



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“Modelación matemática del proceso térmico-
alcalino de inactivación de Huevos de Helminthos
presentes en residuos agroindustriales de origen
porcino”.

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

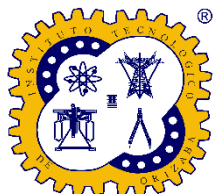
I.Q. Roger Emmanuel Sales Pérez

DIRECTOR DE TESIS:

*Dr. Juan Manuel Méndez
Contreras*

CO-DIRECTOR DE TESIS:

*Dr. Alejandro Alvarado
Lassman*



Orizaba, Veracruz, 09/septiembre/2022

Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación

Asunto: Autorización de Impresión

OPCION: I

C. ROGER EMMANUEL SALES PÉREZ

Candidato a Grado de Maestro en:

CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

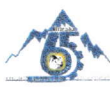
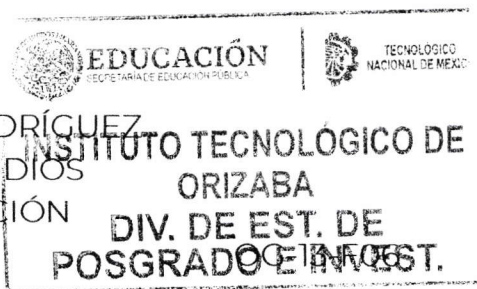
"Modelación matemática del proceso térmico - alcalino de inactivación de Huevos de Helmintos presentes en residuos agroindustriales de origen porcino".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Dr. MARIO LEONCIO ARRIJOA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN





Orizaba, Veracruz, **19/agosto/2022**
Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRÍGUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (Ia) C.

ROGER EMMANUEL SALES PÉREZ

La cual lleva el título de:

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO TÉRMICO-ALCALINO DE INACTIVACIÓN
DE HUEVOS DE HELMINTOS PRESENTES EN RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE
ORIGEN PORCINO.**

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ CONTRERAS

FIRMA

SECRETARIO: DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

FIRMA

VOCAL: MIQ. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTÚ

FIRMA

VOCAL SUP.: DR. ERIK SAMUEL ROSAS MENDOZA

FIRMA

TA-09-18



Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 09 del mes de septiembre del año 2022.

El(la) que suscribe

C. Roger Emmanuel Sales Pérez

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 107 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada

“Modelación matemática del proceso térmico-alcalino de inactivación de Huevos de Helminthos presentes en residuos agroindustriales de origen porcino” del programa: Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección del (la) Dr. Juan Manuel Méndez Contreras y el Dr. Alejandro Alvarado Lassman y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



Roger Emmanuel Sales Pérez

Nombre y firma

DEDICATORIAS

Principalmente agradezco a Dios por la vida, por las bendiciones que ha permitido y por todo lo que me ha dado.

A mis padres, por todo el apoyo y el respaldo que me han brindado en todo momento, por esforzarse en ser el mejor ejemplo para mí y mis hermanos, por todas las correcciones y enseñanzas que, a pesar de mi necedad, no se han cansado de darme.

A mis hermanos, por ayudarme y acompañarme en los buenos y malos momentos, por soportar mi mal carácter y reírse de mis ridiculeces, sin duda estoy muy feliz con la familia que me ha tocado.

A Fernanda Amyneh por todo el cariño, las atenciones y el apoyo incondicional que me ha brindado a lo largo de una de las mejores etapas de mi vida.

A mis compañeros y queridos amigos: Diana, Mimi, Joaquín, Mandy, Mercedes, Mariela, Zaira, Karen, Rafael, Daniel, José Manuel y más buenas amistades que he hecho durante este proceso, que me han apoyado y enseñado mucho. Gracias por los buenos momentos y por estar ahí a pesar de todo.

A mis queridos amigos: Trujillo, Isaac, Gerardo, Samuel, Arlette, Cristopher, Alejandro... gracias por estar para mí en tan importante y bonita etapa de mi vida.

A todos aquellos que me han apoyado y han dejado un nuevo aprendizaje a lo largo de mi vida, gracias por todo lo que me han hecho crecer académicamente y como ser humano.

RECONOCIMIENTOS

Al Dr. Juan Manuel Méndez Contreras, por la confianza y el apoyo que me ha brindado en el desarrollo de esta investigación. Además, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo.

Al Dr. Alejandro Alvarado Lassman, por sus aportes y observaciones durante la realización de esta investigación.

A la M.C. María Elena García Reyes, por el apoyo y la orientación brindada a lo largo de esta etapa.

A la M.C. Diana Ibeth Romero Mota, por los consejos, la motivación y el apoyo incondicional brindado durante esta etapa.

Al M.C. Joaquín Estrada García, por los consejos y el apoyo brindado para la culminación de este proyecto.

A cada uno de los profesores de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química por compartir sus conocimientos y por todas sus enseñanzas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca CVU: 1077313 para la realización de este trabajo.

RESUMEN

Modelación matemática del proceso térmico-alkalino de inactivación de huevos de helmintos presentes en residuos agroindustriales de origen porcino

Elaborado por: I.Q. Roger Emmanuel Sales Pérez

Dirigido por: Dr. Juan Manuel Méndez Contreras

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

La presencia de organismos patógenos en los cerdos puede generar serios problemas ambientales y sanitarios. El ganado porcino es susceptible a ser infectado por diferentes microorganismos tales como: coliformes fecales, *Salmonella spp.*, protozoos, virus y helmintos. Los huevos de helmintos son una fuente de múltiples riesgos para la salud, asociados con el saneamiento deficiente, el uso de agua contaminada para el riego y la disposición de excrementos o lodos en el suelo. Es necesario brindar un tratamiento a los residuos porcinos, procedentes principalmente de granjas no tecnificadas, que garantice la eliminación de microorganismos patógenos y se cumpla con los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002 para que sean dispuestos adecuadamente. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue realizar la modelación matemática del proceso térmico-alkalino de la inactivación de huevos de helmintos (*Ascaris suum* y *Trichuris suis*) presentes en los residuos agroindustriales de origen porcino, obtenidos en un criadero de traspatio ubicado en el municipio de Acultzingo, Ver. El tratamiento alcalino (10, 15 y 20 % m/m CaO) y el tratamiento térmico (70, 80 y 90°C) fueron evaluados por separado para poder determinar las condiciones más apropiadas del proceso combinado. Los resultados mostraron que el tratamiento alcalino (20 % m/m CaO) tuvo una efectividad del 94.7 % en la inactivación de huevos de helmintos, mientras que para el térmico (90°C) se reportó una efectividad del 58.2 %. El tratamiento térmico-alkalino con 15 % m/m de CaO y 60°C fue capaz de eliminar el 99.42 % de huevos de helmintos y el 100 % de los demás microorganismos patógenos presentes en los residuos de origen porcino. Finalmente se obtuvo un biosólido clase B según los límites máximos permisibles establecidos en la norma.

ABSTRACT

Mathematical modeling of the thermal-alkaline process of inactivation of helminth ova present in pig agro-industrial waste

By: I.Q. Roger Emmanuel Sales Pérez

Advisors: Dr. Juan Manuel Méndez Contreras
Dr. Alejandro Alvarado Lassman

The presence of pathogenic organisms in pigs can generate serious environmental and health problems. Pigs are susceptible to being infected by some microorganisms such as fecal coliforms, *Salmonella spp.*, protozoa, viruses and helminths. Helminth ova are a source of multiple health risks, they are associated with poor sanitation, use of contaminated water for irrigation and disposal of excrement or sludge on the ground. It is necessary to treat pig waste, mainly from non-technical farms, to ensure the establishment of pathogenic microorganisms and comply with the maximum permissible limits established by the NOM-004 SEMARNAT-2002 so that they are disposed of properly. For this reason, the aim of this research was to perform the mathematical modeling of the thermal-alkaline process of the inactivation of helminth ova (*Ascaris suum* & *Trichuris suis*) present in agro-industrial waste of pig origin, obtained in a backyard hatchery located in the municipality of Acultzingo, Ver.

Alkaline (10, 15 and 20% w/w CaO) and thermal treatment (70, 80 and 90°C) were evaluated separately in order to determine the most appropriate conditions for the combined process. The results showed that the alkaline treatment (20 % w/w CaO) was 94.7 % effective in the inactivation of helminth ova, while the thermal treatment (90°C) was 58.2 % effective. The thermal-alkaline treatment with 15 % w/w CaO and 60°C was able to eliminate 99.42 % of helminth ova and 100 % of the other pathogenic microorganisms present in pig waste. Finally, a class B biosolid was obtained according to the maximum permissible limits established in the NOM-004-SEMARNAT-2002.

ÍNDICE

RESUMEN	iv
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS.....	xi
NOMENCLATURA	xiii
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	16
CAPITULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
1.1 Orígenes de la industria porcina.....	18
1.2 Producción de cerdo a nivel mundial y en México.....	19
1.2.1 Sistema tecnificado	19
1.2.2 Sistema semi-tecnificado	20
1.2.3 Sistema a pequeña escala.....	20
1.3 Residuos agroindustriales de origen porcino.....	21
1.4 Organismos patógenos presentes en los cerdos	22
1.4.1 Bacterias	22
1.4.2 Protozoos	24
1.4.3 Virus.....	25
1.4.4 Helmintos	26
1.5 Principales helmintos en los cerdos	27
1.5.1 <i>Trichuris suis</i>	27
1.5.2 <i>Ascaris Suum</i>	29
1.5.3 <i>Metastrongylus</i>	33
1.5.4 <i>Stephanurus dentatus</i>	33
1.5.5 <i>Macracanthorhynchus hirudinaceus</i>	34
1.5.6 <i>Strongyloide ransomi</i>	35
1.5.7 <i>Trichostrongylus spp</i>	36
1.6 HelminCIAS	37
1.7 Remoción e inactivación de huevos de helmintos	37
1.7.1 Lagunas de estabilización	37
1.7.2 Humedales artificiales	38

1.7.3 Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente UASB	38
1.7.4 Coagulación-Floculación	39
1.7.5 Radiación con luz UV	39
1.7.6 Oxidación electroquímica	40
1.7.7 Tratamiento térmico	40
1.7.8 Tratamiento alcalino	41
1.8 Modelación de las cinéticas de inactivación de patógenos	41
1.8.1 Modelo de Weibull.....	42
1.8.2 Modelo de Chick	42
1.8.3 Modelo de Chick-Watson	43
1.8.4 Modelo de Hom.....	43
1.8.5 Modelo de Hom modificado para tratamiento alcalino	44
1.8.6 Modelo de Hom para tratamiento térmico	45
1.9 Límites máximos permisibles de contaminantes patógenos en biosólidos.....	46
1.10 Estudios previos relacionados con la inactivación de huevos de helmintos	47
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	51
2.1 Metodología experimental	51
2.2 Obtención y acondicionamiento de los residuos porcinos	52
2.3 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los residuos porcinos.....	52
2.3.1 Determinación de pH	53
2.3.2 Determinación de Sólidos Totales.....	53
2.3.3 Determinación de Sólidos Totales Volátiles	53
2.3.4 Determinación nitrógeno total y proteínas.....	54
2.3.5 Determinación de carbohidratos	55
2.3.6 Determinación de coliformes fecales	55
2.3.7 Determinación de <i>Salmonella</i> spp.....	56
2.3.8 Determinación de Huevos de helmintos.....	56
2.4 Tratamiento alcalino con dosis de CaO variable	57
2.4.1 Determinación de las cinéticas de inactivación alcalina (Dosis CaO variable)	58
2.5 Tratamiento alcalino con dosis recomendable de CaO	59

2.5.1 Determinación de las cinéticas de inactivación alcalina (Dosis recomendable de CaO)	59
2.6 Tratamiento térmico con niveles de temperatura variables	59
2.6.1 Determinación de las cinéticas de inactivación térmica (temperatura variable)	60
2.7 Tratamiento térmico con nivel de temperatura recomendable.....	61
2.7.1 Determinación de las cinéticas de inactivación térmica (temperatura recomendable)	61
2.8 Evaluación de la calidad de los biosólidos obtenidos	61
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
3.1 Acondicionamiento de los residuos porcinos.....	64
3.2 Caracterización fisicoquímica de la muestra	64
3.3 Caracterización microbiológica de la muestra	65
3.4 Inactivación alcalina de huevos de helmintos.....	67
3.4.1 Inactivación alcalina con diferentes niveles de tiempo	70
3.4.2 Inactivación de huevos de helmintos por el factor DT	73
3.4.3 Modelación de las cinéticas de inactivación alcalina.....	74
3.5 Inactivación térmica de huevos de helmintos	76
3.5.1 Inactivación térmica con diferentes niveles de tiempo	80
3.5.2 Modelación de las cinéticas de inactivación térmica	82
3.6 Tratamiento térmico-alkalino	84
3.6.1 Caracterización de los biosólidos obtenidos	86
CONCLUSIONES.....	89
ANEXO A	93
ANEXO B	96
ANEXO C	102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág
1.1	Huevo de <i>Trichuris suis</i> 28
1.2	Ciclo de vida de la especie <i>Trichuris suis</i> 29
1.3	Huevo de <i>Ascaris suum</i> 30
1.4	Ciclo de vida de la especie <i>Ascaris suum</i> 32
1.5	Huevo de <i>Metastrongylus elongatus</i> 33
1.6	Huevo de <i>Stephanurus dentatus</i> 34
1.7	Huevo de <i>Macracanthorhynchus hirudinaceus</i> 35
1.8	Huevo de <i>Strongyloide ransomi</i> 36
1.9	Huevo de <i>Trichostrongylus spp.</i> 36
2.1	Esquema de la metodología general 51
2.2	Muestra acondicionada 52
2.3	Muestras con huevos de helmintos concentrados 57
2.4	Microscopio óptico Carl Zeiss 57
3.1	Huevos de <i>Trichuris suis</i> vistos en el microscopio 66
3.2	Huevos de <i>Trichuris suis</i> y <i>Ascaris suum</i> vistos en el microscopio 66
3.3	Cinética de inactivación alcalina de HH totales 67
3.4	Cinética de inactivación alcalina de <i>Ascaris suum</i> 68
3.5	Cinética de inactivación alcalina de <i>Trichuris suis</i> 69
3.6	Cinética de inactivación alcalina de HH totales (tiempo variable) 70
3.7	Cinética de inactivación alcalina de <i>Ascaris suum</i> (tiempo variable) 71
3.8	Cinética de inactivación alcalina de <i>Trichuris suis</i> (tiempo variable) 72
3.9	Huevos de helmintos eliminados por los diferentes factores 74
3.10	Cinética de inactivación térmica de HH totales 77

3.11	Cinética de inactivación térmica de <i>Ascaris suum</i>	78
3.12	Cinética de inactivación térmica de <i>Trichuris suis</i>	79
3.13	Cinética de inactivación térmica de HH totales (tiempo variable)	80
3.14	Cinética de inactivación térmica de <i>Ascaris suum</i> (tiempo variable)	81
3.15	Cinética de inactivación térmica de <i>Trichuris suis</i> (tiempo variable)	82
3.16	Huevo de <i>Ascaris suum</i> después del tratamiento térmico-alcálico	85
3.17	Huevo de <i>Trichuris suis</i> después del tratamiento térmico-alcálico	86

LISTA DE TABLAS

Tabla		Pág
1.1	Salmonella: Especies, subespecies, serotipos y su hábitat usual.	24
1.2	Características generales de los principales protozoos.	25
1.3	Clasificación biológica de <i>Ascaris suum</i> .	31
1.4	Límites máximos permisibles para contaminantes patógenos en biosólidos.	46
1.5	Aprovechamiento de los biosólidos respecto a su clase y tipo.	46
2.1	Parámetros de la caracterización de la muestra.	52
2.2	Diseño unifactorial con Dosis de CaO variable.	58
2.3	Diseño unifactorial con tiempos de contacto variables.	59
2.4	Diseño unifactorial con niveles de temperatura variables.	60
2.5	Diseño unifactorial con tiempos de exposición variables.	61
3.1	Caracterización fisicoquímica.	64
3.2	Caracterización microbiológica.	65
3.3	Concentración de HH con el tratamiento alcalino (CaO variable).	67
3.4	Concentración de huevos de <i>Ascaris suum</i> con el tratamiento alcalino (CaO variable).	68
3.5	Concentración de huevos de <i>Trichuris suis</i> con el tratamiento alcalino (CaO variable).	69
3.6	Concentración de huevos de helmintos con el tratamiento alcalino (tiempo variable).	70
3.7	Concentración de huevos de <i>Ascaris suum</i> con el tratamiento alcalino (tiempo variable).	71
3.8	Concentración de huevos de <i>Trichuris suis</i> con el tratamiento alcalino (tiempo variable).	72
3.9	Relación de la inactivación de HH generada por el producto DT.	73
3.10	Parámetros cinéticos de la inactivación alcalina (CaO variable).	74

3.11	Comparación de los parámetros cinéticos del producto DT e inactivación con CaO.	75
3.12	Parámetros cinéticos de la inactivación alcalina (tiempo variable).	75
3.13	Concentración de HH con el tratamiento térmico (temperatura variable).	77
3.14	Concentración de huevos de <i>Ascaris suum</i> con el tratamiento térmico (temperatura variable).	78
3.15	Concentración de huevos de <i>Trichuris suis</i> con el tratamiento térmico (temperatura variable).	79
3.16	Concentración de HH con el tratamiento térmico (tiempo variable).	80
3.17	Concentración de huevos de <i>Ascaris suum</i> con el tratamiento térmico (tiempo variable).	81
3.18	Concentración de huevos de <i>Trichuris suis</i> con el tratamiento térmico (tiempo variable).	81
3.19	Parámetros cinéticos de la inactivación térmica (temperatura variable).	83
3.20	Parámetros cinéticos de la inactivación térmica (tiempo variable).	83
3.21	Características fisicoquímicas y microbiológicas de los biosólidos obtenidos.	87

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
CaO	Óxido de Calcio	
C	Dosis de desinfectante	g (m/m)
DT	Dosis de amoníaco y temperatura	mg/L°C
G	Volumen gastado de ácido sulfúrico al 0.1 N	mL
HH	Huevos de helmintos	
HH/gST	Huevos de helmintos por gramo de Sólidos Totales	
K	Constante de velocidad de inactivación de microorganismos	h^{-1}
m	Constante de Hom	
M	Peso de la muestra	g
N	Concentración final de microorganismos	
N	Normalidad	
n	Coeficiente de dilución	
N_0	Concentración inicial de microorganismos	
N-NH ₃	Nitrógeno amoniacal	mg/L
NMP/gST	Número más probable por gramo de Sólidos Totales	
P_1	Peso del crisol a peso constante	g
P_2	Peso de la muestra antes de evaporación (sin el peso del crisol)	g
P_3	Peso del crisol a peso constante + peso del residuo seco	g
P_4	Peso del crisol a peso constante + peso de la muestra calcinada	g
pH	Potencial de hidrógenos	
ST	Sólidos Totales	%
STV	Sólidos Totales Volátiles	%
t	Tiempo	s
T	Temperatura	°C

INTRODUCCIÓN

En México, de acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), el consumo nacional de carne de ganado porcino llegó a niveles máximos al cierre de 2019, con un hato de 18.6 millones de cabezas, que representó un incremento de 4.5 % respecto de 2018 y se pronosticó que para los próximos años el consumo continuaría con el mismo ritmo de crecimiento impulsado por una mayor producción (SIAP, 2020). Esto posiciona a la producción de carne de cerdo como una de las principales actividades agroindustriales en México, mientras que el estado de Veracruz se ubica como uno de los principales productores del país con un 9 % del total nacional.

La producción intensiva de carne de cerdo ha provocado impactos severos en el ambiente por la acumulación de desechos sólidos y por la contaminación de cuerpos de agua receptores de las descargas de aguas residuales provenientes principalmente de granjas no tecnificadas, provocando problemas sanitarios y enfermedades parasitarias tales como las helmintiasis (Murillo, 2016). Por tal motivo, es importante proporcionar un tratamiento adecuado a los residuos generados por la actividad agroindustrial, específicamente la porcina. Dicho tratamiento debe asegurar la estabilización de los lodos y la inactivación de los patógenos que estos puedan contener como los helmintos.

Los helmintos son considerados una fuente de múltiples riesgos para la salud humana, los cuales son asociados con un saneamiento deficiente, uso de agua contaminada para riego, disposición inadecuada de excrementos, lodos no tratados dispuestos en el suelo, entre otras vías de contaminación (Jiménez *et al.*, 2020). Producen una variedad de enfermedades conocidas genéricamente como helmintiasis (Maya *et al.*, 2010), las cuales constituyen un importante problema de salud pública, especialmente en los países en desarrollo (OMS, 2020).

Por su alta persistencia en el medio ambiente y resistencia a los procesos de tratamiento convencionales, los huevos de helmintos (HH) son considerados estructuras biológicas más resistentes a los procesos de inactivación en el campo de la ingeniería ambiental (Jiménez *et al.*, 2020). El tratamiento térmico aplicado a los lodos, es uno de los más comunes y de mayor éxito para la inactivación de patógenos. Además, algunos estudios demuestran que, el pre y/o post tratamiento alcalino también puede ser un método apropiado para inactivar patógenos (Fubin *et al.*, 2017).

En la presente investigación se realizó la modelación matemática de las condiciones de operación de un proceso térmico-alcalino aplicado a los residuos de origen porcino con la finalidad de eliminar los microorganismos patógenos, así como los HH de las especies *Trichuris suis* y *Ascaris suum*, las cuales están constantemente presentes en los residuos agroindustriales de origen porcino.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar los parámetros cinéticos de la inactivación térmica-alkalina de huevos de helmintos presentes en residuos de origen porcino.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la calidad fisicoquímica y microbiológica del residuo agroindustrial de origen porcino.
- Estudiar el efecto de la dosis de óxido de calcio y tiempo de reacción, en la inactivación de huevos de helmintos y microorganismos patógenos.
- Evaluar el efecto de la temperatura en la inactivación de huevos de helmintos y microorganismos patógenos en residuos de origen porcino.
- Obtener los parámetros cinéticos de inactivación de huevos de helmintos y microorganismos patógenos.
- Evaluar la calidad de los biosólidos obtenidos.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPITULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Orígenes de la industria porcina

Carl Linneaus en 1758 denominó al cerdo salvaje como *Sus scrofa*, mientras los cerdos domésticos fueron nombrados inicialmente *Sus domesticus* por Johann Christian Erxleben en 1777. Años más tarde, en 1890, Rutimayer, basado en las características de los molares (M3) identifica tres tipos de cerdo prehistórico: el *Sus scrofa ferus* o cerdo salvaje, el *Sus scrofa domesticus* o cerdo doméstico y el *Sus scrofa palustris* o cerdo de la turba.

El primer foco de domesticación, se especula, ocurrió en el este de la India actual; posteriormente cerdos de este país, fueron llevados primero a China alrededor del 5000 a.C. y luego desde ahí fueron llevados a Europa en el segundo milenio de nuestra era, donde se cruzaron con los descendientes del cerdo salvaje, con lo que se realizó la fusión de las cepas europeas y asiáticas de *Sus scrofa*, las cuales conformaron la base de la mayor parte de las razas actuales.

La introducción del cerdo en América tuvo lugar en el siglo XVI con la colonización de los españoles y fue uno de los animales que mejor logró adaptarse al territorio. Los cerdos criollos provinieron de las cruas entre razas europeas y asiáticas.

La aceptación del cerdo se debe a la facilidad de domesticación y su alta fertilidad. Fue después de la Segunda Guerra Mundial que la producción de cerdos se tecnificó y los cerdos se convirtieron en un producto estandarizado que se puede obtener en instalaciones de producción masiva. La industria basa su producción en mezclas de varias razas, siendo las principales Duroc, Hampshire, Yorkshire y Landrace (Montero-López *et al.*, 2015).

1.2 Producción de cerdo a nivel mundial y en México

El incremento de la población y la mejora en el nivel de ingreso, ha estimulado el crecimiento en el consumo de carnes. La carne de cerdo es la más consumida a nivel mundial, esto a pesar de las restricciones religiosas y culturales que existen en algunos países.

Del total de la producción mundial un 75 % se obtiene en China, la Unión Europea y Estados Unidos. México es un productor mediano, que representa el 1.1 % de la producción mundial. Sin embargo, México también es el segundo mayor importador del mundo, ya que sus importaciones representan el 9 % del total del comercio internacional de este producto (OCDE, 2019).

En el 2019, México alcanzó un hato de 18.6 millones de cabezas, 4.5 % arriba de la cifra revisada en el 2018 y se esperaba que en 2020 la cifra ascendiera a 19.2 millones de cabezas. El principal comprador de la carne de porcino mexicana fue Japón, con una participación de 66.7 %, seguido de China y Estados Unidos, con 16.6 % y 8.8 %, respectivamente; mientras que el principal proveedor de la carne de cerdo importada por México, con una participación de 83.9 %, fue Estados Unidos, seguido de Canadá, con 15.9 %. Los principales estados productores de carne de cerdo en canal son: Jalisco, Sonora, Puebla, Guanajuato, Yucatán y Veracruz, quienes conjuntamente generaron alrededor de 76.5 % de la producción de carne de cerdo nacional en 2019 (SIAP, 2020).

En México la industria porcina se ramifica en tres sistemas o modos de producción los cuales son: sistema tecnificado, semi-tecnificado y artesanal o de traspatio.

1.2.1 Sistema tecnificado

La producción industrializada o tecnificada es aquella en la que se utilizan avances tecnológicos, de manejo, nutrición, sanitarios y genéticos; entre éstos se encuentra un control estricto de animales y personal así como de medidas sanitarias; instalaciones

en las que se manejan en confinamiento y pisos de rejilla en gran parte de los casos; el manejo está preestablecido por día; se utilizan registros dentro de cada área y programas de cómputo para recopilar y analizar la información obtenida dentro de la granja; se emplea la inseminación artificial como método reproductivo en el 100 % de los casos; la alimentación consiste en dietas balanceadas, concebidas para animales en diferentes estadios fisiológicos y se ofrecen en forma automatizada, además son elaboradas en la misma granja (Montero-López *et al.*, 2015).

1.2.2 Sistema semi-tecnificado

Estos sistemas tratan de reproducir algunas de las condiciones del sistema tecnificado, pero con recursos económicos limitados y sin desarrollarlos con la amplitud que se aplica en los sistemas intensivos. Las medidas sanitarias, por ejemplo, son variables; solamente en maternidad se tiene un sistema de flujo por edades; el tipo genético de los animales es diverso; el control de producción es cuestionable en muchos casos; el uso de inseminación artificial es variable, y se manejan líneas genéticas mejoradas de orígenes diversos. La alimentación consiste en una dieta balanceada que pocas veces se realiza en la propia granja, y la mayoría de las veces se compra. El alimento se les brinda de manera manual o con sistemas semi-automatizados. Este tipo de porcicultura tiene un porcentaje de distribución nacional aproximado del 20 %, aunque tiende a reducirse (Montero-López *et al.*, 2015).

1.2.3 Sistema a pequeña escala

La producción popularmente conocida como “traspatio” es aquel tipo de explotación artesanal de cerdos a pequeña escala con fines personales y comerciales. Este tipo de explotación porcina es la actividad comercial de mayor relevancia dentro de las comunidades con niveles socio-económicos bajos, ya que son una fuente importante de ingresos y además en ocasiones los animales son destinados para el autoconsumo. En este tipo de granjas las instalaciones suelen ser corrales de madera con techos de cartón, láminas o cualquier tipo de material, los pisos son de tierra y en algunas secciones de concreto. Los desechos líquidos comúnmente son recolectados en una

canaleta que desemboca fuera de la granja hacia el drenaje público y la materia fecal es recolectada manualmente para posteriormente disponer de ella, muchos productores no tienen acceso a tratamientos de excretas.

Los cerdos suelen ser alimentados con desperdicios de comida que son recolectados por el productor. En este rubro no existen planes sanitarios, no poseen medidas de bioseguridad y mucho menos se realizan programas básicos para la prevención de enfermedades, lo que lo convierte en un riesgo para la salud humana (Montero-López *et al.*, 2015).

1.3 Residuos agroindustriales de origen porcino

A nivel mundial, la producción porcina se ha incrementado en más de 3.5 veces durante los últimos 40 años. La tendencia es aumentar la cantidad de animales por granja, llegando incluso a valores de miles de cabezas. Conforme la demanda de carne de cerdo aumenta, se van generando enormes cantidades de desechos en todo el mundo, por lo que existe un incremento en la cantidad de excretas y aguas residuales. En ocasiones, los desechos de cerdos son utilizados como acondicionadores y/o fertilizantes del suelo en el que fueron generados. Sin embargo, la cría intensiva de ganado ha ocasionado graves daños al medio ambiente debido a las características que presentan estos desechos. Dentro de los daños ambientales se incluyen: riesgos sanitarios, emisiones atmosféricas, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, dispersión de olor y daños en suelos.

Se destacan los gases de efecto invernadero (metano y óxido nitroso) dentro de las emisiones atmosféricas, los cuales son resultado de la espontánea autodepuración de los residuos. El impacto negativo de los estiércoles y purines en las aguas y suelos se concentra principalmente en la dispersión de amoníaco y nitratos, por su efecto potencial en la acidificación del medio y eutrofización de aguas (Pérez-Pérez *et al.*, 2016).

1.4 Organismos patógenos presentes en los cerdos

La presencia de organismos patógenos en los cerdos, puede generar serios problemas ambientales y sanitarios. El ganado porcino es susceptible a ser infectado por microorganismos como: Coliformes fecales, *Salmonella spp.*, Protozoos, Virus y Helminetos.

1.4.1 Bacterias

Las bacterias son organismos procariotas unicelulares que pueden prosperar en diversas condiciones. El cuerpo bacteriano tiene orgánulos desprovistos de compartimientos, que sostienen el funcionamiento básico. El material nuclear no tiene límites definitivos y por lo tanto flota en el citoplasma. Existen diferentes tipos de bacterias y se clasifican en función de dos aspectos, su forma y el constituyente de la pared celular. De acuerdo con la composición de la pared celular, las bacterias se clasifican en Gram-positivas y Gram-negativas. La tinción de Gram púrpura en las paredes celulares de las bacterias representa la presencia de una sola capa de polímero de peptidoglicano, lo que explica aproximadamente el 80 % de la composición de la pared celular, el resto son grasas y lípidos. Las bacterias son el organismo modelo comúnmente estudiado para comprender el mecanismo de desinfección y evaluar la eficiencia foto catalítica del compuesto (Ganguly *et al.*, 2018).

Coliformes fecales

Las bacterias coliformes totales son microorganismos inofensivos que viven en los intestinos del ser humano y de los animales de sangre caliente, donde ayudan a los procesos digestivos. Un pequeño grupo de este tipo de bacterias se ha clasificado como coliformes fecales cuyo miembro más común es *Escherichia Coli*. Este tipo de bacterias se ha separado del grupo de coliformes totales debido a su capacidad de crecer a temperaturas elevadas y su relación con la materia fecal de animales de sangre caliente. El grupo está compuesto principalmente por bacilos gramnegativos, los cuales son esporulados, oxidasanegativos, aerobios o anaerobios facultativos, son

capaces de multiplicarse en presencia de sales biliares y son capaces de fermentar lactosa con producción de ácido y gas en 48 horas a 44°C.

Debido a que generalmente las bacterias coliformes fecales como *E. Coli*, no son patógenas, estas son utilizadas para indicar la presencia de bacterias patógenas. Dichas bacterias indicadoras siempre están presentes en el mismo tracto gastrointestinal de los organismos infectados con bacterias patógenas, pero estas últimas se encuentran en cantidades tan pequeñas que no es práctico monitorearlas directamente. Generalmente, la presencia de coliformes fecales es un indicador de contaminación (Borbolla-Vázquez *et al.*, 2018).

Salmonella Spp.

El género *Salmonella* pertenece a la familia de las Enterobacteriaceae, está integrada por bacilos Gram negativos, anaerobios facultativos, no esporulados, generalmente móviles por flagelos peritricos que utilizan citrato como única fuente de carbono y además poseen metabolismo de tipo oxidativo y fermentativo. Para su crecimiento no requieren cloruro de sodio, pero pueden crecer en concentraciones que van desde 0.4 % al 4 %. La mayoría de los serotipos de *Salmonella* crecen en un rango de temperatura que va desde 5 a 47°C, con una temperatura óptima de 35-37°C, algunas pueden llegar a crecer a 2 o 4°C, inclusive llegan a crecer hasta los 54°C. El pH de crecimiento oscila entre 4 y 9 con un óptimo de 6.5-7.5. Se desarrollan adecuadamente a una actividad acuosa (a_w) de 0.99-0.94, pueden llegar a sobrevivir en alimentos secos con un $a_w < 0.2$.

El crecimiento de estas bacterias se inhibe completamente a temperaturas inferiores a 7 °C, pH<3.8 y un $a_w < 0.94$. Se caracterizan por ser de amplia distribución, altamente patógenos y de difícil aislamiento. Como se muestra en la Tabla 1.1, actualmente, basados en la comparación del ARNr 16S, filogenéticamente *Salmonella* se clasifica en dos grupos: *Salmonella entérica*, compuesta por 6 subespecies y *Salmonella bongori*. Este sistema de clasificación es el usado por Organización mundial de la

Salud (OMS), el Centro para el Control de Enfermedades (CDC) y otras organizaciones (Gonzales-Pedraza *et al.*, 2014).

Tabla 1.1 Salmonella: Especies, subespecies, serotipos y su hábitat usual.

Especie y subespecie de Salmonella	No. de serotipos dentro de la especie	Hábitat usual
<i>S. enterica subsp. enterica (I)</i>	1531	Animales de sangre caliente
<i>S. enterica subsp. salamae (II)</i>	505	Animales de sangre fría y ambiente
<i>S. entérica subsp. arizonae (IIIa)</i>	99	Animales de sangre fría y ambiente
<i>S. enterica subsp. diarizonae (IIIb)</i>	336	Animales de sangre fría y ambiente
<i>S. enterica subsp. houtenae (IV)</i>	73	Animales de sangre fría y ambiente
<i>S. enterica subsp. indica (VI)</i>	13	Animales de sangre fría y ambiente
<i>S. bongori (V)</i>	22	Animales de sangre fría y ambiente
Total	2579	

1.4.2 Protozoos

Son organismos eucariotas, protistas unicelulares, en los que se distinguen dos formas. Una de ellas es el trofozoíto, que es la forma vegetativa (estadios de multiplicación), además, son lábiles, móviles e inducen daño. La otra forma son los ooquistes o quistes, que son las formas de resistencia (no multiplicativas), resisten condiciones adversas y están involucrados en la transmisión. Los protozoos tienen movilidad propia por medio de flagelos, cilios, seudópodos (falsos pies) o por movimientos ondulantes y deslizantes del cuerpo celular.

Las amibas son un ejemplo de protozoos. Algunas amibas intestinales pueden causar patologías, son móviles por medio de seudópodos y obtienen su alimento por fagocitosis (Musto *et al.*, 2013).

Tabla 1.2 Características generales de los principales protozoos.

Microorganismo	Enfermedad	Forma infecciosa	Principal vía de infección	Diagnóstico por el microscopio
Parásitos intestinales				
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrea	Quistes	Oro-fecal	Heces
<i>Cryptosporidium hominis</i>	Diarrea	Quistes	Oro-fecal	Heces
Parásitos urogenitales				
<i>Trichomonas vaginalis</i>	Tricomoniasis	Trofozoito	Vía sexual	Flujo uretral, vaginal
Parásitos hemáticos y tisulares				
<i>Plasmodium</i>	Paludismo	Esporozoito	Anopheles	Extensión sangre
<i>Trypanosoma cruzi</i>	Enfermedad de Chagas	Tripomastigote	Vinchuca	Extensión sangre
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis	Quiste, ooquiste	Vía oral	

1.4.3 Virus

Los virus son pequeños agentes infecciosos que solo pueden multiplicarse dentro de los organismos vivos al dirigir la maquinaria de la célula del huésped para que de esta manera se generen más. El material genético de estos microorganismos es ARN o ADN. Un virus que tiene un ARN como material genético se le denomina virus de ARN, mientras que el que tiene ADN como material genético y se replica utilizando una ADN polimerasa dependiente de ADN, se le denomina virus de ADN.

El término virión se refiere a la partícula de virus completa, que normalmente consiste en una molécula de ADN o ARN dentro de una capa de proteína y que en ocasiones está cubierta por una envoltura. Los virus que pueden infectar y replicarse dentro de las células humanas, causando enfermedades de esta manera, se les denomina virus patógenos.

Uno de los eventos críticos y que tiene relación con la aparición de nuevas enfermedades virales es el cambio genético viral, el cual permite que los virus se

establezcan en una nueva especie hospedadora, capaz de infectar a los humanos y causar una amenaza para la salud local, regional o mundial. Entre los atributos comunes de las enfermedades virales emergentes se incluyen la imprevisibilidad, la alta morbilidad y la posibilidad de una rápida propagación de enfermedades que pueden generar impactos sociales sustanciales (Artika *et al.*, 2020).

1.4.4 Helmintos

Los helmintos o gusanos, son organismos multicelulares únicos entre los agentes infecciosos de los humanos, animales y vegetales, que además son de vida libre, con formas y tamaños variados. Pueden llegar a medir desde menos de 1 mm hasta 10 m, además tienen ciclos de vida complejos y migraciones en el interior de su huésped (Musto *et al.*, 2013).

Son la fuente de riesgos para la salud asociados con el saneamiento deficiente, el uso de agua contaminada para el riego y la eliminación de excrementos o lodos en el suelo. Se transmiten a través de sus huevos y/o larvas, que a menudo comienzan su ciclo de desarrollo dentro del huésped humano. Estos organismos entran en el huésped cuando se ingieren activamente o penetran en la piel. En casos raros también pueden ser inhalados. Debido a su a su baja dosis infecciosa, su alta resistencia a los procesos de tratamiento convencionales, los huevos de helmintos se consideran las estructuras biológicas más resistentes a la inactivación en el campo de la ingeniería ambiental (Jiménez *et al.*, 2020).

El HH constituye la etapa infecciosa del parásito y se caracterizan por una fuerte membrana de protección compuesta por una cáscara lipoidea interna, una capa intermedia de quitinosa y una cáscara externa proteica (Robles *et al.*, 2020).

Clasificación

Se dividen en dos grupos (Musto *et al.*, 2013):

- Nematodos o Nematelmintos, que son gusanos largos redondeados de cuerpo cilíndrico no segmentado. De las muchas especies que existen, solo unos pocos son parásitos del ser humano. Poseen un ciclo de vida por lo común bastante sencillo, como enterobius (o lombriz intestinal), en el que simplemente los huevos expulsados por un hospedador infectan a otra persona.
- Platelminetos o gusanos planos y se subdividen en:
 - Cestodos, que son gusanos aplanados con forma de cinta. El gusano adulto consta de cabeza o escólex, cuello y cuerpo dividido en segmentos o proglótides, al conjunto de los cuales se denomina estróbilo.
 - Trematodos, que tienen forma de hoja o lámina. Tienen un ciclo de vida complejo, con varios huéspedes intermediarios.

1.5 Principales helmintos en los cerdos

1.5.1 *Trichuris suis*

Las especies de *Trichuris* son nematodos que parasitan el ciego de diferentes hospedadores. La diferencia morfológica entre las especies de *Trichuris*, radica principalmente en la longitud de la espícula (García-Sánchez *et al.*, 2019).

Los parásitos de *Trichuris suis* tienen una forma característica, pues su cuerpo está dividido en dos porciones, una anterior muy delgada y otra posterior gruesa dando la apariencia de un látigo. El nematodo adulto se localiza sobre todo en el ciego y colon. Los machos miden entre 30-40 mm de largo y las hembras entre 35-50 mm, los huevos salen con las heces al exterior y en condiciones favorables de humedad y temperatura alrededor de 18 días se forma en su interior una larva, estos huevos larvados son muy resistentes al medio ambiente (Murillo, 2016). En la Figura 1.1, se puede observar un huevo de *Trichuris suis* visto en el microscopio.

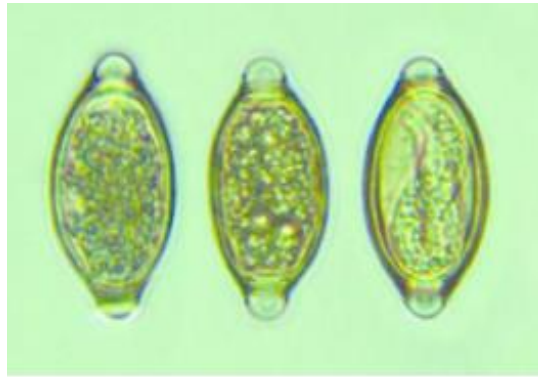


Figura 1.1 Huevo de *Trichuris suis* (Caceres, 2020).

Ciclo de vida

En la Figura 1.2, se muestra el ciclo evolutivo de la especie *Trichuris suis*, el cual comienza cuando la larva está dentro del huevo, esta etapa se ve influenciada por la temperatura. Posterior a la ingestión de los huevos por el cerdo, el desarrollo larval se produce en la mucosa del intestino, específicamente en las partes del ciego y el colon. Los huevos eclosionan en la región distal del intestino delgado y en todo el intestino grueso. A través de las criptas de Lieberkühn, las larvas penetran la mucosa del ciego y colon, donde entran en las células que recubren las criptas. La fase histotrófica subsiguiente dura 13 días, periodo durante el cual se da una migración gradual de las larvas a partir de las regiones más profundas de la lámina propia, a zonas debajo de la superficie del epitelio de la mucosa intestinal. El desarrollo luminal es visto durante el día 16, cuando se observan las extremidades posteriores de las larvas en el lumen del intestino, a partir del día 20 toda la región posterior del cuerpo de la larva está expuesta, mientras que la región filamentosa del parásito se mantiene incrustada en la superficie de la mucosa. La etapa de infección parasitaria en la cual se presenta la sintomatología dura del día 41 al 47 (Amador, 2018).

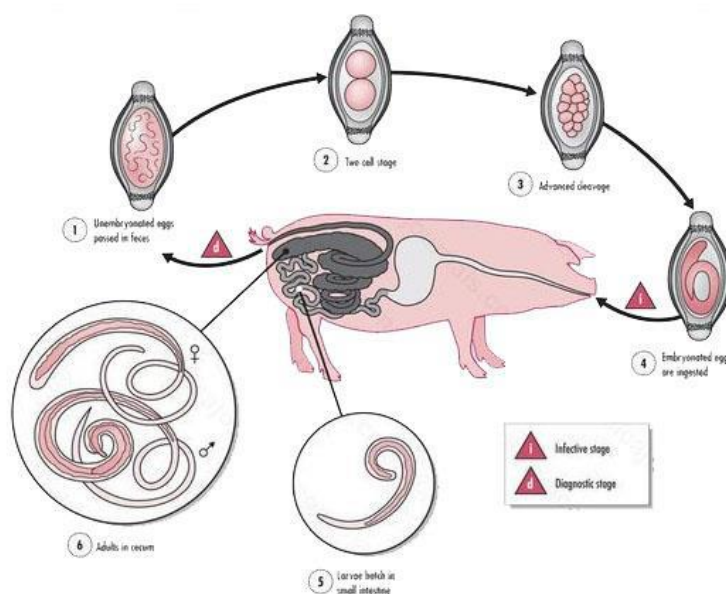


Figura 1.2 Ciclo de vida de la especie *Trichuris suis* (Amador, 2018).

Signos clínicos en el cerdo

La carga parasitaria de *Trichuris suis* influye en la sintomatología del animal, en cargas leves el animal suele ser asintomático, pero con una población elevada de vermes puede presentar anemia 42 días post-infección, diarrea a los 21 días post-infección, deshidratación, anorexia y emaciación, los síntomas suelen ser más agresivos en animales jóvenes (Pittman *et al.*, 2010).

1.5.2 *Ascaris Suum*

Es un nematodo que está distribuido globalmente, comúnmente infecta a los cerdos a través de la ruta fecal-oral. Las larvas migran desde el intestino, regresan a través del hígado y pulmones, a menudo causando daños en estos órganos. En el hígado las lesiones características son causadas por la respuesta inflamatoria a las larvas, las manchas blancas hepáticas son una de las principales razones del rechazo del hígado en el momento del sacrificio (Lassen *et al.*, 2017).

Las infecciones por áscaris son asociadas con pérdidas de producción debido a la absorción deficiente de nutrientes y la reducción en la ganancia de peso. Una sola

hembra de *Ascaris Suum* puede producir cerca de dos millones de huevos por día y aunque la gran mayoría de los huevos mueren rápidamente al aire libre, el potencial de contaminación ambiental sigue siendo muy alto. El problema se agrava debido a que los huevos que sobreviven pueden permanecer viables en el medio ambiente al menos durante 9 años (Katakam *et al.*, 2016).

Morfología

Los parásitos de *Ascaris suum* en comparación a otros nematodos son más robustos y grandes, la hembra puede medir de 20 a 40 cm de largo por 5 a 6 mm de ancho y el macho entre los 15 a 25 cm de largo por 3 a 4 mm de ancho, en su extremo anterior posee tres labios característicos, un labio dorsal con dos papilas dobles y dos labios laterales cada uno con doble papila ventral y lateral.

Los huevos fertilizados son anchos y ovoides, con una cápsula gruesa y transparente, constituida por una membrana vitelina interna, relativamente impermeable y de naturaleza lipoidea, la cual no se encuentra en los huevos infértiles; una capa media transparente y gruesa y una capa externa mamelonada albuminoide, generalmente teñida de un color café dorado. En la Figura 1.3 se muestra un huevo de *Ascaris suum* los cuales miden 60-75 μm por 50-55 μm en su diámetro menor y cuando son esféricos tienen alrededor de 60 μm de diámetro (Caceres, 2020).

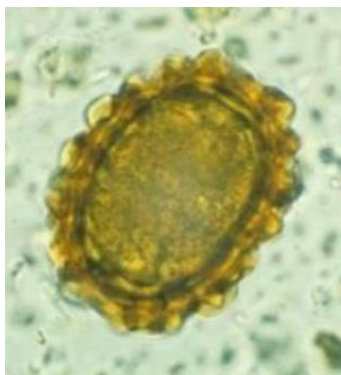


Figura 1.3 Huevo de *Ascaris suum* (Murillo, 2016).

Ascaris suum y *Ascaris lumbricoides* son morfológicamente indistinguibles, salvo por la presencia de dentículos en los bordes orales de los labios del primero; los cromosomas son idénticos y la gametogénesis muy similar.

Clasificación

En la Tabla 1.3 se puede observar la clasificación de *Ascaris suum*.

Tabla 1.3 Clasificación biológica de *Ascaris suum* (Basualdo, 2006).

Reino	Animalia
Phylum	Nematoda
Clase	Phasmidea
Orden	Ascaridida
Familia	Ascarididae
Género	Ascaris
Especie	Suum

Ciclo de vida

En la Figura 1.4 se puede observar el ciclo evolutivo de la especie *Ascaris suum*. El ciclo comienza cuando las hembras depositan los huevos no segmentados en el intestino delgado los cuales posteriormente salen por medio de las heces (A-B) y se dispersan en el exterior. Una hembra puede depositar aproximadamente 200,000 huevos diarios. Éstos son muy resistentes a diversos factores ambientales como la falta de humedad, la congelación o inclusive son resistentes al contacto con productos químicos del tipo de los cresoles y fenoles.

Esta bionomía hace posible que tengan una viabilidad de hasta 5 años o incluso más. No obstante, el calor y la desecación, tal como ocurre en suelos arenosos, los destruyen en pocas semanas.

Los huevos que fueron expulsados generalmente contienen larvas (C), las cuales emergen cuando los huevos eclosionan (D), así la infección del cerdo se realiza tras

la ingestión de huevos infectantes o larvas en combinación con los alimentos (E), o a partir de contaminantes epiteliales que las madres infieren en los lechones.

Tras la ingestión, los huevos eclosionan en el intestino del cerdo (F), necesitando al menos 4 estímulos para su apertura: temperatura corporal óptima, nivel de anhídrido carbónico de aproximadamente 5 volúmenes/litro, pH aproximadamente de 6 y condiciones reductoras no específicas, tales como las proporcionadas por la cisteína, glutatión, bisulfato sódico o anhídrido sulfuroso. Los huevos atraviesan la pared del ciego y la parte superior del intestino grueso para así seguir una migración tisular. La mayoría alcanzan la vía sistema porta-hepático, el hígado (G), llegan a los ganglios mesentéricos y otras pueden encontrarse ectópicamente en la cavidad peritoneal u otras localizaciones. Consiguientemente pasan a la vía sanguínea, al corazón para alcanzar el tejido pulmonar (H) en 5 o 6 días más, tras una segunda muda se transforman en estado larvario. Dichas larvas atraviesan los capilares sanguíneos y migran lentamente desde los alveolos a los bronquiolos, bronquios y finalmente a la tráquea, teniendo el pico de esta migración a los 12 días después de la infección (I). En esta ubicación mudan al estado adulto al mes de ser ingeridas y el periodo prepatente dura aproximadamente de 6 a 8 semanas, caracterizándose por su longevidad ya que pueden vivir más de un año (Amador, 2018).

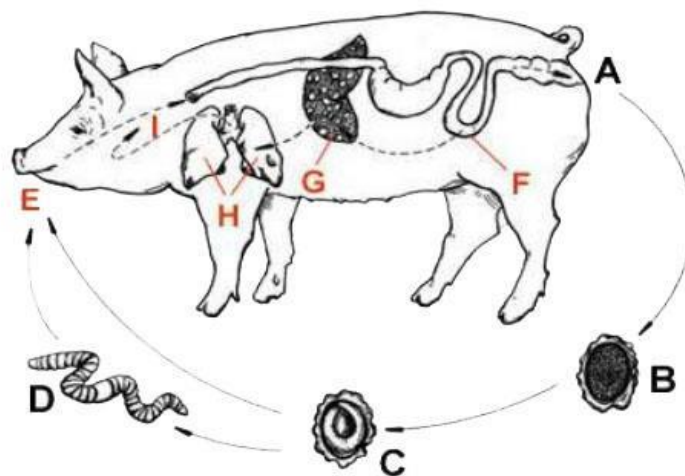


Figura 1.4. Ciclo de vida de la especie *Ascaris suum* (Amador, 2018).

1.5.3 *Metastrongylus*

Las especies de *Metastrongylus* son nematodos parásitos del tracto respiratorio de los cerdos con ciclos de vida indirectos en varias especies de lombrices de tierra. Estos helmintos ampliamente distribuidos, son particularmente frecuentes y abundantes en cerdos jóvenes, aunque la inmunidad adquirida generalmente se desarrolla en adultos. La infección por esta especie de parásitos esta siempre presente en las poblaciones de cerdos salvajes y en los cerdos domésticos de cría extensiva.

Metastrongylus spp. provoca disnea y pérdida progresiva de peso, debido a la destrucción de los tejidos intersticiales, obstrucción y finalmente consolidación de los pulmones, siendo los animales que presentan una inmunodepresión moderada o grave más susceptibles a impactos negativos en la salud. Se han descrito seis especies de *Metastrongylus*: *Metastrongylus apri* (también llamado *Metastrongylus elongatus*), *Metastrongylus salmi*, *Metastrongylus pudendotectus*, *Metastrongylus confusus*, *Metastrongylus asymmetricus* y *Metastrongylus madagascariensis* (Gassó et al., 2014). En la Figura 1.5 se puede observar la imagen de un huevo de *Metastrongylus elongatus*.



Figura 1.5 Huevo de *Metastrongylus elongatus* (Murillo, 2016).

1.5.4 *Stephanurus dentatus*

Los *Stephanurus dentatus* son nematodos conocidos como gusano del riñón del cerdo, los cuales causan la estefanurosos que es una enfermedad parasitaria de gran importancia que se distribuye ampliamente en los suidos doméstico y salvajes.

Los nematodos adultos se localizan en quistes y lesiones granulomatosas nodulares en la grasa perirrenal, uréteres y riñón. Los signos clínicos son raros, pero se ha demostrado que los cerdos con alta intensidad de parásitos pueden sufrir daños debido a la destrucción del tejido funcional del riñón. Esto puede llevar a la retención de desechos metabólicos, lo que resulta en falta de apetito y, por tanto, pérdida de peso y debilidad en el animal infectado.

Este nematodo ha sido encontrado principalmente en países tropicales y subtropicales, y es particularmente común en cerdos criados en sistemas tradicionales de producción al aire libre (Fernández- Vizcaíno *et al.*, 2021). En la Figura 1.6 se muestra la imagen de un huevo de *Stephanurus dentatus*.



Figura 1.6 Huevo de *Stephanurus dentatus* (Murillo, 2016).

1.5.5 *Macracanthorhynchus hirudinaceus*

Es considerada la especie acantocéfalo más grande, con una longitud de 7 a 14 cm y una anchura de 3 a 3.7 cm en los machos, las hembras alcanzan una longitud de 11 a 40 cm y un ancho de 3 a 5 cm, en estado fresco son de color blanco lechoso o rojizas. Los principales hospedadores de esta especie son los cerdos domésticos y jabalíes, los cuales son albergados en el tracto intestinal del hospedador.

El hospedador definitivo se infecta por vía oral mediante la captación de escarabajos infectados los cuales sirven como huésped intermediario. Los carnívoros y primates, incluidos los humanos, pueden representar huéspedes definitivos accidentalmente.

En los cerdos el periodo de incubación es de 8 a 12 semanas, seguido de un curso asintomático subclínico o de síntomas inespecíficos como enteritis, peritonitis, diarrea, desnutrición y dolor abdominal (Migliore *et al.*, 2021). En la Figura 1.7 se puede observar la imagen de un huevo de *Macracanthorhynchus hirudinaceus*.



Figura 1.7 Huevo de *Macracanthorhynchus hirudinaceus* (Amador, 2018).

1.5.6 *Strongyloide ransomi*

Son nematodos que parasitan el sistema digestivo de los cerdos, generalmente en regiones cálidas. Los adultos son pequeños y filiformes, no superan los 6 mm de longitud. Este género de gusanos se caracteriza por tener un largo esófago. La hembra que parasita en el intestino (hembra de vida parasitaria) mide de 3.3 a 4.5 mm de largo, pone huevos que salen al exterior a través de las heces y en condiciones adecuadas de humedad y temperatura eclosionan a las 6 horas.

En la Figura 1.8 se puede observar la imagen de un huevo de *Strongyloide ransomi* los cuales miden de entre 25 a 50 µm y cuando abandonan al hospedador a través de las heces, cada uno contiene una larva completamente desarrollada (Amador, 2018).



Figura 1.8 Huevo de *Strongyloide ransomi* (Caceres, 2020).

1.5.7 *Trichostrongylus spp*

Son nematodos que se alojan en el estómago de los cerdos y que comúnmente causan gastroenteritis parasitaria. La especie de *Trichostrongylus axei* son los miembros más pequeños de la familia *Trichostrongylidae*. Los gusanos adultos no tienen partes bucales características, no tienen dientes o placas de corte, además de que no superan los 6 mm de longitud. Los adultos sexualmente activos son de vida libre, de menor talla y muestran una morfología ligeramente distinta de las hembras partenogenéticas. En la Figura 1.9 se observa la imagen de un huevo de *Trichostrongylus* que son muy similares a los de anquilostoma, pero son más grande con los extremos más puntiagudos, miden de 73 a 95 micrómetros de largo y de 40 a 50 micrómetros de ancho (Murillo, 2016).



Figura 1.9 Huevo de *Trichostrongylus spp* (Murillo, 2016).

1.6 Helmintiasis

Los helmintos causan un conjunto de enfermedades llamadas helmintiasis que se denominan específicamente por los géneros involucrados, por ejemplo, Ascariasis para *Ascaris*. Los síntomas incluyen deterioro de los intestinos, efectos tóxicos, pérdida de sangre, diarrea, desnutrición y anemia. Algunos helmintos carcomen la pared intestinal provocando hemorragias mientras simultáneamente secretan compuestos que previenen la coagulación de la sangre. El daño causado por la inflamación y los canales que abren, resultan en tumores y excrecencias. Además, los helmintos pueden bloquear los conductos o causar obstrucción intestinal, dando lugar a peritonitis (Jiménez *et al.*, 2020).

Las helmintiasis transmitidas por el suelo son una de las parasitosis más comunes en todo el mundo y afectan a las comunidades más pobres y desfavorecidas. A nivel mundial, aproximadamente 1500 millones de personas sufren infecciones por helmintos transmitidos por el suelo, las helmintiasis están ampliamente distribuidas por las zonas tropicales y subtropicales, especialmente en África subsahariana, América, China y Asia oriental (OMS, 2020).

1.7 Remoción e inactivación de huevos de helmintos

Los HH poseen membranas que funcionan como barreras protectoras frente a las variaciones de las condiciones ambientales, proporcionando una mayor resistencia a la inactivación. Cada especie de helmintos posee membranas con diferentes características por lo cual requieren diferentes tratamientos (Pompeo *et al.*, 2016).

1.7.1 Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización de residuos, son grandes estanques con poca profundidad que utilizan procesos físicos y biológicos para eliminar materiales orgánicos, contaminantes y patógenos presentes en las aguas residuales sin tratar. Son uno de los métodos más simples para el tratamiento de aguas residuales y se emplean ampliamente en todo el mundo, particularmente en países en desarrollo

donde normalmente hay suficiente tierra disponible y el clima es más favorable (alta temperatura y luz solar) para su operación. Sin embargo, aunque este tratamiento se considera eficaz para producir agua reciclada de alta calidad, no asegura la inactivación total o remoción de algunos patógenos o microcontaminantes orgánicos (Gruchlik *et al.*, 2018).

1.7.2 Humedales artificiales

Los sistemas de humedales reducen o eliminan los contaminantes, incluida la materia orgánica e inorgánica, las trazas orgánicas y los patógenos contenidos en el agua. Los procesos de tratamiento se realizan a través de complejos diseñados y construidos artificialmente, los cuales están compuestos por sustrato, plantas, microbios y cuerpos de agua, así como las tres sinergias que establece la interacción del sustrato, hidrófitos y microbios en el ecosistema.

Los humedales artificiales se están convirtiendo en una opción cada vez más popular para el tratamiento de aguas residuales, debido a su bajo costo de operación, consumo de energía e impacto ambiental. Además, proporcionan beneficios auxiliares, como la creación de espacios verdes y hábitats atractivos para la vida silvestre (Benvenuti *et al.*, 2018).

A pesar de tener una alta eficiencia de limpieza, bajos costos de inversión y gestión, la eficiencia de los humedales para el tratamiento de aguas residuales varía con respecto a los diferentes procesos de diseño y el entorno hidrológico. La alta eficiencia en la eliminación de contaminantes es fundamental para garantizar la calidad del efluente (Wu *et al.*, 2020).

1.7.3 Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente UASB

El uso de un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB por sus siglas en inglés) es una alternativa de tratamiento consolidado en países en desarrollo. Ha permitido que el tratamiento de aguas residuales llegue a poblaciones en lugares con poca

disponibilidad de superficie para instalar plantas de tratamiento convencionales o para cubrir las necesidades de pequeñas poblaciones. La tecnología UASB esencialmente permite la eliminación de materia orgánica carbonosa en suspensión o disuelta presente en las aguas residuales. Sin embargo, generalmente se requiere un postratamiento del efluente del reactor UASB para mejorar la calidad de éste. Además, en cuanto a la remoción de microcontaminantes orgánicos, los reactores UASB han demostrado ser inadecuados, obteniendo remociones bajas (Vassalle *et al.*, 2020).

1.7.4 Coagulación-Floculación

La coagulación floculación es uno de los procesos mayormente utilizados para el acondicionamiento de lodos, especialmente cuando se considera la relación costo eficiencia. El mecanismo se desarrolla cuando pequeñas partículas coloidales en el lodo, forman grandes flóculos y tortas compactadas para mejorar la eficiencia en otras etapas como la sedimentación o la deshidratación, al aumentar las tasas de deshidratación en los lodos (Wei *et al.*, 2018).

1.7.5 Radiación con luz UV

El tratamiento de agua con radiación ultravioleta es una de las tecnologías de más rápido crecimiento, debido a su superioridad sobre los desinfectantes químicos. Actualmente las lámparas de mercurio de baja y medio presión, son la principal fuente de radiación ultravioleta en las industrias del agua y agua residual. Sin embargo, las lámparas UV son comúnmente cilíndricas, tienen un patrón de radiación fijo, un tiempo de calentamiento prolongado y necesitan equipo eléctrico auxiliar para funcionar. Recientemente, ha surgido el diodo emisor de luz ultravioleta (UV-LED) como una nueva fuente de luz ultravioleta que ocupa poco espacio, puede funcionar con una fuente de alimentación continua, no tiene tiempo de calentamiento, no contiene mercurio y tiene un potencial para una vida útil prolongada (Keshavarzfathy & Taghipour, 2019).

1.7.6 Oxidación electroquímica

Se ha demostrado que la oxidación electroquímica es una tecnología de tratamiento alternativa eficiente para uso en operaciones de tratamiento de aguas residuales en el sitio y a pequeñas escalas. La electrólisis es particularmente adecuada para el tratamiento in situ descentralizado de aguas residuales provenientes de letrinas, las cuales tienen mayores cargas de DQO y DBO junto con menores caudales volumétricos en comparación con las plantas de tratamiento de aguas residuales (Yang *et al.*, 2019).

El tratamiento electroquímico es un proceso novedoso, limpio y robusto que es utilizado para disminuir la cantidad de materia orgánica y eliminar los patógenos presentes en lodos residuales. Sin embargo, debido a la baja temperatura con la que opera, no es capaz de inactivar o eliminar organismos como los huevos de helmintos (Jafari *et al.*, 2020).

1.7.7 Tratamiento térmico

El tratamiento térmico es uno de los métodos más antiguos y sencillos que se utilizan para desinfectar el agua, las aguas residuales, los biosólidos y los productos alimenticios. La exposición a altas temperaturas puede resultar en la desnaturalización o coagulación de componentes celulares vitales, causando pérdida de viabilidad. Los digestores termofílicos se utilizan comúnmente para tratar lodos procedentes de depuradoras y residuos de animales. Las altas temperaturas también se han propuesto como una forma de reducir las concentraciones de patógenos en las aguas residuales. El grado de reducción de patógenos logrado en los procesos de tratamiento con calor, está influenciado por la combinación de tiempo y temperatura. Temperaturas más altas con tiempos de exposición más cortos, pueden lograr niveles de reducción de patógenos similares como con temperaturas más bajas con tiempos de exposición más largos. Hay compensaciones asociadas con estos factores: las temperaturas más altas requieren más energía para calentar, pero los tiempos de exposición más prolongados requieren reactores más grandes (Espinosa *et al.*, 2020).

1.7.8 Tratamiento alcalino

La estabilización alcalina es una alternativa para la inactivación de patógenos, incluso es reconocido como un proceso capaz de reducir significativamente el contenido de microorganismos y producir biosólidos. En México, la estabilización con cal es utilizada en algunas plantas de tratamiento. La elevación del pH por la adición de cal reduce el contenido de patógenos a niveles muy bajos (Méndez Contreras *et al.*, 2002).

Es un método ampliamente usado en el tratamiento de lodos procedentes de las plantas de tratamiento. En el proceso de estabilización con cal, se puede agregar cal hidratada Ca(OH)_2 al lodo sin tratar, la cantidad suficiente para elevar el pH a 12. El pH alto, crea un ambiente que retarda las reacciones microbianas que de otra manera puede conducir a la producción de olores y la atracción de vectores. Generalmente los lodos de depuradora son sometidos a diferentes tipos de tratamientos para minimizar la presencia de patógenos y mejorar la biodegradabilidad para la producción de gas. Las tecnologías para dicho tratamiento incluyen ultrasonidos, tratamiento térmico, oxidación química, irradiación de microondas, entre otros procesos fisicoquímicos. No obstante, el tratamiento alcalino es muy utilizado en la desinfección de lodos por su sencillez, eficacia y bajo costo. Es una opción simple y efectiva para el tratamiento de lodos de depuradora que puede ser utilizada en lugares con recursos técnicos y financieros limitados (Lopes *et al.*, 2018).

1.8 Modelación de las cinéticas de inactivación de patógenos

Existen modelos que pueden describir las cinéticas de inactivación de microorganismos patógenos, tales modelos derivan de los siguientes supuestos: a) distribución uniforme de microorganismos y moléculas desinfectantes. b) pH, temperatura y concentraciones constantes de desinfectante. c) Mezcla adecuada para evitar que la difusión del líquido se convierta en un agente limitante en la reacción química (Ganguly *et al.*, 2018).

1.8.1 Modelo de Weibull

El modelo de Weibull, se ha utilizado en gran medida para describir curvas de supervivencia de no linealidad en la inactivación de organismos con procesos térmicos y no térmicos (De Oliveira *et al.*, 2013) el modelo se muestra en la Ecuación 1.1.

$$\text{Log}_{10}N = \text{Log}_{10}N_0 - \left(\frac{t}{\delta}\right)^p \quad (1.1)$$

Donde:

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

p = Forma de las curvas ($p > 1$ produce curvas convexas y $p < 1$ produce curvas cóncavas)

δ = Tiempos de la primera reducción decimal en la población microbiana

1.8.2 Modelo de Chick

El artículo de Chick sobre “Las leyes de la desinfección” en 1908 comparó la inactivación bacteriana con una reacción química, en la que las bacterias individuales se consideraban moléculas (Ganguly *et al.*, 2018). Dicho modelo se observa en la Ecuación 1.2.

$$\ln \frac{N}{N_0} = -K * t \quad (1.2)$$

Donde:

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

N = Concentración final de microorganismos

$K^* = K \times C$ (Constante de velocidad de pseudo primero orden)

K = Constante de velocidad de inactivación microorganismos

C = Concentración del desinfectante

t = Tiempo de contacto

1.8.3 Modelo de Chick-Watson

El modelo de Chick-Watson asume que los microorganismos son de una sola cepa y la inactivación ocurre en un solo instante y en un solo lugar. No muestra ni la fase de retraso ni la naturaleza de la caída. Este modelo a comparación de su antecesor (Ecuación 1.3), introduce un coeficiente de dilución sobre la cantidad de desinfectante que es distribuida en el medio (Ganguly *et al.*, 2018).

$$\ln \frac{N}{N_0} = -KC^n t \quad (1.3)$$

Donde:

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

N = Concentración final de microorganismos

K = Constante de velocidad de inactivación microorganismos

C = Concentración del desinfectante

t = Tiempo de contacto

n = Coeficiente de dilución

1.8.4 Modelo de Hom

El modelo de Hom fue propuesto en 1972, es una variante del modelo de Chick-Watson, se observa una adición de un factor empírico (m), el cual fue incorporado para estimar y modular las desviaciones del modelo de primer orden. Si $m=1$, la Ecuación 1.4 se reduce al modelo de Chick-Watson (Ateia *et al.*, 2020).

$$\ln \frac{N}{N_0} = -KC^n t^m \quad (1.4)$$

Donde:

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

N = Concentración final de microorganismos

K = Constante de velocidad de inactivación de microorganismos

C = Concentración del desinfectante

t = Tiempo de contacto

n = Coeficiente de dilución / transferencia de calor

m = Constante de Hom

Esta ecuación cinética puede ser utilizada para evaluar las constantes y el modelo puede simplificarse como se muestra en la Ecuación 1.5.

$$\ln \frac{N}{N_0} = -K^* D^n \quad (1.5)$$

1.8.5 Modelo de Hom modificado para tratamiento alcalino

La cinética de inactivación alcalina puede ser modelada matemáticamente con el modelo de Hom modificado para el tratamiento alcalino, con diferentes dosis de CaO y temperatura constante, como se muestra en la Ecuación 1.6 y Ecuación 1.7.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^* D^n \quad (1.6)$$

$$-k^* = -kt^m \quad (1.7)$$

Para evaluar el tiempo de contacto con dosis constante de CaO, se utiliza la Ecuación 1.8 y Ecuación 1.9.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^{**} t^m \quad (1.8)$$

$$-k^{**} = -kD^n \quad (1.9)$$

Donde:

N = Concentración final de microorganismos

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

k = Constante de velocidad de inactivación de microorganismos

D = Concentración de desinfectante

m = Constante de Hom

n = Coeficiente de dilución

1.8.6 Modelo de Hom para tratamiento térmico

La cinética de inactivación térmica puede ser modelada matemáticamente con el modelo de Hom modificado para el tratamiento térmico con diferentes niveles de temperaturas y tiempo constante (Murillo, 2016) el cual es expresado en la Ecuación 1.10 y Ecuación 1.11.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^* T^N \quad (1.10)$$

$$-k^* = -kt^m \quad (1.11)$$

Para evaluar diferentes niveles de tiempo de exposición a temperatura constante, se utilizará la Ecuación 1.12 y Ecuación 1.13.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^{**} t^m \quad (1.12)$$

$$-k^{**} = -kT^N \quad (1.13)$$

Donde:

N = Concentración final de microorganismos

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

k = Constante de velocidad de inactivación de microorganismos

T = temperatura

m = Constante de Hom

N = Coeficiente de transferencia de calor

t = tiempo de exposición al calor

1.9 Límites máximos permisibles de contaminantes patógenos en biosólidos

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental – Lodos y biosólidos, establece los límites máximos permisibles de contaminantes presentes en lodos y biosólidos.

En la Tabla 1.4 se pueden observar los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos, según la clase de éste.

Tabla 1.4 Límites máximos permisibles para contaminantes patógenos en biosólidos.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

El aprovechamiento de los biosólidos se especifica con respecto al tipo y la clase y se puede observar en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Aprovechamiento de los biosólidos respecto a su clase y tipo.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	• Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase B y C.
	B	• Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para la clase C.
Excelente o Bueno	C	• Usos forestales • Mejoramiento de suelos. • Usos agrícolas.
Excelente o Bueno		

1.10 Estudios previos relacionados con la inactivación de huevos de helmintos

Méndez-Contreras *et al.* (2012), estudiaron el impacto de las dosis de NH_3 y temperaturas resultantes del proceso de la estabilización alcalina, en el tratamiento de lodos residuales. Los resultados mostraron que el factor DT (Dosis de NH_3 y temperatura) presentó un efecto negativo en la supervivencia de bacterias y huevos de helmintos presentes en lodos de origen fisicoquímico. En esta investigación se utilizó el modelo de Hom para determinar las cinéticas de inactivación.

Atenodoro-Alonso *et al.* (2015), propusieron el desarrollo y comparación del proceso de digestión anaerobia mejorada con un pre-tratamiento térmico y un post-tratamiento térmico para el tratamiento de lodos residuales. A la par, se trabajó con los coeficientes cinéticos de un modelo matemático que fue desarrollado para la inactivación térmica de coliformes fecales, *Salmonella spp.* y huevos de helmintos. Los resultados mostraron que las bacterias y huevos de helmintos fueron inactivados a 70°C durante una hora para el pre-tratamiento, mientras que para el post-tratamiento fueron inactivados a 80°C durante 2 horas.

Murillo (2016), determinó los parámetros cinéticos para la inactivación de huevos de *Trichuris suis* los cuales se encontraban presentes en los residuos porcícolas provenientes de la zona centro del estado de Veracruz. En esta investigación se llevó a cabo un tratamiento térmico con temperaturas de 70, 80 y 90°C con tiempos de exposición de 60, 90 y 120 min. Los resultados mostraron que los huevos de helmintos fueron inactivados a una temperatura de 80°C durante 120 min, además se obtuvieron los parámetros cinéticos mediante el modelo de Hom.

Fubin *et al.* (2017), estudiaron la inactivación de indicadores patógenos (coliformes fecales, *Salmonella spp.* estreptococos fecales y huevos de helmintos) durante el pre-tratamiento alcalino con un pH de 10 y 12. En el estudio evaluaron la cinética de inactivación de patógenos y solubilización de lodos. Los resultados arrojaron que el modelo de Weibull puede predecir mejor la cinética de inactivación de patógenos que

el modelo de primer orden utilizado en el estudio. Además, concluyeron que, el pre-tratamiento alcalino puede mejorar la solubilización del lodo y tiene un efecto más significativo sobre la solubilización de proteínas que sobre la demanda química de oxígeno soluble.

Lopes *et al.* (2018), investigaron el efecto del tratamiento alcalino aplicado a lodos tratados en un reactor UASB, para examinar los genes y la resistencia a antibióticos de huevos de helmintos viables y *Salmonella spp.* La estructura de dichos organismos fue analizada mediante electroforesis. El experimento consistió en añadir Ca(OH)_2 a los lodos, de manera que se tomaron muestras a las 2, 24, 48 y 72 horas de tratamiento. Los resultados mostraron que el tratamiento alcalino cambio considerablemente la estructura de la comunidad bacteriana después de las 24 horas, aunque algunas bacterias permanecieron en condiciones de $\text{pH} > 12$, al igual que los HH.

Amador (2018), evaluó el efecto de la digestión anaerobia termófila, en la inactivación de *Trichuris suis* y la remoción de compuestos orgánicos en residuos porcícolas. En esta investigación, se cuantificó la carga microbiana de coliformes fecales, *Salmonella spp.* y huevos de helmintos, operando el reactor a condiciones mesófitas y adaptándola posteriormente a condiciones termófilas. Los resultados mostraron que existió una diferencia significativa en la tasa de remoción de SV y la producción de biogás al cambiar la temperatura de la operación del reactor. A la temperatura de 55°C se logró una completa inactivación de *Trichuris suis*, coliformes fecales y *Salmonella spp.*

Senecal *et al.* (2020), llevaron a cabo un estudio en donde evaluaron la inactivación de huevos de *Ascaris* en diversas condiciones, las cuales fueron el contenido de humedad (20 a 90 %), la temperatura ($20 - 50^\circ\text{C}$) y pH (7 – 12.5). Los resultados destacan que la exposición de los huevos de *Ascaris* a un pH elevado (10.5 – 12.5) y temperatura de 27.5°C durante más de 70 días, no tuvo ningún efecto sobre la

viabilidad del huevo. Se observaron efectos combinados del pH alcalino (10.5) o la disminución del contenido de humedad menor al 20 % y a 35°C, teniendo el pH un efecto mayor que la disminución del contenido de humedad. Para acelerar la inactivación de huevos de helmintos, un aumento en la temperatura de tratamiento es más efectivo que un aumento del pH. Los resultados indicaron que el pH alcalino por sí solo no inactivó los HH.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Metodología experimental

En la Figura 2.1 se muestra la metodología utilizada en la modelación matemática del tratamiento térmico-alkalino realizado con el fin de inactivar los contaminantes patógenos presentes en los residuos de origen porcino.

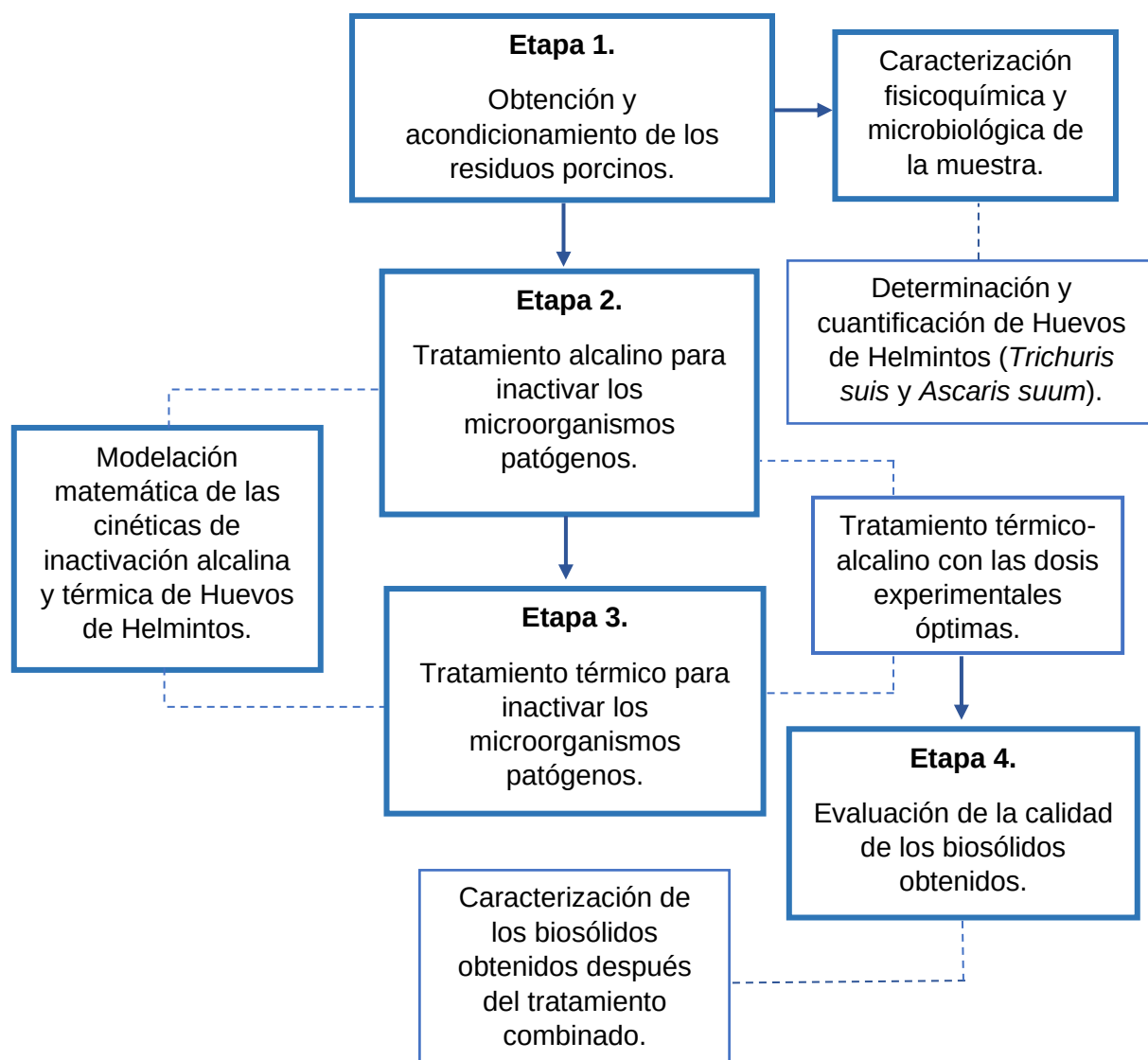


Figura 2.1 Esquema de la metodología general.

2.2 Obtención y acondicionamiento de los residuos porcinos

Las muestras de residuos porcinos fueron obtenidas en un criadero de traspatio localizado en el municipio de Acultzingo, Veracruz, estas fueron recolectadas en recipientes de plástico de 2 L.

Posterior a su obtención, los residuos porcinos fueron acondicionados para obtener una muestra, cuya cantidad de sólidos totales (ST) fuera de 2 a 3 %, por lo que se realizó una dilución 1:6 y se almacenó la muestra a 4°C hasta su caracterización.



Figura 2.2 Muestra acondicionada.

2.3 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los residuos porcinos

La muestra se caracterizó fisicoquímica y microbiológicamente con la finalidad de conocer sus propiedades, composición y evaluar principalmente los niveles de contaminación microbiológica que esta pudiera tener. En la Tabla 2.1 se pueden observar los parámetros analizados y el método con el que se realizó cada uno.

Tabla 2.1 Parámetros de la caracterización de la muestra.

Fisicoquímicos	Método	Unidad
pH	Potenciométrico	--
Sólidos totales	2540 G, Standard Methods	% mg
Sólidos volátiles	2540 G, Standard Methods	% mg
Nitrógeno total	4500-NTK C, SM.	mg/kg ST
Lípidos	Extracción Soxhlet	g/L
Carbohidratos	Antrona-sulfúrico	g/L
Proteínas	Método Kjeldahl	%

Continuación Tabla 2.1 Parámetros de la caracterización de la muestra.

Microbiológicos	Método	Unidad
Coliformes fecales	NOM-004-SEMARNAT-2002	NMP/g ST
<i>Salmonella spp.</i>	NOM-004-SEMARNAT-2002	NMP/g ST
Huevos de helmintos	NOM-004-SEMARNAT-2002	HH/g ST

2.3.1 Determinación de pH

El pH de la muestra se midió de forma directa con un potenciómetro marca Orión modelo 250a, el cual fue calibrado previamente con soluciones tampón 4.0 y 7.0. Fue importante determinar este parámetro debido a que se realizaría un tratamiento alcalino de la muestra.

2.3.2 Determinación de Sólidos Totales

Para determinar los ST se pesaron en crisoles a peso constante, de 2 a 3 g de muestra y se llevaron a evaporación durante 24 horas en una estufa de calentamiento a 103 – 105 °C, como lo indica la técnica gravimétrica descrita en el método estándar 2540 G de la APHA-AWWA-WPFC (2017). El aumento sobre el peso del crisol vacío representó a los sólidos totales y el cálculo se realizó con la Ecuación 2.1.

$$\% ST = \frac{P_3 - P_1}{P_2} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Donde:

P_1 = Peso del crisol a peso constante

P_2 = Peso de la muestra antes de evaporación (sin considerar peso del crisol)

P_3 = Peso del crisol a peso constante + peso del residuo seco

2.3.3 Determinación de Sólidos Totales Volátiles

Para el cálculo de los Sólidos Totales Volátiles se ocupó la muestra seca obtenida en la determinación de Sólidos Totales y fue calcinada en una mufla Thermo Sciencitic a

550 °C durante 2 h. El peso perdido en el crisol tras la incineración del residuo seco representó a los sólidos volátiles y el porcentaje se calculó con la Ecuación 2.2.

$$\% STV = \frac{P_3 - P_4}{P_3 - P_1} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Donde:

P_1 = Peso del crisol a peso constante

P_3 = Peso del crisol a peso constante + peso del residuo seco

P_4 = Peso del crisol a peso constante + peso de la muestra calcinada

2.3.4 Determinación nitrógeno total y proteínas

La determinación de proteínas se llevó a cabo con el método micro Kjeldahl en el cual se tomó una porción de muestra de entre 30 y 50 mg, se le agregaron 0.5 g de sulfato de potasio, 0.2 g de sulfato de cobre, una pizca de selenio y 4 mL de ácido sulfúrico concentrado.

La mezcla fue llevada a digestión durante 2 horas o hasta una coloración verde esmeralda o azul turquesa, dicha mezcla fue llevada a destilación para lo cual se agregaron entre 10 y 15 mL de hidróxido de sodio al 40 %, el destilado se recibió en vasos de precipitado con 10 mL de ácido bórico al 10 % y una gota de indicador azul-rojo de metilo. Las muestras recibidas fueron tituladas con ácido sulfúrico al 0.1 N hasta una coloración rosada. Para calcular el nitrógeno total se utilizó la Ecuación 2.3.

$$\% N = \frac{G \cdot N \cdot 0.014}{M} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Donde:

G = volumen gastado de ácido sulfúrico al 0.1 N

N = Normalidad real del ácido sulfúrico

M = peso de la muestra en g

Finalmente, para determinar el contenido de proteínas se multiplicó el porcentaje obtenido en la Fórmula 2.3 por un factor de conversión (6.25).

2.3.5 Determinación de carbohidratos

Los carbohidratos se determinaron mediante el método antrona-sulfúrico en el cual se realizó una dilución 1:25 de la muestra. La reacción de antrona constituye la base de un método conveniente para la determinación de hexosas, aldo-pentosas y ácidos hexourónicos. La absorbancia de las muestras, fue leída en un espectrofotómetro Thermo Scientific modelo Genesys 20 a una longitud de onda de 620 nm, previamente se realizó una curva de calibración y se preparó un blanco.

2.3.6 Determinación de coliformes fecales

Para determinar el contenido de coliformes fecales se utilizó la técnica descrita en el anexo III de la NOM-004SEMARNAT-2002. Se realizó la prueba presuntiva a través de diluciones sucesivas, en donde se obtuvieron inóculos, al menos, de una célula para obtener crecimiento en el medio de cultivo y otros que al sembrarse dan resultado positivo en por lo menos un tubo de la serie. La combinación de resultados positivos y negativos permite realizar una estimación de la densidad bacteriana reportada como NMP.

El NMP de coliformes fecales se obtiene a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el medio EC. Si se inoculan tres series de tres tubos y se utilizan volúmenes decimales diferentes, se obtiene el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente, siguiendo la Ecuación 2.4.

$$\frac{NMP}{gST} = \frac{NMP \text{ tablas} \cdot 10^6}{\text{mayor volumen inoculado}} \quad (2.4)$$

2.3.7 Determinación de *Salmonella* spp.

El método utilizado en la determinación de *Salmonella* spp. fue el descrito en el Anexo IV de la NOM-004-SEMARNAT-2002 que se basa en el enriquecimiento de la muestra con medios selectivos los cuales contienen sustancias inhibidoras que favorecen al crecimiento de las especies. Una vez realizada la selección, las bacterias presentes en una muestra pueden ser separadas por agitación, dando por resultado una suspensión de células bacterianas, uniformemente distribuidas, a través de diluciones sucesivas de la muestra.

El NMP de *Salmonella* spp; se obtuvo a partir del código compuesto por los tubos con resultado positivo en el caldo de selenito cistina. Se obtuvo el código formado por el número de tubos con resultados positivos en las tres series consecutivas, verificando el valor del NMP correspondiente con la Ecuación 2.4.

2.3.8 Determinación de Huevos de helmintos

Para la determinación de Huevos de helmintos se desarrolló la técnica descrita en el Anexo V de la NOM-004-SEMARNAT-2002 que tiene por objeto la detección, cuantificación y clasificación de huevos de helmintos en muestras de lodos y biosólidos, esto con el fin de evaluar la eficiencia de los sistemas de tratamiento a los que están sujetos. El principio de la prueba está basado en lavados continuos, combinados con diversas etapas de filtración y flotación, de esta manera se logró la separación de los huevos de helmintos del resto de partículas de mayor y menor tamaños. En la Figura 2.3 se observan las muestras con huevos de helmintos concentrados.

Los Huevos de helmintos fueron observados y cuantificados en una cámara de conteo Sedgewick Rafter de plástico con capacidad de 1 mL, además se utilizó un microscopio óptico Carl Zeiss, Primo Star el cual se observa en la Figura 2.4.



Figura 2.3 Muestras con huevos de helmintos concentrados.



Figura 2.4 Microscopio óptico Carl Zeiss.

Los resultados se expresaron como HH/gST (Número de huevos por cada gramo de sólidos totales del volumen de muestra analizada).

2.4 Tratamiento alcalino con dosis de CaO variable

Con la finalidad de inactivar los huevos de helmintos presentes en los residuos porcinos se desarrolló un tratamiento alcalino el cual fue realizado a nivel laboratorio reactores abiertos de 250 mL de capacidad, con lo equivalente a 1 g de ST de muestra a temperatura ambiente. Se utilizó un diseño unifactorial (Dosis de CaO). Los tratamientos se realizaron con 10, 15 y 20 % m/m de CaO (Cal viva con 81.5 % de CaO) como se muestra en la Tabla 2.2. Los reactores fueron agitados constantemente durante 2 horas a 200 rpm.

Tabla 2.2 Diseño unifactorial con Dosis de CaO variable.

Dosis de CaO (m/m)	Tiempo
10 %	2 horas
15 %	
20 %	

Durante el tratamiento se evaluaron las condiciones resultantes de la dosis de CaO.

2.4.1 Determinación de las cinéticas de inactivación alcalina (Dosis CaO variable)

En la Ecuación 2.5 y Ecuación 2.6, se muestra el modelo de Hom modificado para tratamiento alcalino que fue utilizado para determinar las cinéticas de inactivación alcalina con dosis de CaO variables y tiempo constante de 2 horas, de las cuales se obtuvo la dosis de CaO recomendable.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^* D^n \quad (2.5)$$

$$-k^* = -kt^m \quad (2.6)$$

Donde:

N = Concentración final de microorganismos

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

k = Constante de velocidad de inactivación de microorganismos

D = Concentración de desinfectante

m = Constante de Hom

n = Coeficiente de dilución

2.5 Tratamiento alcalino con dosis recomendable de CaO

Una vez obtenida la dosis recomendable de CaO se realizó un diseño unifactorial (tiempo). Los tratamientos fueron llevados a cabo con 0, 30, 60, 90 y 120 minutos de contacto de desinfectante como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Diseño unifactorial con tiempos de contacto variables.

Dosis de CaO (m/m)	Tiempo (min)
Recomendable	0
	30
	60
	90
	120

2.5.1 Determinación de las cinéticas de inactivación alcalina (Dosis recomendable de CaO)

En la Ecuación 2.7 y Ecuación 2.8, se muestra el modelo de Hom modificado para tratamiento alcalino que fue utilizado para determinar las cinéticas de inactivación alcalina con la dosis de CaO recomendable y tiempos variables, de las cuales se obtuvo el tiempo de contacto recomendable.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^{**}t^m \quad (2.7)$$

$$-k^{**} = -kD^n \quad (2.8)$$

2.6 Tratamiento térmico con niveles de temperatura variables

Se llevó a cabo un tratamiento térmico con la finalidad de inactivar los huevos de helmintos presentes en los residuos agroindustriales de origen porcino. Dicho tratamiento fue llevado a cabo a nivel laboratorio y la experimentación fue realizada en reactores abiertos de 250 mL de capacidad con lo equivalente a 1 g ST de muestra a temperatura ambiente. Se utilizó un diseño unifactorial (temperatura). Los tratamientos

fueron realizados con temperaturas de 70, 80 y 90°C, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Diseño unifactorial con niveles de temperatura variables.

Nivel de temperatura	Tiempo
70°C	2 horas
80°C	
90°C	

2.6.1 Determinación de las cinéticas de inactivación térmica (temperatura variable)

En la Ecuación 2.9 y Ecuación 2.10 se muestra el modelo de Hom modificado para el tratamiento térmico el cual fue utilizado para determinar las cinéticas de inactivación térmica con niveles de temperatura variables y un tiempo constante de 2 horas, de las cuales se obtuvo el nivel de temperatura recomendable.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^* T^N \quad (2.9)$$

$$-k^* = -kt^m \quad (2.10)$$

Donde:

N = Concentración final de microorganismos

N_0 = Concentración inicial de microorganismos

k = Constante de velocidad de inactivación de microorganismos

T = Temperatura

m = Constante de Hom

N = Coeficiente de transferencia de calor

t = tiempo de exposición al calor

2.7 Tratamiento térmico con nivel de temperatura recomendable

Después de haber obtenido el nivel recomendable de temperatura, se realizó un diseño unifactorial (tiempo). Los experimentos fueron llevados a cabo con tiempos de 0, 30, 60, 90 y 120 minutos de exposición a la temperatura, como se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Diseño unifactorial con tiempos de exposición variables.

Nivel de temperatura	Tiempo (min)
Recomendable	0
	30
	60
	90
	120

2.7.1 Determinación de las cinéticas de inactivación térmica (temperatura recomendable)

En la Ecuación 2.11 y Ecuación 2.12 se muestra el modelo de Hom modificado para el tratamiento térmico que fue utilizado para obtener las cinéticas de inactivación térmica con una temperatura constante y niveles de tiempo variables, de esta manera se obtuvo el tiempo de exposición recomendable.

$$\log \frac{N}{N_0} = -k^{**}t^m \quad (2.11)$$

$$-k^{**} = -kT^N \quad (2.12)$$

2.8 Evaluación de la calidad de los biosólidos obtenidos

Después de haber obtenido las condiciones óptimas para la inactivación de los huevos de helmintos presentes en los residuos porcinos, se procedió a realizar un tratamiento combinado (térmico-alkalino). El experimento se desarrolló en un reactor abierto de

500 mL al cual se le agregaron 250 g de muestra que posteriormente fue sometida al tratamiento combinado durante 120 minutos.

Los biosólidos obtenidos fueron caracterizados con base en la Tabla 2.1 y posteriormente fueron clasificados de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Acondicionamiento de los residuos porcinos

Las excretas de origen porcino fueron acondicionadas con una dilución que permitió tener un valor de 2-3 % de Sólidos Totales, por lo que se estudiaron 4 diluciones (1:3, 1:4, 1:5 y 1:6). La dilución 1:6 resultó la más favorable debido a que se obtuvo un valor de 2.63 % de ST.

3.2 Caracterización fisicoquímica de la muestra

Fueron analizadas muestras procedentes de plantas semi-tecnificadas, sin embargo, la concentración de huevos de helmintos que presentaron fue casi nula. Por tal motivo, se procedió a analizar una muestra de criadero de traspatio, en la Tabla 3.1 se muestran las características fisicoquímicas de las excretas acondicionadas.

Tabla 3.1 Caracterización fisicoquímica.

Parámetros fisicoquímicos	
pH	7.13
ST	2.63 %
SV	88.47 %
Nitrógeno total	0.16 %
Lípidos	6.54 g/L
Proteínas	1 %
Carbohidratos	3.14 g/L

El pH fue un parámetro importante en esta investigación, debido a que el tratamiento alcalino se fundamenta en el aumento de dicho valor, de esta manera el medio se vuelve apropiado para inhibir el crecimiento de microorganismos e inactivarlos. El valor determinado en los residuos porcinos fue de 7.13, el cual fue apropiado para someter la muestra a un tratamiento alcalino (CaO), que como lo indica Fubin *et al.*, (2017), es recomendable que se lleve a cabo en un rango de pH de 10 a 12.

Como se mencionó anteriormente, los Sólidos Totales fueron de 2.63 % y los Sólidos Totales Volátiles de 88.47 %, que representa a un lodo rico en materia orgánica y apto para ser sometido a tratamientos físicos, químicos y biológicos. Los resultados de ST y STV fueron similares a los reportados por Murillo, (2016) que realizó una dilución 1:6 y reportó 2.52 % ST y 84.55 % STV.

Respecto a los macronutrientes, se obtuvo 0.16 % de Nitrógeno total, 1 % de proteínas, carbohidratos de 3.14 g/L y lípidos de 6.54 g/L. Los valores de Nitrógeno total y proteínas estuvieron por debajo de los reportados por Estrada-García (2021), quien realizó una dilución 1:4 y obtuvo valores de 0.36 % y 2.23 % respectivamente, mientras que los gramos de carbohidratos por litro fueron 15 % mayores.

3.3 Caracterización microbiológica de la muestra

En la Tabla 3.2 se muestran las características microbiológicas de la muestra. Es sabido que los desechos de comida son la base de la alimentación en los criaderos de traspatio y que además no existe un saneamiento adecuado, tales motivos pueden justificar los valores elevados de microorganismos patógenos registrados en dicha tabla.

Tabla 3.2 Caracterización microbiológica.

Parámetros microbiológicos	
Coliformes fecales	2 x10 ⁹ NMP/gST
<i>Salmonella spp.</i>	9.3 x10 ⁴ NMP/gST
HH	1,152 <i>Ascaris suum</i>
	1,051 <i>Trichuris suis</i>
	Total: 2,203 HH/gST

Los valores de Coliformes fecales y *Salmonella spp.* fueron de 2 x10⁹ NMP/gST y 9.3 x10⁴ NMP/gST respectivamente. Ambos valores estuvieron por arriba del límite máximo permisible establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002 para la clasificación

de biosólidos. Se encontraron dos especies de huevos de helmintos: *Ascaris suum* y *Trichuris Suis*, registrándose 1,152 y 1,051 HH/gST respectivamente, obteniendo un total de 2,203 HH/gST, un valor muy por encima del límite máximo permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana. La Figura 3.1 corresponde a huevos de la especie *Trichuris suis* observados en el objetivo 10x y en la Figura 3.2 se observa a la misma especie junto a un huevo de *Ascaris suum* vistos en el objetivo 10x.

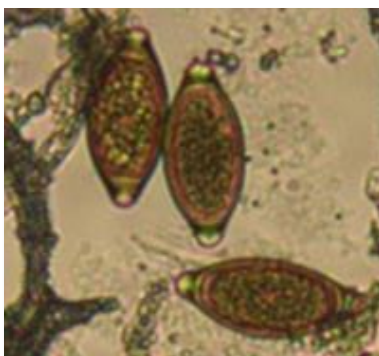


Figura 3.1 Huevos de *Trichuris suis* vistos en el microscopio.

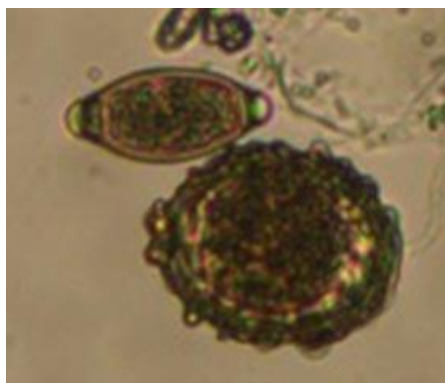


Figura 3.2 Huevos de *Trichuris suis* y *Ascaris suum* vistos en el microscopio.

Los resultados de la caracterización microbiológica evidencian un alto contenido de agentes patógenos, especialmente de HH los cuales son los microorganismos más difíciles de inactivar o eliminar y están presentes con una cantidad que supera a lo reportado por Murillo (2016) y Amador (2018), quienes obtuvieron 180 y 100 HH/gST respectivamente.

3.4 Inactivación alcalina de huevos de helmintos

En la Tabla 3.3 se puede observar la concentración final de HH después del tratamiento alcalino con las diferentes cantidades de CaO durante 2 horas. Como se muestra en la Figura 3.3 la mayor efectividad se dio con la concentración del 20 % de CaO, la cual generó un pH de 12.1, condición que logró destruir el 94.7 % de huevos de ambas especies, tal condición fue semejante a la analizada por Senecal *et al.* (2020), quienes llevaron el pH de la muestra de 7 a 12.5, sin embargo, no pudieron inactivar en su totalidad a los HH.

Tabla 3.3 Concentración de HH con el tratamiento alcalino (CaO variable).

Concentración CaO	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0 %	2,104	1,984	2,409	2,315	2,203	193.9
10 %	224	219	246	232	230	11.79
15 %	176	152	188	173	172	14.97
20 %	109	84	164	110	117	33.7

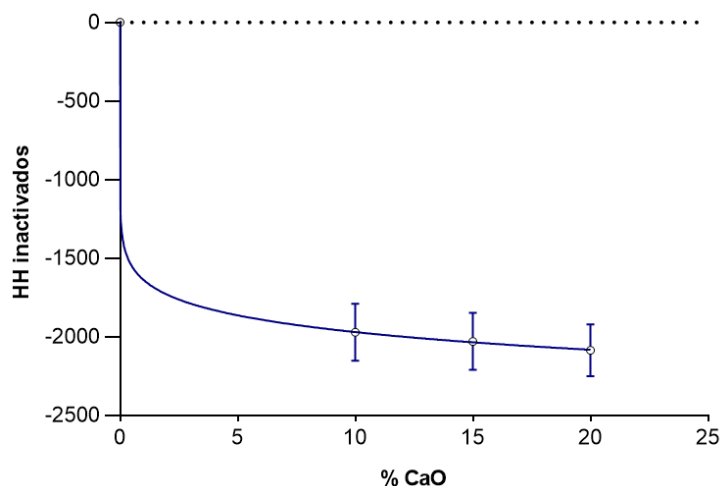


Figura 3.3 Cinética de inactivación alcalina de HH totales.

La concentración de huevos de *Ascaris suum* después del tratamiento alcalino con diferentes dosis de CaO se puede observar en la Tabla 3.4, con la dosis de 20 % de CaO se eliminó hasta el 93.5 % de huevos de dicha especie, el comportamiento de la cinética de este tratamiento se puede ver en la Figura 3.4 donde se muestra una

cinética de pseudo primer orden con pendientes que presentan un comportamiento de valles, parecidas a las obtenidas por Méndez-Contreras *et al.* (2012) en el proceso de estabilización alcalina de lodos residuales.

Tabla 3.4 Concentración de huevos de *Ascaris suum* con el tratamiento alcalino (CaO variable).

Concentración CaO	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0 %	1,070	1,113	1,245	1,181	1,152	76.9
10 %	148	154	163	157	156	6.24
15 %	115	106	123	114	115	6.95
20 %	79	51	100	70	75	20.3

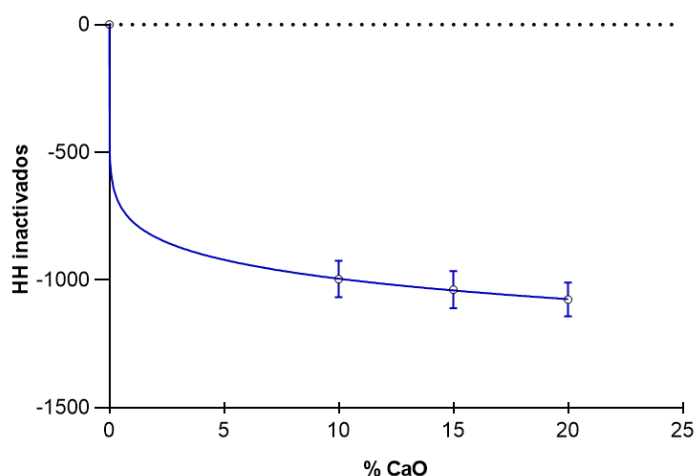


Figura 3.4 Cinética de inactivación alcalina de *Ascaris suum*.

En la Tabla 3.5 se muestran los huevos de *Trichuris suis* contabilizados antes y después del tratamiento alcalino con diferentes dosis de CaO, la mayor efectividad fue del 96 % y al igual que en los casos anteriores se dio con la mayor concentración de desinfectante, sin embargo, se registró una mayor tasa de eliminación en esta especie. La cinética de inactivación alcalina de *Trichuris suis* se puede ver en la Figura 3.5 donde es notable que entre las concentraciones de 10 y 20 % de CaO no existieron cambios significativos en la destrucción de huevos de esta especie.

Tabla 3.5 Concentración de huevos de *Trichuris suis* con el tratamiento alcalino (CaO variable).

Concentración CaO	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0 %	1,034	871	1,164	1,134	1,051	132.1
10 %	76	65	83	75	75	7.41
15 %	61	49	65	59	59	6.81
20 %	30	33	64	40	42	15.41

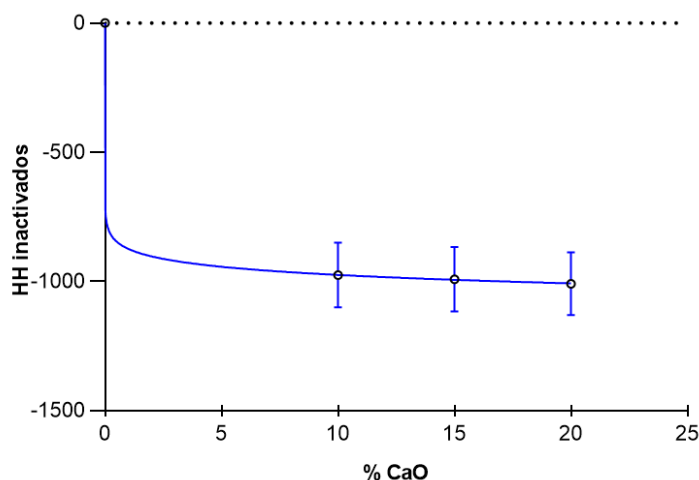


Figura 3.5 Cinética de inactivación alcalina de *Trichuris suis*.

El tratamiento alcalino fue efectivo para reducir la concentración de huevos de helmintos presentes en los residuos de origen porcino, sin embargo, de manera similar a lo reportado por Lopes *et al.* (2018), la inactivación en condiciones de $\text{pH} > 12$ no fue suficiente para cumplir con los límites máximos permisibles establecidos por las diferentes normas oficiales. De las dosis analizadas experimentalmente, la recomendable fue la de 20 % de CaO ya que con ella se obtuvieron los mayores porcentajes de eliminación.

De acuerdo con el valor de $F_0 = 422.63$ obtenido en el ANOVA, se infiere que la dosis de CaO fue un valor significativo para la eliminación de huevos de helmintos, además, según la comparación de medias de Tukey, no hay diferencias significativas entre las concentraciones de CaO que fueron utilizadas (ver Anexo A).

3.4.1 Inactivación alcalina con diferentes niveles de tiempo

Una vez determinada la dosis experimental recomendable, se llevó a cabo el proceso de inactivación alcalina con el 20 % de CaO (m/m) y diferentes niveles de tiempo como se observa en la Tabla 3.6. La cinética de inactivación alcalina con los tiempos de 0 a 120 minutos se puede ver en la Figura 3.6, para el caso de huevos de helmintos totales la mayor destrucción se efectuó con el tiempo de exposición más prolongado (120 min).

Tabla 3.6 Concentración de huevos de helmintos con el tratamiento alcalino (tiempo variable).

Tiempo	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0	2,104	1,984	2,409	2,315	2,203	193.9
30	534	354	672	603	541	136.7
60	456	337	564	510	467	97.1
90	401	280	498	447	407	93.2
120	109	84	164	110	117	33.7

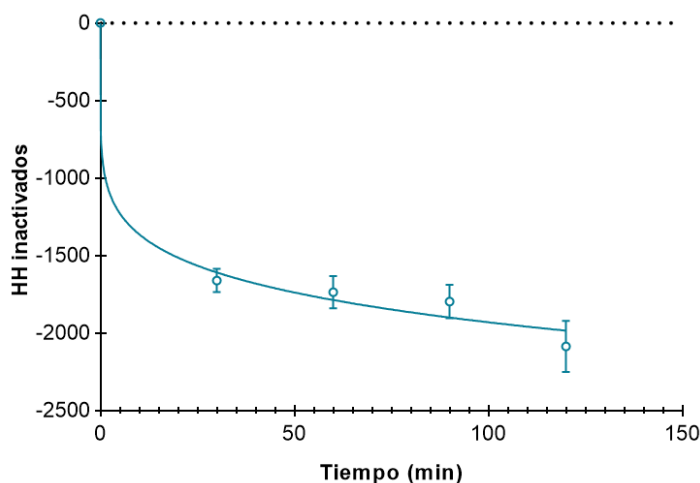


Figura 3.6 Cinética de inactivación alcalina de HH totales (tiempo variable).

En la Tabla 3.7 se muestran las concentraciones de huevos de *Ascaris suum* que se obtuvieron después del tratamiento alcalino, la mayor destrucción de microorganismos

de esta especie se registró a las dos horas de tratamiento. En la Figura 3.7 se observa la cinética de dicha inactivación.

Tabla 3.7 Concentración de huevos de *Ascaris suum* con el tratamiento alcalino (Tiempo variable).

Tiempo	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0	1,070	1,113	1,245	1,181	1,152	76.9
30	279	193	393	336	300	85.3
60	258	182	341	300	270	67.9
90	244	167	307	275	248	60
120	79	51	100	70	75	20.3

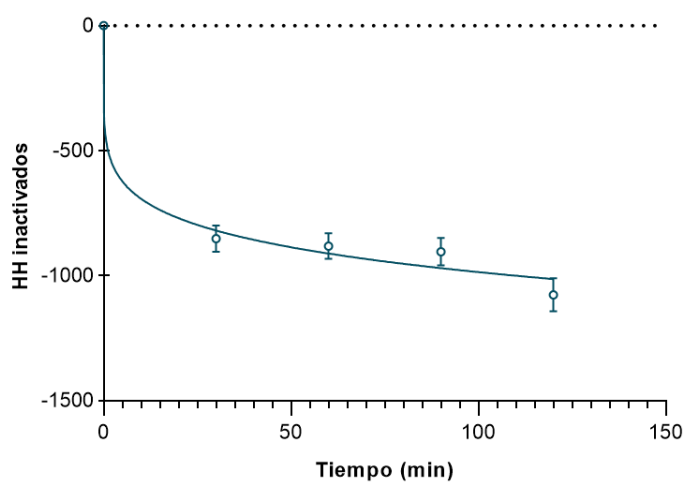


Figura 3.7 Cinética de inactivación alcalina de *Ascaris suum* (tiempo variable).

Para la especie *Trichuris suis* las concentraciones después del tratamiento alcalino se muestran en la Tabla 3.8. La cinética de inactivación alcalina evidencia que también para esta especie la mayor destrucción se dio con el mayor tiempo como se observa en la Figura 3.8.

El tratamiento alcalino con diferentes niveles de tiempo permitió evidenciar que 120 minutos fue el tiempo de exposición capaz de eliminar la mayor cantidad de huevos de

helminthos de las dos especies estudiadas. La diferencia de efectividad entre dicho tiempo y los otros que fueron estudiados, fue muy significativa.

Tabla 3.8 Concentración de huevos de *Trichuris suis* con el tratamiento alcalino (tiempo variable).

Tiempo	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0	1,034	871	1,164	1,134	1,051	132.1
30	255	161	279	267	241	53.9
60	198	155	223	210	197	29.5
90	157	113	191	172	158	33.2
120	30	33	64	40	42	15.41

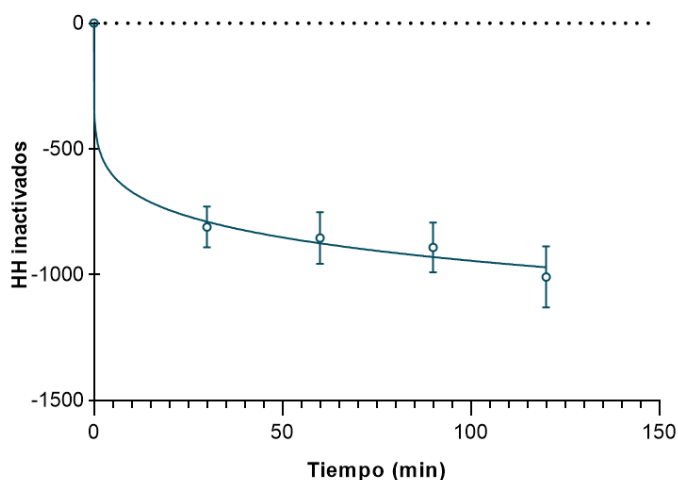


Figura 3.8 Cinética de inactivación alcalina de *Trichuris suis* (tiempo variable).

A partir del análisis de varianza (ver Anexo A) se observó que el tiempo resultó ser un factor significativo en la variable de respuesta (inactivación de huevos de helmintos) al obtener un valor de $F_0 = 182.4$, mientras que, según la comparación de medias de Tukey se concluye que existe una diferencia significativa entre los 120 minutos y los demás niveles de tiempo.

3.4.2 Inactivación de huevos de helmintos por el factor DT

Cuantificar el pH y la temperatura durante el proceso de inactivación alcalina con CaO, permitió obtener concentraciones reales de amoníaco que contribuyeron a la inactivación de los HH presentes en los residuos porcícolas. En la Tabla 3.9 se observan los datos de la inactivación de HH generada por el producto DT (Dosis y temperatura), se puede ver que con una dosis de 20 % de CaO se generó mayor temperatura, por consiguiente, se obtuvo el mejor resultado del producto DT (9,963 mg/L°C) ya que el NH₃ convertido fue del 99.82 %, aunque fue menor al reportado por Méndez-Contreras *et al.*, (2012) que fue del 99.99 %. Sin embargo, la mayor inactivación por DT se dio con la dosis de 15 %, eliminando 127 HH en el tratamiento.

Tabla 3.9 Relación de la inactivación de HH generada por el producto DT.

Dosis CaO	N-NH ₃ (mg/L)	pH	% NH ₃ convertido	Dosis real (mg/L)	Temp. °C	DT mg/L °C	N/No HH por DT	N/No HH por CaO	N/No HH (total)
0 %	180	7.13	0.81	2	19.5	39	0	0	0
10 %	190	11.30	99.09	188	24.5	4,606	-91	-1,882	-1,973
15 %	370	11.77	99.69	369	25.5	9,409	-127	-1,904	-2,031
20 %	370	12.01	99.82	369	27	9,963	-104	-1,982	-2,086

En la Figura 3.9 se muestra la gráfica de la inactivación de HH totales mediante la destrucción o afectación física de las capas lipoproteicas. Además, se observa la comparación de la inactivación causada por el producto DT generado en el proceso de estabilización alcalina con CaO.

Como se ha mencionado anteriormente el tratamiento con CaO fue capaz de inactivar el 94.7 % HH, mientras que la mayor inactivación resultante del producto DT fue del 5.8 %, una eficiencia mayor a la reportada por Méndez-Contreras *et al.* (2012) donde llegó solamente hasta un 2 %. Con base en lo anteriormente mencionado se puede decir que la dosis de amoníaco y la temperatura generadas mediante el tratamiento con CaO en un sistema abierto, no es la principal causa de inactivación, sin embargo, contribuye de manera discreta a la eliminación microorganismos patógenos.

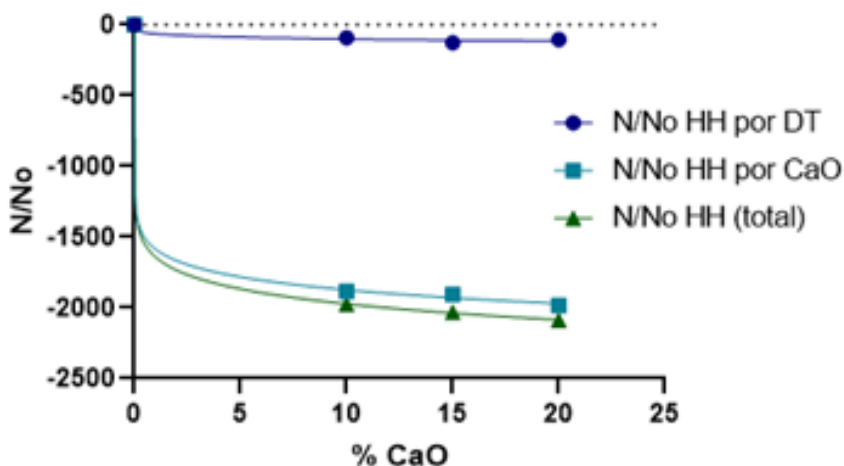


Figura 3.9 Huevos de helmintos eliminados por los diferentes factores.

3.4.3 Modelación de las cinéticas de inactivación alcalina

En la Tabla 3.10 se muestran los parámetros cinéticos que se obtuvieron después de la inactivación alcalina con dosis de desinfectante variable, los valores de R^2 fueron de entre 0.9872 y 0.9924, lo que indica que las modelaciones fueron bastante confiables, los valores de n indican coeficientes de dilución apropiados para que el CaO actuara como agente desinfectante en toda la materia tratada. Los valores de k^* se tradujeron en una velocidad de inactivación de microorganismos apropiada y superior a la reportada por Méndez-Contreras *et al.* (2012) la cual fue de 0.00924.

Tabla 3.10 Parámetros cinéticos de la inactivación alcalina (CaO variable).

Microorganismo	K^*	n	R^2
HH totales	0.3870	0.3973	0.9924
<i>Ascaris suum</i>	0.2896	0.4697	0.9872
<i>Trichuris suis</i>	0.5582	0.3074	0.9903

En la Tabla 3.11 se observan los parámetros cinéticos del producto DT en comparación de lo obtenidos con el CaO. Se puede observar que según el valor de $k^* = 0.0008479$, la inactivación causada por el producto DT fue muy lenta, de manera similar a lo

reportado por Méndez-Contreras *et al.*, (2012) en su estimación del parámetro $k^* = 0.000924$. El valor de la constante m^* sirvió para modular las desviaciones del modelo. Es evidente que el valor de la R^2 de la modelación del producto DT fue menor que el de la modelación de inactivación por CaO, sin embargo, $R^2 = 0.9463$ sugiere que se trata de un modelo confiable.

Tabla 3.11 Comparación de los parámetros cinéticos del producto DT e inactivación con CaO.

Desinfectante	k^*	m	R^2
DT	0.0008479	0.4540	0.9463
CaO	0.3870	0.3973	0.9924

En la Tabla 3.12 se pueden observar los parámetros cinéticos de la inactivación alcalina con dosis de desinfectante constante y diferentes tiempos, a diferencia de las modelaciones anteriores, los valores de R^2 oscilaron entre 0.8407 y 0.8937, lo que indica que el modelo tuvo menos confiabilidad.

Tabla 3.12 Parámetros cinéticos de la inactivación alcalina (tiempo variable).

Microorganismo	k^{**}	m	R^2
HH totales	0.0631	0.6024	0.8745
<i>Ascaris suum</i>	0.0686	0.5676	0.8407
<i>Trichuris suis</i>	0.0534	0.6598	0.8937

Al realizar la modelación matemática con el modelo de Hom, se obtuvieron los valores de k^* (tratamiento alcalino con tiempo constante) y k^{**} (tratamiento alcalino con dosis de CaO constante), con ellos se realizaron los siguientes cálculos que sirvieron para determinar el valor de k global propio del tratamiento alcalino.

- Primera etapa

$$\log \frac{N}{N_0} = -KD^n t^m \quad t^m = Cte = 120 \text{ min}$$

$$\therefore \log \frac{N}{N_0} = -K^* D^n \quad y \quad K^* = K t^m$$

$$\text{Despejando } K_1 = \frac{k^*}{t^m}$$

$$k_1 = \frac{0.387}{120^{0.6024}} = 0.0216$$

- Segunda etapa

$$\log \frac{N}{N_0} = -K D^n t^m \quad D^n = Cte = 20 \%$$

$$\therefore \log \frac{N}{N_0} = -K^{**} t^m \quad y \quad K^{**} = K D^n$$

$$\text{Despejando } K_2 = \frac{k^{**}}{D^n}$$

$$k_2 = \frac{0.0631}{20^{0.3973}} = 0.0192$$

$$\therefore k = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{0.0216 + 0.0192}{2} = 0.0204$$

A partir de los cálculos anteriores se obtuvo una $k = 0.0204$, la cual infiere que el tratamiento alcalino se desarrolló con una velocidad de inactivación bastante alta. De igual manera fueron determinados los valores de k del tratamiento aplicado a las especies *Ascaris suum* ($k = 0.0179$) y *Trichuris suis* ($k = 0.0227$). En base a los valores de k se infiere que la inactivación de huevos de la especie *Trichuris suis* se efectuó con una velocidad mayor.

3.5 Inactivación térmica de huevos de helmintos

Las concentraciones de HH totales antes y después del tratamiento térmico a diferentes temperaturas (70, 80 y 90 °C) se pueden observar en la Tabla 3.13. A la temperatura cero se contabilizó un promedio de 1,382 huevos de ambas especies, la mayor eliminación se registró con la temperatura más alta (90 °C) con una efectividad del 58.2 % en la destrucción de las capas lipoproteicas de HH. En la Figura 3.10 se muestra la cinética de pseudo primer orden con comportamiento de hombros similar a lo reportado por Amador (2018) en su cinética de inactivación térmica de HH.

Tabla 3.13 Concentración de HH con el tratamiento térmico (temperatura variable).

Temperatura	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
25	1,443	1,532	1,221	1,332	1,382	135
70	1,146	1,163	1,092	1,127	1,132	30.5
80	926	1,077	887	982	968	82.5
90	613	557	563	580	578	25.1

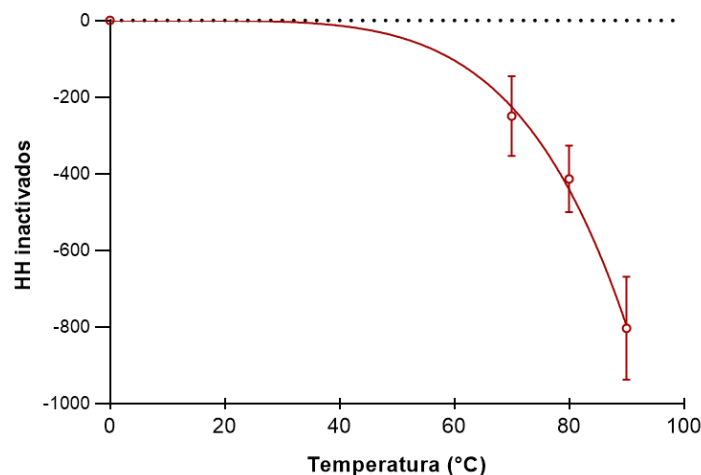


Figura 3.10 Cinética de inactivación térmica de HH totales.

El número de huevos de la especie *Ascaris suum* que fueron eliminados con el tratamiento térmico a diferentes temperaturas se muestra en la Tabla 3.14, donde la mayor efectividad se dio a la temperatura de 90 °C semejante a lo reportado por Atenodoro-Alonso *et al.* (2015) quienes determinaron que el rango de temperatura más favorable para la inactivación de esta especie se encontraba de 80 a 90 °C durante 120 minutos. La inactivación total obtenida fue del 55.1 % de huevos de *Ascaris suum*. La cinética se puede observar en la Figura 3.11, cuyo comportamiento evidencia la tendencia a la reducción de los patógenos con el aumento de la temperatura aplicada.

Los huevos de la especie *Trichuris suis* eliminados con el tratamiento térmico a diferentes temperaturas se observan en la Tabla 3.15 donde se puede ver que la mayor eliminación de estos microorganismos se registró con la temperatura de 90 °C y la efectividad obtenida en la destrucción de huevos de dicha especie fue del 61.4 %, por

lo que, de manera similar a lo ocurrido en el tratamiento alcalino, la especie *Trichuris suis* es más sensible al tratamiento térmico.

Tabla 3.14 Concentración de huevos de *Ascaris suum* con el tratamiento térmico (temperatura variable).

Temperatura	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
25	797	750	592	702	710	87.9
70	659	578	622	597	614	35
80	472	577	512	502	516	44.2
90	368	321	278	310	319	37.3

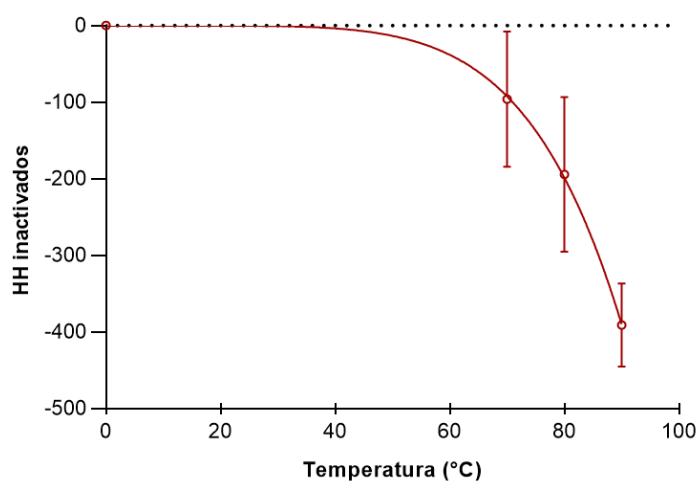


Figura 3.11 Cinética de inactivación térmica de *Ascaris suum*.

Los huevos de la especie *Trichuris suis* eliminados con el tratamiento térmico a diferentes temperaturas se observan en la Tabla 3.15 donde se puede ver que la mayor eliminación de estos microorganismos se registró con la temperatura de 90 °C y la efectividad obtenida en la destrucción de huevos de dicha especie fue del 61.4 %, por lo que, de manera similar a lo ocurrido en el tratamiento alcalino, la especie *Trichuris suis* es más sensible al tratamiento térmico.

Tabla 3.15 Concentración de huevos de *Trichuris suis* con el tratamiento térmico (temperatura variable).

Temperatura	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
25	646	782	626	630	671	74.5
70	487	585	470	535	519	51.8
80	454	500	375	466	449	52.9
90	245	236	285	270	259	22.5

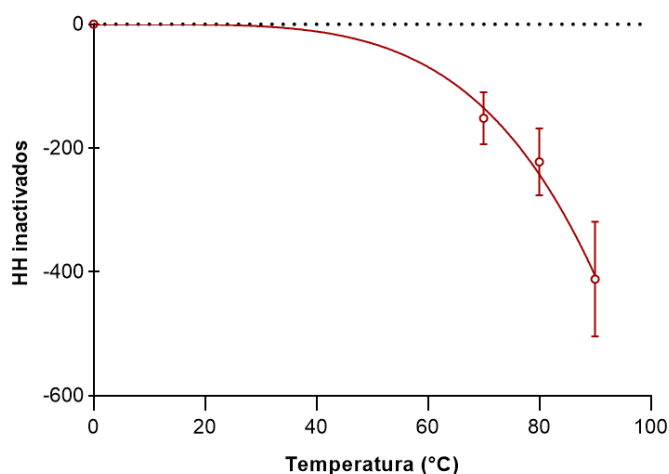


Figura 3.12 Cinética de inactivación térmica de *Trichuris suis*.

El tratamiento térmico obtuvo una eficiencia del 58.2 % en la destrucción de huevos de ambas especies, resultando la temperatura de 90°C la más efectiva. Sin embargo, al comparar este tratamiento con el alcalino hay un déficit del 36.5 % en la inactivación de HH.

A partir del análisis de varianza (ver Anexo A) se deduce que la temperatura resultó ser un factor significativo en la inactivación de huevos de helmintos, al obtener un valor de $F_0 = 68.51$. Por medio del método de comparación de medias de Tukey con un nivel de confianza del 95 % se observa que la temperatura de 90 °C resultó ser significativamente diferente a los demás niveles de temperatura (70 y 80 °C), con esto se confirma que 90 °C fue la temperatura capaz de inactivar la mayor cantidad de microorganismos patógenos.

3.5.1 Inactivación térmica con diferentes niveles de tiempo

En la Tabla 3.16 se muestran los resultados de la inactivación térmica de HH a la temperatura de 90°C y diferentes niveles de tiempo. La Figura 3.13 muestra la cinética de inactivación térmica de huevos de helmintos totales en donde se puede observar que a los 120 minutos de tratamiento se obtiene la eliminación más alta de estos microorganismos.

Los huevos eliminados de la especie *Ascaris suum* se pueden observar en la Tabla 3.17. Como se muestra en la Figura 3.14 la mayor destrucción se dio con el mayor tiempo de exposición (120 minutos).

Tabla 3.16 Concentración de HH con el tratamiento térmico (tiempo variable).

Tiempo	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0	1,443	1,532	1,221	1,332	1,382	135
30	1,132	1,258	1,151	1,229	1,193	60.6
60	1,048	1,145	1,016	1,082	1,073	55.2
90	1,017	1,084	949	1,030	1,020	55.5
120	613	557	563	580	578	25.1

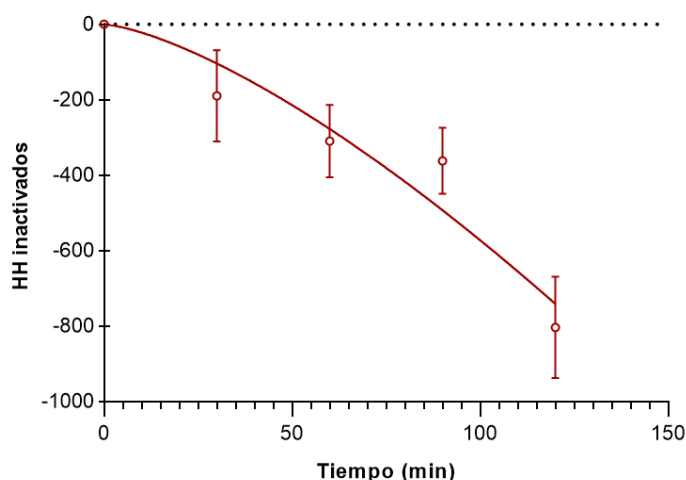


Figura 3.13 Cinética de inactivación térmica de HH totales (tiempo variable).

Tabla 3.17 Concentración de huevos de *Ascaris suum* con el tratamiento térmico (tiempo variable).

Tiempo	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0	797	750	592	702	710	87.9
30	630	695	603	670	650	41
60	588	652	546	602	597	43.7
90	569	630	506	552	564	51.3
120	368	321	278	310	319	37.3

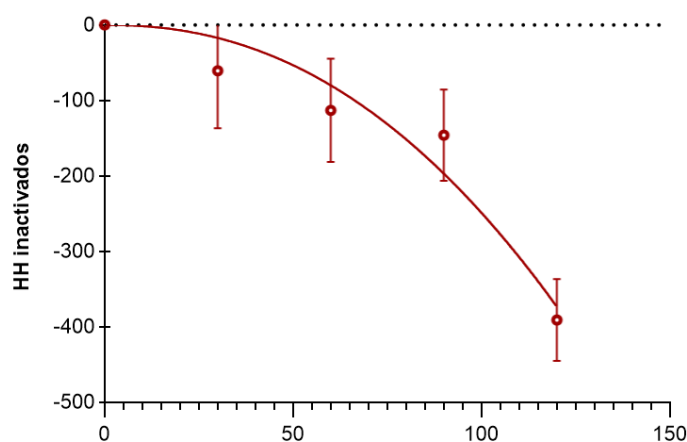


Figura 3.14 Cinética de inactivación térmica de *Ascaris suum* (tiempo variable).

En la Tabla 3.18 se observan las concentraciones de los huevos de la especie *Trichuris suis* antes y después del tratamiento térmico, al igual que para la especie *Ascaris suum* la menor concentración de HH se obtuvo prolongando el tiempo de tratamiento (120 min) como se muestra en la Figura 3.15.

Tabla 3.18 Concentración de huevos de *Trichuris suis* con el tratamiento térmico (tiempo variable).

Tiempo	1	2	3	4	Promedio	Desv. Estándar
0	646	782	626	630	671	74.5
30	502	563	548	559	543	28.1
60	460	493	470	480	476	14.1
90	448	454	443	478	456	15.5
120	245	236	285	270	259	22.5

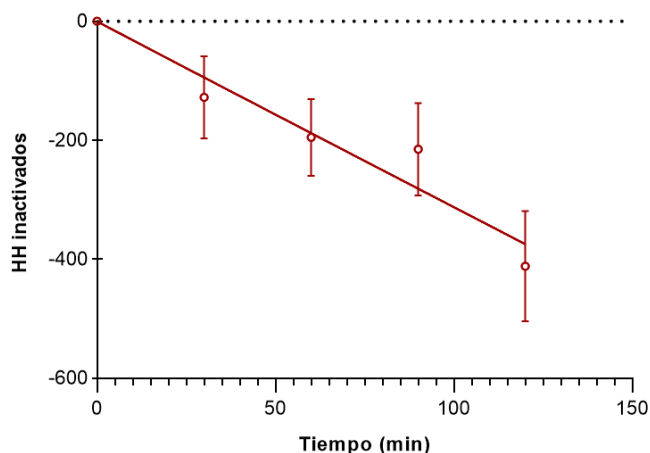


Figura 3.15 Cinética de inactivación térmica de *Trichuris suis* (tiempo variable).

De acuerdo con el valor de $F_0 = 61.88$, obtenido en el análisis de varianza, se concluye que el tiempo de exposición a la temperatura resultó ser un valor significativo en la inactivación de huevos de helmintos de ambas especies. La prueba de comparación de medias de Tukey muestra que, entre los 30 y 60 min de tratamiento, hubo diferencias significativas con respecto a la variable de respuesta, sin embargo, entre los 60 y 90 min, la diferencia en la inactivación no fue significativa. Finalmente, la diferencia de medias más significativa se presentó a los 120 min de operación.

3.5.2 Modelación de las cinéticas de inactivación térmica

En la Tabla 3.19 se muestran los parámetros cinéticos que fueron obtenidos gracias al modelo de Hom modificado para el tratamiento térmico. Según los valores de R^2 el mejor ajuste de modelo fue para huevos de helmintos totales, mientras que el ajuste más bajo fue para los huevos de la especie *Ascaris suum*. Cabe señalar que las 3 modelaciones resultaron ser confiables al obtener valores de R^2 mayores a 90. Con respecto al parámetro N las cantidades obtenidas (6.130 – 7.443) sugieren correctas difusiones de calor mayores a las obtenidas por Atenodoro-Alonso *et al.* (2015), en el post tratamiento térmico aplicado a lodos residuales ($N = 1.6$). Es evidente que los

valores de k^* fueron menores a las reportadas en el tratamiento alcalino, dichos valores sugieren una inactivación de microorganismos lenta, especialmente para la especie *Ascaris suum* ($k^* = 9.861 \times 10^{-16}$).

Tabla 3.19 Parámetros cinéticos de la inactivación térmica (temperatura variable).

Microorganismo	k^*	N	R^2
HH totales	2.394×10^{-14}	6.751	0.9600
<i>Ascaris suum</i>	9.861×10^{-16}	7.443	0.9140
<i>Trichuris suis</i>	4.259×10^{-13}	6.130	0.9225

Los parámetros cinéticos obtenidos después de la inactivación térmica con diferentes niveles de tiempo se pueden observar en la Tabla 3.20, los ajustes de los modelos fueron inferiores a los generados en la modelación anterior, sin embargo, siguen siendo confiables, especialmente para la especie *Ascaris suum*. Los valores de k^{**} indican que la inactivación para huevos de la especie *Trichuris suis* fue la más rápida.

Tabla 3.20 Parámetros cinéticos de la inactivación térmica (tiempo variable).

Microorganismo	k^{**}	m	R^2
HH totales	5.213×10^{-6}	2.327	0.8785
<i>Ascaris suum</i>	2.828×10^{-8}	3.405	0.9005
<i>Trichuris suis</i>	1.506×10^{-4}	1.637	0.8226

Al igual que en el tratamiento alcalino, tras realizar la modelación matemática con el modelo de Hom, se obtuvieron los valores de k^* (tratamiento térmico con tiempo constante) y k^{**} (tratamiento térmico con temperatura constante), con ellos se realizaron los siguientes cálculos que sirvieron para determinar el valor de k global del tratamiento térmico.

- Primera etapa

$$\log \frac{N}{N_0} = -KT^N t^m \quad t^m = Cte = 120 \text{ min}$$

$$\therefore \log \frac{N}{N_0} = -K^* T^N \quad y \quad K^* = K t^m$$

$$\text{Despejando } K_1 = \frac{k^*}{t^m}$$

$$k_1 = \frac{2.394 \times 10^{-14}}{120^{2.327}} = 3.474 \times 10^{-19}$$

- Segunda etapa

$$\log \frac{N}{N_0} = -K T^N t^m \quad T^N = Cte = 90^\circ C$$

$$\therefore \log \frac{N}{N_0} = -K^{**} t^m \quad y \quad K^{**} = K T^N$$

$$\text{Despejando } K_2 = \frac{k^{**}}{T^N}$$

$$k_2 = \frac{5.213 \times 10^{-6}}{90^{6.751}} = 3.342 \times 10^{-19}$$

$$\therefore k = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{3.474 \times 10^{-19} + 3.342 \times 10^{-19}}{2} = 3.408 \times 10^{-19}$$

Según los cálculos anteriores se obtuvo una $k = 3.408 \times 10^{-19}$. De igual manera se determinaron los valores de k del tratamiento térmico aplicado a las especies *Ascaris suum* ($k = 4.507 \times 10^{-23}$) y *Trichuris suis* ($k = 1.63 \times 10^{-16}$). Con base en los valores anteriores, se determinó que la velocidad de la inactivación térmica de la especie *Trichuris suis* resultó ser mayor.

3.6 Tratamiento térmico-alcálico

Después de haber realizado los tratamientos alcálico y térmico de manera independiente, se llevó a cabo un tratamiento combinado en el cual se consideraron las condiciones experimentales más apropiadas. El objetivo de dicho tratamiento fue convertir el residuo de origen porcino en un biosólido clase B, debido a la elevada concentración de huevos de helmintos presentes en la muestra analizada.

Ya que la dosis de desinfectante fue el factor más significativo, se optó por usar una dosis de 20 % (m/m) de CaO. Respecto a la temperatura, al resultar el factor menos

significativo y con el fin de optimizar el ahorro de energía en el proceso, se decidió usar una temperatura de 70°C. El tratamiento térmico-alkalino con las condiciones mencionadas anteriormente fue capaz de eliminar el 99.85 % de huevos de helmintos, se logró pasar de 1,382 HH/gST a 2 HH/gST, transformando al residuo tratado en un biosólido clase B, sin embargo, se procedió a realizar el tratamiento combinado con dosis de CaO y temperatura menores. El proceso se desarrolló con 15 % (m/m) de CaO y una temperatura de 60°C, dicha combinación tuvo una efectividad del 99.42 % en la eliminación de huevos de helmintos, ya que después del tratamiento, se registró una concentración de 8 HH/gST, cantidad que estuvo por debajo del límite máximo permisible establecido en la NOM-004-SEMARNAR-2002 para biosólidos clase B que como lo mencionan Silva-Leal *et al.* (2013) pueden ser aplicados con restricciones, para contacto indirecto, revegetación, cultivos de alimentos que se procesen antes de ser consumidos o cobertura en rellenos sanitarios.

En la Figura 3.16 y 3.17 se muestran fotografías de los huevos de helmintos después de ser sometidos al tratamiento térmico-alkalino. En dichas imágenes se puede observar la inactivación de los huevos de las especies *Ascaris suum* y *Trichuris suis*, respectivamente, causada por la ruptura de sus membranas lipoproteicas.



Figura 3.16 Huevo de *Ascaris suum* después del tratamiento térmico-alkalino.



Figura 3.17 Huevo de *Trichuris suis* después del tratamiento térmico-alkalino.

3.6.1 Caracterización de los biosólidos obtenidos

Los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los biosólidos que fueron obtenidos después de someter la muestra al tratamiento térmico-alkalino se muestran en la Tabla 3.21, en la cual se observa un valor de pH promedio de 12.1 similar al obtenido por Lopes *et al.* (2018) quienes estudiaron el efecto del tratamiento alcalino aplicado a lodos y observaron que un $\text{pH} > 12$ tuvo efectos significativos en la eliminación de la comunidad bacteriana, huevos de helmintos viables y *Salmonella spp.*

Es evidente que los sólidos totales aumentaron debido al suministro de materia alcalina (CaO) lo que llevó a una disminución de los STV con un valor de 2.54 %.

A causa del suministro de CaO, los valores de Nitrógeno total y proteínas, aumentaron 8 veces respecto a los porcentajes obtenidos en la muestra cruda. Se registró un aumento considerable en los carbohidratos, ya que fueron de 3.14 g/L a 13.25 g/L.

Respecto a los coliformes fecales y *Salmonella spp.* se obtuvieron valores de $< 1,000$ NMP/gST iguales a los obtenidos por Estrada-García (2021) quien sometió su muestra de origen porcino a un tratamiento térmico.

Tabla 3.21 Características fisicoquímicas y microbiológicas de los biosólidos obtenidos.

Físicos	Valor
pH	12.1
ST	21.24 %
STV	2.54 %
Nitrógeno total	1.41 %
Proteínas	8.81 %
Carbohidratos	13.25 g/L
Coliformes fecales	< 1,000 NMP/gST
<i>Salmonella spp.</i>	< 3 NMP/ gST
Huevos de helmintos	3 <i>Ascaris suum</i> 5 <i>Trichuris suis</i> Total: 8 HH/gST

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los residuos porcícolas evaluados, tuvieron concentraciones de microorganismos patógenos elevadas, principalmente HH de las especies *Ascaris suum* y *Trichuris suis*. La máxima concentración de dichos microorganismos que estuvo presente en la muestra fue de 2,203 HH/gST, de los cuales el 52.3 % fue de la especie *Ascaris suum* y el 47.7 % restante de la especie *Trichuris suis*. Debido al alto contenido de dichos microorganismos y a la naturaleza ligeramente alcalina de la muestra (pH = 7.13), se logró estudiar exitosamente el tratamiento alcalino y el tratamiento térmico.

Para el tratamiento alcalino, la dosis de desinfectante con la que se presentó una mayor inactivación de HH, fue 20 % m/m de CaO, sin embargo, no fue suficiente para inactivar la concentración total de dichos microorganismos, ya que el tratamiento con CaO fue capaz de inactivar el 94.7 % de huevos de ambas especies presentes en los residuos porcícolas. Los resultados demuestran que los huevos de *Trichuris suis* presentaron mayor sensibilidad al tratamiento alcalino. Por otra parte, el tiempo resultó ser un factor muy importante en el proceso de inactivación alcalina, debido a que la mayor eliminación de microorganismos patógenos se registró en los experimentos donde se operó con el mayor tiempo de exposición al CaO (120 minutos). De esta manera, se infirió que las condiciones recomendables para el tratamiento alcalino fueron 20 % m/m CaO durante 120 minutos de exposición.

El producto DT fue dependiente de la dosis de CaO aplicada a la muestra. El incremento del pH en el tratamiento alcalino resultó esencial para la inactivación de huevos de helmintos. Sin embargo, aunque la temperatura generada en el proceso no jugó un papel fundamental para llegar a la inactivación alcanzada, si complementa a la dosis de CaO y aumenta la eficiencia del mismo. El producto DT puede ser benéficamente utilizado en aquellos residuos con bajas concentraciones de huevos de helmintos y altas concentraciones de bacterias patógenas, las cuales son

significativamente más sensibles a la presencia de amoníaco y los cambios de temperatura en combinación con el CaO.

La temperatura resultó ser un factor menos determinante que la dosis de CaO, ya que el mayor nivel de temperatura analizado (90 °C) fue capaz de eliminar sólo el 58.2 % de los HH totales, al igual que en el tratamiento alcalino, la especie de *Trichuris suis* presentó mayor sensibilidad a este tratamiento. Además, se observó que el mayor tiempo de exposición a la temperatura fue fundamental para cumplir con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de HH. Finalmente, las condiciones recomendables obtenidas en los experimentos propios del tratamiento térmico fueron 90 °C durante 120 minutos de exposición.

Los datos obtenidos en ambos procesos de inactivación, sirvieron para obtener los parámetros cinéticos del tratamiento alcalino ($k = 0.0204$, $n = 0.3973$ y $m = 0.6024$) y del tratamiento térmico ($k = 3.408 \times 10^{-19}$, $N = 6.751$ y $m = 2.327$) propios del modelo de Hom. Con base en dichos parámetros cinéticos, se observó que el tratamiento alcalino se desarrolló con una velocidad de inactivación mayor que la del tratamiento térmico (para ambas especies). Los ajustes de modelo obtenidos para ambos tratamientos, sugieren que el modelo de Hom es apropiado para modelar matemáticamente los procesos térmico y alcalino ($R^2 = 0.96$ y $R^2 = 0.9924$ respectivamente). Además, resulta ser bastante confiable para predicciones futuras o determinaciones de valores teóricos.

Con la finalidad de optimizar costos y ahorrar energía, el tratamiento térmico-alcalino se logró llevar a cabo con 15 % m/m de CaO y 60°C. Dicha operación sirvió para inactivar el 99.42 % HH presentes en los residuos de origen porcino. Además, de acuerdo a la caracterización de los biosólidos obtenidos, se garantizó la eliminación del 100 % de los demás microorganismos patógenos. De esta manera, se consiguió obtener un biosólido clase B según los límites máximos permisibles establecidos en las normas oficiales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda explorar el tratamiento térmico-alcálico con niveles inferiores de CaO con la finalidad de disminuir costos y mejorar la calidad de los biosólidos a obtener posterior al tratamiento. Además, debido a la concentración atípica de HH en la muestra estudiada, es recomendable experimentar con temperaturas menores a 60°C en combinación con dosis de CaO inferiores al 15 % m/m, que sean capaces de eliminar menores concentraciones de HH, similares a las reportadas por otros autores en la bibliografía. Finalmente se sugiere realizar dicho tratamiento en reactores cerrados, con la finalidad de aprovechar la temperatura producida por la hidratación de CaO y el poder desinfectante del NH_4 generado en dicho proceso.

ANEXOS

ANEXO A

En esta sección se muestran los análisis estadísticos de cada uno de los diseños experimentales que se llevaron a cabo en esta investigación.

Tabla A1. ANOVA del tratamiento alcalino (CaO variable).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Dosis CaO	3	12387454	4129151	422.63	0.000
Error	12	117242	9770		
Total	15	12504696			

Tabla A2. Resumen del modelo (CaO variable).

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
98.8443	99.06 %	98.83 %	98.33 %

Tabla A3. Comparación de medias de Tukey (CaO variable)

Dosis CaO	N	Media	Agrupación
0	4	2203.0	A
10	4	230.25	B
15	4	172.25	B
20	4	116.8	B

Tabla A4. ANOVA del tratamiento alcalino (Tiempo variable).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo	4	11016680	2754170	182.40	0.000
Error	15	226499	15100		
Total	19	11243180			

Tabla A5. Resumen del modelo (Tiempo variable).

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
122.882	97.99 %	97.45 %	96.42 %

Tabla A6. Comparación de medias de Tukey (Tiempo variable).

Tiempo	N	Media	Agrupación
0	4	2203.0	A
30	4	540.8	B
60	4	466.8	B
90	4	406.5	B
120	4	116.8	C

Tabla A7. ANOVA del tratamiento térmico (Temperatura variable).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	3	1365350	455117	68.51	0.000
Error	12	79721	6643		
Total	15	1445071			

Tabla A8. Resumen del modelo (Temperatura variable).

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
81.5070	94.48 %	93.10 %	90.19 %

Tabla A9. Comparación de medias de Tukey (Temperatura variable).

Temperatura	N	Media	Agrupación
25	4	1382.0	A
70	4	1132.0	B
80	4	968.0	B
90	4	578.3	C

Tabla A10. ANOVA del tratamiento térmico (Tiempo variable).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tiempo	4	1417967	354492	61.88	0.000
Error	15	85926	5728		
Total	19	1503894			

Tabla A11. Resumen del modelo térmico (Tiempo variable).

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
75.6864	94.29 %	92.76 %	89.84 %

Tabla A12. Comparación de medias de Tukey del tratamiento térmico (Tiempo variable).

Tiempo	N	Media	Agrupación
0	4	1382.0	A
30	4	1192.5	B
60	4	1072.8	B C
90	4	1020.0	C
120	4	578.3	D

ANEXO B

En este apartado se pueden observar las modelaciones matemáticas que se realizaron para cada uno de los tratamientos analizados.

Tabla B1. Modelación matemática del tratamiento alcalino (HH totales)

Hom dosis variable (HH totales)	
Best-fit values	
k	0.3870
n	0.3973
95% CI (profile likelihood)	
k	0.2981 to 0.4997
n	0.3039 to 0.4921
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	14
R squared	0.9924
Sum of Squares	0.03035
Sy.x	0.04656
Number of points	
# of X values	16
# Y values analyzed	16

Tabla B2. Modelación matemática del tratamiento alcalino (*Ascaris suum*).

Hom dosis variable (<i>Ascaris suum</i>)	
Best-fit values	
k	0.2896
n	0.4697
95% CI (profile likelihood)	
k	0.2041 to 0.4066
n	0.3459 to 0.5961
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	14
R squared	0.9872
Sum of Squares	0.04343
Sy.x	0.05570
Number of points	
# of X values	16
# Y values analyzed	16

Tabla B3. Modelación matemática del tratamiento alcalino (*Trichuris suis*).

Hom dosis variable (<i>Trichuris suis</i>)	
Best-fit values	
k	0.5582
n	0.3074
95% CI (profile likelihood)	
k	0.4184 to 0.7400
n	0.2038 to 0.4125
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	14
R squared	0.9903
Sum of Squares	0.04887
Sy.x	0.05908
Number of points	
# of X values	16
# Y values analyzed	16

Tabla B4. Modelación matemática del tratamiento alcalino con tiempo variable (HH totales).

Hom tiempo variable (HH totales)	
Best-fit values	
k	0.06310
m	0.6024
95% CI (profile likelihood)	
k	0.01759 to 0.1826
m	0.3619 to 0.8846
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	18
R squared	0.8745
Sum of Squares	0.4297
Sy.x	0.1545
Number of points	
# of X values	20
# Y values analyzed	20

Tabla B5. Modelación matemática del tratamiento alcalino con tiempo variable (*Ascaris suum*).

Hom tiempo variable (<i>Ascaris suum</i>)	
Best-fit values	
k	0.06865
m	0.5676
95% CI (profile likelihood)	
k	0.01619 to 0.2224
m	0.3002 to 0.8868
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	18
R squared	0.8407
Sum of Squares	0.4819
Sy.x	0.1636
Number of points	
# of X values	20
# Y values analyzed	20

Tabla B6. Modelación matemática del tratamiento alcalino con tiempo variable (*Trichuris suis*).

Hom tiempo variable (<i>Trichuris suis</i>)	
Best-fit values	
k	0.05342
m	0.6598
95% CI (profile likelihood)	
k	0.01576 to 0.1485
m	0.4295 to 0.9287
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	18
R squared	0.8937
Sum of Squares	0.4407
Sy.x	0.1565
Number of points	
# of X values	20
# Y values analyzed	20

Tabla B7. Modelación matemática del tratamiento térmico (HH totales).

HOM Temperatura variable (HH totales)	
Best-fit values	
k	2.394e-014
N	6.751
95% CI (profile likelihood)	
k	2.176e-017 to 7.953e-012
N	5.451 to 8.314
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	14
R squared	0.9600
Sum of Squares	0.01295
Sy.x	0.03042
Number of points	
# of X values	16
# Y values analyzed	16

Tabla B8. Modelación matemática del tratamiento térmico (*Ascaris suum*).

HOM Temperatura variable (<i>Ascaris suum</i>)	
Best-fit values	
k	9.861e-016
N	7.443
95 % CI (profile likelihood)	
k	3.129e-021 to 9.937e-012
N	5.379 to 10.26
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	14
R squared	0.9140
Sum of Squares	0.02577
Sy.x	0.04290
Number of points	
# of X values	16
# Y values analyzed	16

Tabla B9. Modelación matemática del tratamiento térmico (*Trichuris suis*).

HOM Temperatura variable (<i>Tichuris suis</i>)	
Best-fit values	
k	4.259e-013
N	6.130
95 % CI (profile likelihood)	
k	3.794e-017 to 6.482e-010
N	4.487 to 8.213
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	14
R squared	0.9225
Sum of Squares	0.03031
Sy.x	0.04653
Number of points	
# of X values	16
# Y values analyzed	16

Tabla B10. Modelación matemática del tratamiento térmico con tiempo variable (HH totales).

Hom tiempo variable (HH totales)	
Best-fit values	
k	5.213e-006
m	2.327
95 % CI (profile likelihood)	
k	1.657e-008 to 0.0002179
m	1.528 to 3.541
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	18
R squared	0.8785
Sum of Squares	0.04195
Sy.x	0.04828
Number of points	
# of X values	20
# Y values analyzed	20

Tabla B11. Modelación matemática del tratamiento térmico con tiempo variable (*Ascaris suum*).

Hom tiempo variable (<i>Ascaris suum</i>)	
Best-fit values	
k	2.828e-008
m	3.405
95 % CI (profile likelihood)	
k	8.740e-012 to 4.886e-006
m	2.315 to 5.101
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	18
R squared	0.9005
Sum of Squares	0.03149
Sy.x	0.04183
Number of points	
# of X values	20
# Y values analyzed	20

Tabla B12. Modelación matemática del tratamiento térmico con tiempo variable (*Trichuris suis*).

Hom tiempo variable (<i>Trichuris suis</i>)	
Best-fit values	
k	0.0001506
m	1.637
95 % CI (profile likelihood)	
k	1.201e-006 to 0.002978
m	0.9887 to 2.664
Goodness of Fit	
Degrees of Freedom	18
R squared	0.8226
Sum of Squares	0.07337
Sy.x	0.06385
Number of points	
# of X values	20
# Y values analyzed	20

ANEXO C

En esta sección se muestran algunas imágenes de HH de las especies *Ascaris suum* y *Trichuris suis* que fueron capturadas en el microscopio óptico.

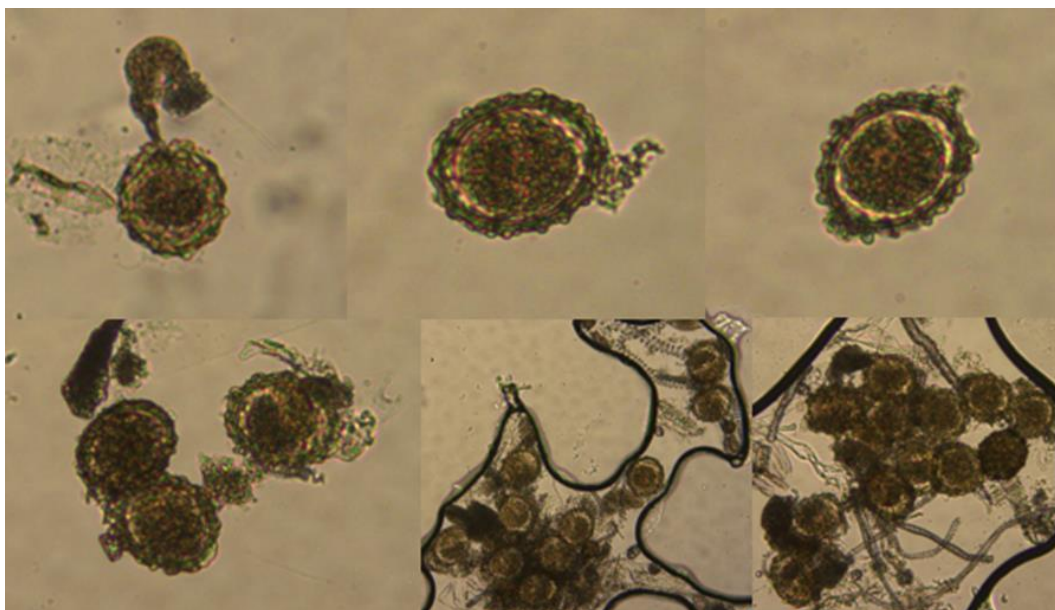


Figura C1. Imágenes de huevos de *Ascaris suum*.

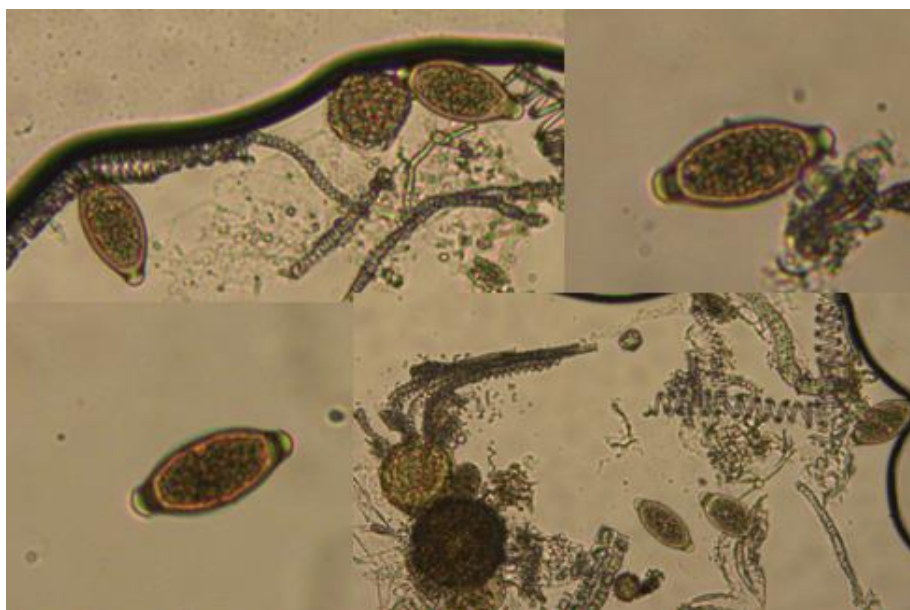


Figura C2. Imágenes de huevos de *Trichuris suis*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amador, L. P. 2018. Efecto de la digestión anaerobia termofílica en la inactivación de *Trichuris suis* y la remoción de compuestos orgánicos en residuos porcícolas. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- APHA. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. American Public Health Association. Washington, DC.
- Artika, I.M., Wiyatno, A. y Ma'roef, C.N. 2020. Pathogenic viruses: Molecular detection and characterization. *Infection, Genetics and Evolution*. **81**:104215.
- Ateia, M., Alalm, M.G., Awfa, D., Johnson, M.S. y Yoshimura, C. 2020. Modeling the degradation and disinfection of water pollutants by photocatalysts and composites: A critical review. *Science of the Total Environment*. **698**:134197.
- Atenodoro-Alonso, J., Ruíz-Espinoza, J. E., Alvarado-Lassman, A., Martínez-Sibaja, A., Martínez-Delgadillo, S. A., y Méndez-Contreras, J. M. 2015. The enhanced anaerobic degradability and kinetic parameters of pathogenic inactivation of wastewater sludge using pre- and post-thermal treatments Part 2. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **14**(2):311–319.
- Basualdo, J. A., Coto, C. E., y De Torres, R. A. 2006. Microbiología biomédica: Bacteriología – Micología – Virología – Parasitología – Inmunología. Atlante. Buenos Aires, Argentina.
- Benvenuti, T., Hamerski, F., Giacobbo, A., Bernardes, A.M., Zoppas-Ferreira, J. y Rodrigues, M.A.S. 2018. Constructed floating wetland for the treatment of domestic sewage: A real-scale study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **6**(5):5706–5711.
- Borbolla-Vazquez, J., Ugalde-Silva, P., León-Borges, J., y Díaz-Hernández, J. A. 2020. Total and faecal coliforms presence in cenotes of Cancun; Quintana Roo, Mexico. *BioRisk*. **15**:31–43.
- Caceres, J.P. 2020. Prevalencia y factores de riesgo de infecciones por helmintos gastrointestinales y pulmonares en criaderos de cerdos traspatios ubicados en el área metropolitana de Bucaramanga. Tesis de maestría. Universidad de Santander. Colombia.

- De Oliveira, T.L.C., Soares, R. de A. y Piccoli, R.H. 2013. A *Weibull* model to describe antimicrobial kinetics of oregano and lemongrass essential oils against *Salmonella* Enteritidis in ground beef during refrigerated storage. *Meat Science*. **93**(3):645–651.
- Estrada García, J. 2021. Determinación de las condiciones de operación, monitoreo reológico y simulación CFD de la bioconversión de *Lactobacillus Acidophilus* de residuos agrocañeros y ganadero porcino. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- Espinosa, M.F., Sancho, A.N., Mendoza, L.M., Mota, C.R. y Verbyla, M.E. 2020. Systematic review and meta-analysis of time-temperature pathogen inactivation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. **230**:113595.
- Fernández-Vizcaíno, E., Martínez-Carrasco, C., Moratal, S., Barroso, P. y Vicente, J. 2021. Detection of *Stephanurus dentatus* in wild boar urine using different parasitological techniques. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*. **15**:31–34.
- Fubin, Y., Zifu, L., Saino, M. y Hongmin, D. 2017. Performance of alkaline pretreatment on pathogens inactivation and sludge solubilization. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. **10**(2):216–223.
- Ganguly, P., Byrne, C., Breen, A. y Pillai, S.C. 2018. Antimicrobial activity of photocatalysts: Fundamentals, mechanisms, kinetics and recent advances. *Applied Catalysis B: Environmental*. **225**:51-75.
- García-Sánchez, A.M., Rivero, J., Callejón, R., Zurita, A., Reguera-Gomez, M., Valero, M.A. y Cutillas, C. 2019. Differentiation of *Trichuris* species using a morphometric approach. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*. **9**:218–223.
- Gassó, D., Rossi, L., Mentaberre, G., Casas, E., Velarde, R., Nosal, P. y Feliu, C. 2014. An identification key for the five most common species of *Metastrongylus*. *Parasitology Research*. **113**(9):3495–3500.
- Gonzalez Pedraza, J.B., Sanandres, N.P., Varela, Z.S., Aguirre, E.H. y Camacho, J.V. 2014. Aislamiento microbiológico de *Salmonella* spp. y herramientas moleculares para su detección. *Revista Salud Uninorte*. **30**(1):73-94.

- Gruchlik, Y., Linge, K. y Joll, C. 2018. Removal of organic micropollutants in waste stabilisation ponds: A review. *Journal of Environmental Management*. **206**:202-214.
- Jafari, M. y Botte, G.G. 2020. Electrochemical treatment of sewage sludge and pathogen inactivation. *Journal of Applied Electrochemistry*. **51**(1):119–130.
- Jiménez, B., Maya, C., Velásquez, G., Barrios, J.A., Perez, M. y Román, A. 2020. Helminth Egg Automatic Detector (HEAD): Improvements in development for digital identification and quantification of helminth eggs and their application online. *Experimental Parasitology*. **217**:107959.
- Katakam, K.K., Thamsborg, S.M., Dalsgaard, A., Kyvsgaard, N.C. y Mejer, H. 2016. Environmental contamination and transmission of *Ascaris suum* in Danish organic pig farms. *Parasites and Vectors*. **9**(1).
- Keshavarzfathy, M. y Taghipour, F. 2019. Radiation modeling of ultraviolet light-emitting diode (UV-LED) for water treatment. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **377**:58–66.
- Lassen, B., Oliviero, C., Orro, T., Jukola, E., Laurila, T., Haimi-Hakala, M. y Heinonen, M. 2017. Effect of fenbendazole in water on pigs infected with *Ascaris suum* in finishing pigs under field conditions. *Veterinary Parasitology*. **237**:1–7.
- Lopes, B.C., Machado, E.C., Rodrigues, H.F., Leal, C.D., Araújo, J.C. y Teixeira de Matos, A. 2018. Effect of alkaline treatment on pathogens, bacterial community and antibiotic resistance genes in different sewage sludges for potential agriculture use. *Environmental Technology*. **41**(4):529–538.
- Maya, C., Ortiz, M. y Jiménez, B. (2010). Viability of *Ascaris* and other helminth genera non larval eggs in different conditions of temperature, lime (pH) and humidity. *Water Science and Technology*. **62**(11):2616–2624.
- Méndez Contreras, J.M., Jiménez Cisneros, B.E. y Salgado Velázquez, G. 2002. Efecto del amoníaco en la estabilización alcalina de lodos residuales. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México.
- Méndez Contreras, J. M., González, C., Alvarado-Lassman, A., Alvarado-Kinnell, G. y Martínez-Delgadillo, S. (2008). Fecal bacteria survival in ammonia-treated wastewater dewatered sludges. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **7**(3):229–235.

- Méndez-Contreras, J.M., Atenodoro-Alonso, J., Vidal-Rosas, G. y Martínez-Delgadillo, S. 2012. Efecto de la dosis y temperatura (DT) generados en el proceso de estabilización alcalina de lodos residuales. XXXIII Encuentro Nacional y II Congreso Internacional AMIDIQ. San José del Cabo, BCS, México.
- Migliore, S., Puleio, R., Gaglio, G., Vicari, D., Seminara, S., Sicilia, E.R. y Loria, G.R. 2021. A Neglected Parasite: *Macracanthorhynchus hirudinaceus*, First Report in Feral Pigs in a Natural Park of Sicily (Southern Italy). *Frontiers in Veterinary Science*, **8**.
- Montero-López, E.M., Martínez-Gamba, R.G., Herradora-Lozano, M.A., Ramírez-Hernández, G. y Martínez-Rodríguez, R. 2015. Alternativas para la producción porcina a pequeña escala. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. México.
- Murillo, M. 2016. Determinación de parámetros cinéticos en la inactivación de *Trichuris suis* y remoción de compuestos orgánicos a nivel planta piloto. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Orizaba. México.
- Musto, A., Bosisio, N., Iserte, J., Orellana, M., Rota, R., Ramírez, E. y Stephan, B. 2013. Manual de Microbiología y parasitología. Universidad Nacional Arturo Jauretche. Buenos Aires, Argentina.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Norma Oficial Mexicana, Protección Ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- OCDE 2019. Exámenes de mercado en México. Estudio de caso del mercado de la carne de cerdo. www.oecd.org.htm (consultado mayo, 2020).
- OMS. 2020. HelminCIAS transmitidas por el suelo. www.who.int (consultado abril, 2020).
- Pérez-Pérez, T., Pereda-Reyes, I., Oliva-Merencio, D. y Zaiat, M. 2016. Anaerobic digestion technologies for the treatment of pig wastes. *Cuban Journal of Agricultural Science*. **50**(3):343–354.
- Pittman, J.S., Shepherd, G., Thacker, B.J. y Myers, G.H. 2010. *Trichuris suis* in finishing pigs: Case report and review. *Journal of Swine Health and Production*. **18**(6):306-313.

- Pompeo, R.P., Andreoli, C.V., De Castro, E.A. y Aisse, M.M. 2016. Influence of Long-Term storage operating conditions on the reduction of viable *Ascaris* Eggs in sewage sludge for agricultural reuse. *Water, air, and soil Pollution*, **227**.
- Robles, I., Becerra, E., Barrios, J.A., Maya, C., Jiménez, B., Rodríguez, J., Godínez, L.A. 2020. Inactivation of helminth eggs in an electro-Fenton reactor: Towards full electrochemical disinfection of human waste using activated carbon. *Chemosphere*. **250**:126260.
- Romero-Mota, D.I., Méndez-Contreras, J.M., Alvarado-Lassman, A. y Vallejo-Cantú, N.A. 2017. Acción fermentativa de *Lactobacillus*: *acidophilus*, *fermentum* y *reuteri* en la bioconversión de sustratos orgánicos. *Journal CIM*. **5**(2):1380-1385.
- Senecal, J., Nordin, A. y Vinnerås, B. 2020. Fate of ascaris at various pH, temperature and moisture levels. *Journal of Water and Health*. **18**(3):375–382.
- SIAP. 2020. Gobierno de México. www.gob.mx (consultado abril, 2020).
- Silva-Leal, J., Bedoya-Rios, D. y Torres-Lozada, P. 2013. Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Química Nova*. **36**(2):207–214.
- Vassalle, L., García-Galán, M.J., Aquino, S.F., Afonso, R.J. de C.F., Ferrer, I., Passos, F. y R Mota, C. 2020. Can high rate algal ponds be used as post-treatment of UASB reactors to remove micropollutants? *Chemosphere*. **248**:125969.
- Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A. y Yang, H. 2018. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review. *Water Research*. **143**:608-631.
- Wu, H., Gao, X., Wu, M., Zhu, Y., Xiong, R. y Ye, S. 2020. The efficiency and risk to groundwater of constructed wetland system for domestic sewage treatment - A case study in Xiantao, China. *Journal of Cleaner Production*. **277**:123384.
- Yang, Y., Lin, L., Tse, L.K., Dong, H., Yu, S. y Hoffmann, M.R. 2019. Membrane-separated electrochemical latrine wastewater treatment. *Environmental Science: Water Research and Technology*. **5**(1): 51–59.