinas, gas licuado o electricidad para la cocción de alimentos, uso de turbinas, neveras y demás dispositivos eléctricos sean más demandados. Es por ello la importancia de lograr autonomía en las granjas aprovechando sus propios residuales. De esta forma se estaría contribuyendo a la economía circular que tanto auge ha tenido en las últimas décadas para lograr que el desarrollo sea sostenible.

En la Figura 5 se observa el diagrama de “Ishikawa o Causa – Efecto”, el cual ilustra el problema general de la contaminación del medio ambiente en la granja avícola “La

botella”, el orden de importancia de las 7 causales principales y las 31 causas de las causas.

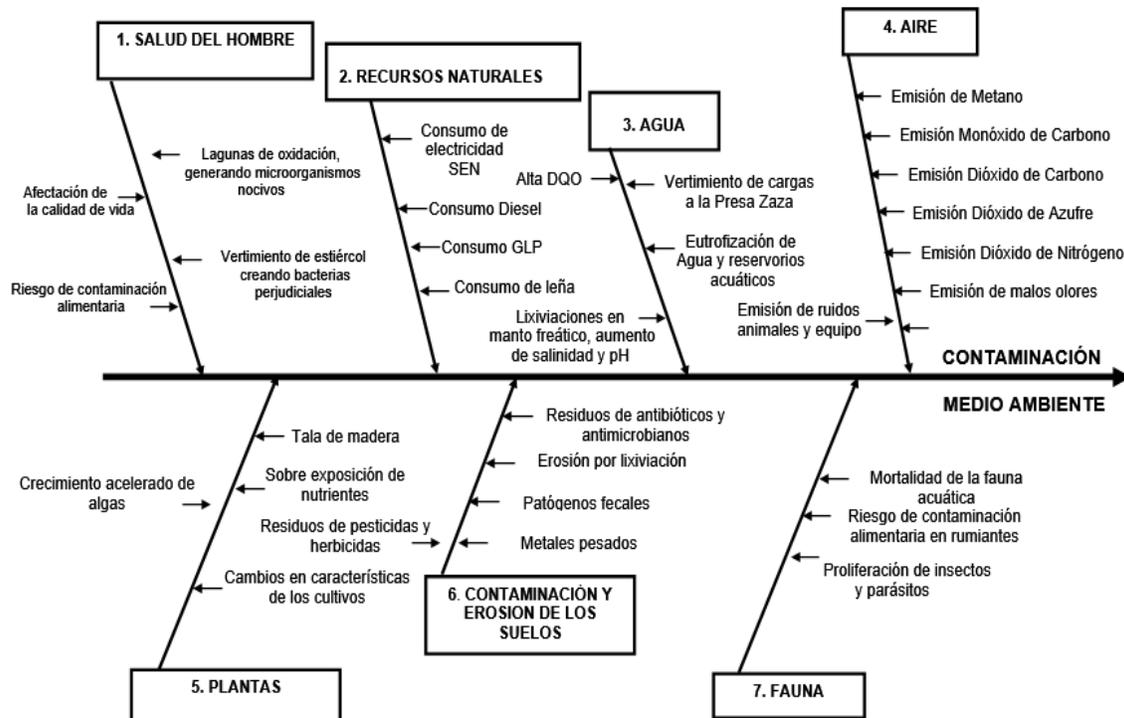


Figura 5. Diagrama de Ishikawa que representa el impacto ambiental de la granja avícola “La botella”.

El Diagrama de Pareto (Figura 6) relacionado con la contaminación ambiental de la granja avícola “La botella” expresa que, enfocando los esfuerzos hacia los dos problemas ambientales más importantes según criterio de los expertos, la contaminación del aire y la contaminación y erosión de suelos, se resolverían aproximadamente el 50 % de la contaminación ambiental en el centro.

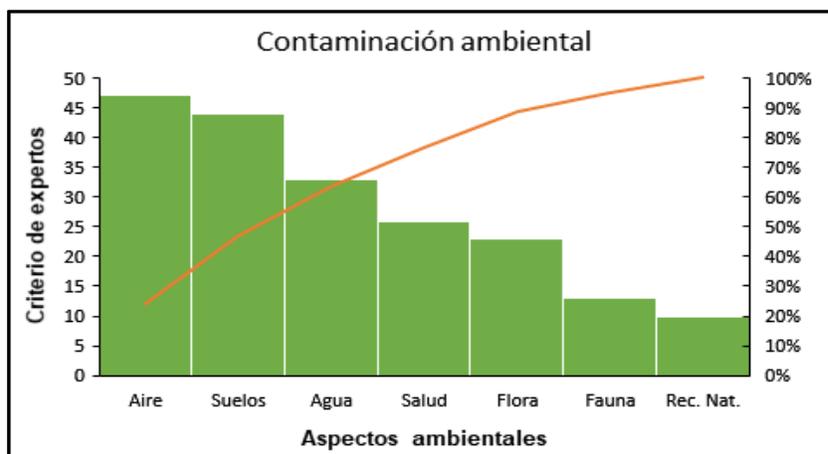


Figura 6. Diagrama de Pareto. Contaminación ambiental del a granja avícola “La botella”

En efecto, un tratamiento adecuado de los residuales de las granjas avícolas traería un impacto positivo para el medio ambiente y por consiguiente para la salud y el bienestar el hombre.

3.2 ETAPA 2: Resultados del Análisis de Ciclo de Vida

En esta etapa se presentan los resultados del análisis del ciclo de vida el cual permitió no sólo la evaluación del proceso de tratamiento de la gallinaza, sino también la comparación de su desempeño entre las alternativas tecnológicas que incluyan variaciones en la configuración del diagrama de proceso y en la materia prima.

3.2.1 Resultados de la caracterización

Los impactos globales caracterizados para 1000 kg de gallinaza (unidad funcional) son presentados en la Fig. 7 para los tres escenarios evaluados: Aplicación directa al suelo (*E-1*), Digestión anaerobia (*E-2*), Combinación de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia (*E-3*).

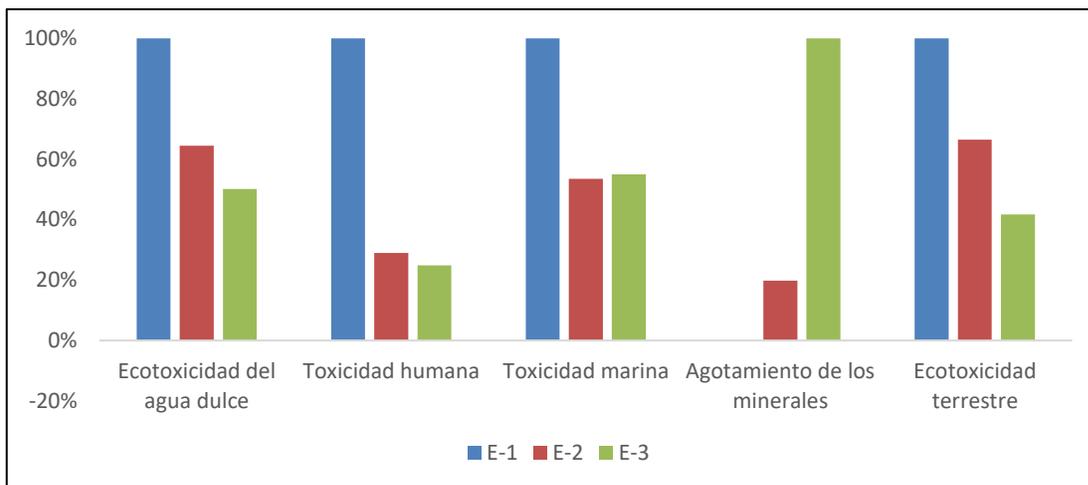


Figura 7. Resultados de la comparación de alternativas (caracterización): Aplicación directa al suelo (*E-1*), Digestión anaerobia (*E-2*), Combinación de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia (*E-3*).

Al realizar la comparación de las alternativas previamente analizadas, todas las categorías de impacto evaluadas presentan comportamiento perjudicial, excepto E-1 en la categoría de impacto agotamiento de los minerales. Esto se debe a que en análisis del inventario (Tabla 4) se consideraron cero las entradas de agua y

electricidad al sistema en el escenario base pues se consideró desechar la gallinaza directamente al suelo sin tratamientos ni higienización. Esto en la categoría de agotamiento de minerales puede considerarse como impacto positivo, sin embargo, el resto de las categorías arrojó al escenario base como el más perjudicial debido a su negativo impacto ambiental.

Por otro lado, se obtuvo que, de las cinco categorías de impacto evaluadas, E-3 presentó el mejor desempeño ambiental en tres de ellas (ecotoxicidad del agua dulce, toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre, debido fundamentalmente a las menores emisiones de metales pesados. En la categoría de impacto toxicidad marina, el mejor desempeño ambiental lo tiene E-2, asociado al menor consumo de electricidad y a las menores emisiones de metales pesados (zinc, níquel y mercurio fundamentalmente). Con respecto al agotamiento de los minerales, E-1 presenta los mejores resultados debido a una mayor consideración de fertilizantes minerales sintéticos evitados (producto evitado) comparados con los demás escenarios. Sin embargo, los escenarios E-2 y E-3 también obtienen productos con nutrientes que pudieran sustituir fertilizantes (digestato e hidrochar), aunque en menor concentración debido a la volatilización del nitrógeno durante el proceso. Aun así, estos productos tienen una mejor esterilización y mineralización de los macro y micronutrientes lo que provoca una mejor asimilación por el suelo y los cultivos. En este sentido, el escenario E-3 presenta ventajas sobre E-2 y E-1 pues devuelve al medio ambiente el hidrochar que debido a las altas temperaturas con que se obtiene está más estéril que el digestato y este su vez es mejor que la gallinaza sin tratar. Aunque E-1 presente mayor concentración de nutrientes tiene además patógenos, parásitos, restos de antibióticos, pesticidas que impiden su utilización como abono orgánico sin un tratamiento adecuado. Además, la acumulación de gallinaza en determinados espacios provoca la sobresaturación de nutrientes que los hacen perjudiciales para los suelos.

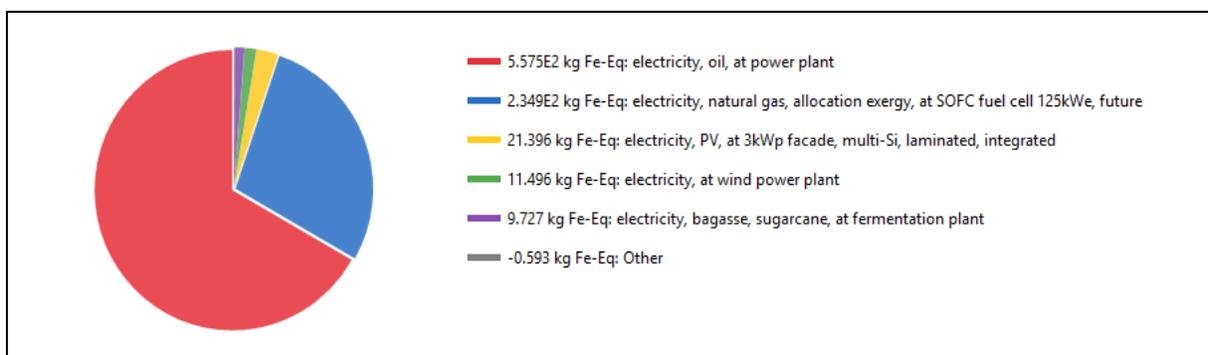


Figura 8. Contribución de impactos, categoría de impacto agotamiento de los minerales (E-3).

En cuanto a la categoría de impacto agotamiento de los minerales, los flujos que mayor impacto presentan son los referidos a la matriz energética cubana (Fig. 8), dominados fundamentalmente por la generación de electricidad a partir de fuel oil. En este caso, al considerar la sustitución de fertilizante sintético por biofertilizante a base N, P y K, impacta de forma beneficiosa en el perfil ambiental.

Estos resultados estuvieron en concordancia con lo obtenido por (Medina-martos et al., 2020), donde establecen que la integración del HTC con AD (E-3) representa una oportunidad para mejorar el rendimiento de energía y nutrientes cuando se compara con el proceso solo de DA (E-2) y con el escenario base (gallinaza sin tratamiento, E-1). Por tanto, esta estrategia muestra un mejor impacto de análisis de ciclo de vida. Sin embargo, estos resultados dependen estrechamente de la valorización de los productos finales. Tal es el caso del hidrochar que puede ser utilizado como sustituyente de combustibles fósiles, como purificación de aguas residuales debido a sus propiedades adsorbentes o a su empleo en biorefinerías para la extracción de compuestos químicos altamente cotizados como el furfural. De lo contrario el escenario E-3 fuera la alternativa menos sostenible debido al alto consumo de corriente eléctrica. Es por ello que se debe continuar las investigaciones sobre la integración de HTC y DA para hacer que este esquema de tratamiento tecnológico para la valorización de la gallinaza sea sostenible.

3.3 Beneficios del Escenario E-3 Integración de HTC y AD

Beneficios ecológicos:

- Elevación de la eficiencia de tratamiento de la gallinaza, contribuyendo a la disminución de carga contaminante vertida.
- Sustitución de leña, por gas, que previene en gran medida la destrucción de los bosques. Se ha calculado que 1m³ de biogás o biocombustible utilizado para cocinar evita la deforestación de 0,335 ha de bosques con un promedio de 10 años de vida de los árboles.
- Disminuye la emisión a la atmósfera de Dióxido de Carbono (CO₂) y Metano (CH₄), gases causantes de efecto invernadero, por no usar combustibles fósiles y leña.
- La gallinaza que genera de forma natural los gases metano y monóxido de nitrógeno, cuyo efecto invernadero es respectivamente 20 y 320 veces mayor que el del CO₂ y que se vaporan a la atmósfera, son recogidos y reciclados en los biodigestores.
- Mejora los suelos afectados con aplicación de bioabono.
- Mejora las condiciones higiénico-sanitarias del medio circunlante.

Beneficios económicos:

- Ahorro por concepto de tala y transportación de leña.
- Ahorro por concepto de salarios para la tala y transportación de leña.
- Obtención de ton/año de bioabono de alta calidad, que sustituye los fertilizantes químicos.
- Mejora de la calidad y aumento de rendimientos agrícolas (Productos ecológicos)
- Aumento de la disponibilidad y calidad de alimentos (plantas acuáticas y lombrices) a ofertar a los animales.

Beneficios sociales:

- Ahorro de portadores energéticos con la construcción de fuentes de energía renovables, que benefician a comedores obreros, etc.

- Capacitación de obreros, técnicos, profesionales y dirigentes del país en la construcción, puesta en marcha y explotación de las plantas de biogás y reactores de tratamiento hidrotérmico durante su ejecución.
- Mejora la calidad de vida de los usuarios a partir de la disponibilidad de una fuente energética, que sustituye el uso de leña y keroseno.
- Mejora de la calidad de vida de la comunidad producto a la eliminación de los malos olores, insectos y parásitos que genera la gallinaza en descomposición.
- Humanización del trabajo de las mujeres, que elaboran los alimentos.

Los resultados alcanzados pueden orientar a los responsables de toma de decisiones sobre los beneficios de la implementación de este sistema tecnológico como una de las variantes para el tratamiento de la gallinaza en el territorio de la provincia de Sancti Spíritus y en el país.

CONCLUSIONES

1. El marco teórico referencial de la investigación permitió evidenciar la necesidad de un uso sostenible de los residuos avícolas, además se profundizó sobre sus tratamientos a nivel mundial como biomasa energética, siendo los métodos bioquímicos y termoquímicos los más empleados. Para la evaluación ambiental de estos métodos una herramienta valiosa es el Análisis de Ciclo de Vida.
2. Como resultado del diagnóstico inicial de la granja “La Botella” se evidenció que el aire es la categoría medioambiental que más se afecta al no disponer un tratamiento para la gallinaza, además se detectaron un grupo de deficiencias (cocina con leña, malos olores, no autonomía energética, no aprovechamiento de nutrientes) que se pudieran transformar en oportunidades de existir un adecuado tratamiento para todos los residuos de esta entidad.
3. El escenario E-3 (combinación de carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia) fue el de mejor impacto ambiental, éste permite el aprovechamiento de los residuos para la obtención de energía, nutrientes y productos de valor agregado. Con este resultado se pudiera orientar a los responsables de toma de decisiones sobre los beneficios de la implementación de este sistema tecnológico para el tratamiento de la gallinaza en Sancti Spíritus. La aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida proporcionó una valiosa herramienta de evaluación del desempeño ambiental de los diferentes escenarios propuestos.

Recomendaciones

1. Se recomienda presentar la investigación a tomadores de decisiones del sector agrícola para que valoren la posibilidad de emplear el escenario E3 (Combinación de la carbonización hidrotérmica y digestión anaerobia) como tratamiento de sus residuales además de la obtención de energía y nutrientes.
2. Se recomienda ampliar los límites del sistema en el Análisis de Ciclo de Vida para hacer el proceso de tratamiento de la gallinaza más sostenible.
3. Se recomienda realizar el análisis económico sobre los diferentes escenarios propuestos, de esta forma se complementa el análisis de impacto ambiental y se puede establecer la mejor alternativa.

BIBLIOGRAFÍA

- Abelha, P., Gulyurtlu, I., Boavida, D., Barros, J. S., Cabrita, I., Leahy, J., Kelleher, B., & Leahy, M. (2003). Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor. *Fuel*, 82(6), 687-692. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00317-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00317-4)
- Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Engineering Journal*, 73, 1-21.
- Baral, K. R., Arthur, E., Olesen, J. E., & Petersen, S. O. (2016). Predicting nitrous oxide emissions from manure properties and soil moisture: An incubation experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 97, 112-120.
- Billen, P., Costa, J., Van der Aa, L., Van Caneghem, J., & Vandecasteele, C. (2015). Electricity from poultry manure: A cleaner alternative to direct land application. *Journal of Cleaner Production*, 96, 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.016>
- Chaump, K., Preisser, M., Shanmugam, S. R., Prasad, R., Adhikari, S., & Higgins, B. T. (2019). Leaching and anaerobic digestion of poultry litter for biogas production and nutrient transformation. *Waste Management*, 84, 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.024>

- Davidson, E. A., & Kanter, D. (2014). Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environmental Research Letters*, 9, 105012.
- de Graaff, L., Odegard, I., & Nusselder, S. (2017). LCA of thermal conversion of poultry litter at BMC Moerdijk. *Delft, CE Delft*, 1-128.
- Dennehy, C., Lawlor, P. G., Jiang, Y., Gardiner, G. E., Xie, S., Nghiem, L. D., & Zhan, X. (2017). Greenhouse gas emissions from different pig manure management techniques: A critical analysis. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0942-6>
- Díaz Peña, M., Clavijo Cabanes, D., Álvarez Rodríguez, O., Reina, D., & Reyes, R. (2013). Aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida para la mejora ambiental en áreas de incidencia de la producción porcina en Cienfuegos, Cuba. *ECOVIDA*, 4(2), 113-119.
- Fatih Demirbas, M. (2009). Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy*, 86, S151-S161.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.043>
- Forster-Carneiro, T., Berni, M. D., Dorileo, I. L., & Rostagno, M. A. (2013). Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 77, 78-88.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.007>
- Gerber, P., Opio, C., & Steinfeld, H. (2007). Poultry production and the environment—A review. *Animal production and health division, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Viale delle Terme di Caracalla*, 153, 27.

-
- Ghatak, H. R. (2011). Biorefineries from the perspective of sustainability: Feedstocks, products, and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4042-4052. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.034>
- Gollakota, A. R. K., Kishore, N., & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378-1392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>
- Kang, S., Li, X., Fan, J., & Chang, J. (2013). Hydrothermal conversion of lignin: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 546-558. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.013>
- Kannan, S., Burelle, I., Orsat, V., & Raghavan, G. S. V. (2020). Characterization of Bio-crude Liquor and Bio-oil Produced by Hydrothermal Carbonization of Seafood Waste. *Waste and Biomass Valorization*, 11(7), 3553-3565. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00704-y>
- Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., O'Dwyer, T. F., Sutton, D., & Leahy, M. J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 27-36. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-X)
- Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21-50. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.012>
- Lynch, D., Henihan, A. M., Bowen, B., Lynch, D., McDonnell, K., Kwapinski, W., & Leahy, J. J. (2013). Utilisation of poultry litter as an energy feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 49, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.009>

- Ma, J., & You, F. (2019). Superstructure optimization of thermal conversion based poultry litter valorization process. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1111-1121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.346>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Medina-Martos, E., Istrate, I.-R., Villamil, J. A., Galvez-Martos, J.-L., Dufour, J., & Mohedano, A. F. (2020). Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. *Journal of Cleaner Production*, 277(122930), 1-13.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., & Mendoza, B. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. *Climate change*, 423.
- Nielsen, M., Nielsen, O.-K., Thomsen, M., Aarhus Univ, & National Environmental Research Institute, D. of P. A. (DK). (2010). *Emissions from decentralised CHP plants 2007—Energinet.dk Environmental project no. 07*.
- Ortiz, A., Elías, A., & Valdivié, M. (2009). Utilización de diferentes fuentes de pollinaza como complemento alimenticio en la ceba de ovinos en pastoreo. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 43(3), 244-249.
- Ortiz, A., Elías, A., Valdivié, M., & Gonzalez, R. (2006). Camas avícolas, una forma de incrementar el valor nutritivo de materiales muy fibrosos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(1), 59-64.
- Owsianiak, M., Ryberg, M. W., Renz, M., Hitzl, M., & Hauschild, M. Z. (2016). Environmental Performance of Hydrothermal Carbonization of Four Wet

Biomass Waste Streams at Industry-Relevant Scales. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(12), 6783-6791.

<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01732>

Pagés-Díaz, J., & Huiliñir, C. (2020). Valorization of the liquid fraction of co-hydrothermal carbonization of mixed biomass by anaerobic digestion: Effect of the substrate to inoculum ratio and hydrochar addition. *Bioresource Technology*, 317(123989), 1-9.

Posmanik, R., Labatut, R. A., Kim, A. H., Usack, J. G., Tester, J. W., & Angenent, L. T. (2017). Coupling hydrothermal liquefaction and anaerobic digestion for energy valorization from model biomass feedstocks. *Bioresource Technology*, 233, 134-143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.095>

Santos Dalólio, F., Nogueira da Silva, J., Teixeira Albino, L. F., Moreira, J., & Barreto Mendes, L. (2015). Air pollution and their mitigation measures in Brazilian poultry production. *African Journal of Agricultural Research*, 10(50), 4522-4531. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10356>

Sharma, R., Jasrotia, K., Singh, N., Ghosh, P., Srivastava, S., Sharma, N. R., Singh, J., Kanwar, R., & Kumar, A. (2020). A Comprehensive Review on Hydrothermal Carbonization of Biomass and its Applications. *Chemistry Africa*, 3(1), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42250-019-00098-3>

Suárez-Hernández, J., Sosa-Cáceres, R., Martínez-Labrada, Y., Curbelo-Alonso, A., Figueredo-Rodríguez, T., & Cepero-Casas, L. (2018). Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 41(2), 2078-8452.

Van Doren, L. G., Posmanik, R., Bicalho, F. A., Tester, J. W., & Sills, D. L. (2017).

Prospects for energy recovery during hydrothermal and biological processing of waste biomass. *Bioresource technology*, 225, 67–74.

Vardon, D. R., Sharma, B. K., Scott, J., Yu, G., Wang, Z., Schideman, L., Zhang, Y.,

& Strathmann, T. J. (2011). Chemical properties of biocrude oil from the hydrothermal liquefaction of *Spirulina* algae, swine manure, and digested anaerobic sludge. *Bioresource Technology*, 102(17), 8295-8303.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.041>

Villamil, J. A., Mohedano, A. F., Rodriguez, J. J., & de la Rubia, A. (2020).

Valorisation of the liquid fraction from hydrothermal carbonisation of sewage sludge by anaerobic digestion. *Chemical Engineering*, 2, 1-21.

Zhu, J., Wu, S., & Shen, J. (2019). Anaerobic co-digestion of poultry litter and wheat

straw affected by solids composition, free ammonia and carbon/nitrogen ratio.

Journal of Environmental Science and Health, Part A, 54(3), 231-237.

<https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1546494>

ANEXO 1: Matriz de las valoraciones de los expertos.

No. Expertos	Causas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	Rj
1	Contaminación del agua	4	7						
2	Afectación de la población vegetal	5	2						
3	Contaminación del aire	7	5						
4	Salud del hombre	3	4						
5	Afectación de la fauna	1	3						
6	Contaminación y erosión de suelos	6	6						
7	Afectaciones en el desarrollo local	2	1						
Total		28							

Cada experto debe llenar la columna **E** (expertos) dándole puntuación del 1 al 7 (siendo 1 la mínima puntuación y máxima el 7) de las causas que consideran que más impacta la gallinaza en el medio ambiente. Cada número debe corresponder con una categoría de forma tal que la suma de sus puntuaciones no puede exceder los 28 puntos. **Vea como ejemplo la columna E1.**