



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos  
sólidos municipales. Revisión sistemática**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORES:**

Baca Accostupa, Ebert (ORCID: 0000-0003-0263-2055)  
Farfán Ccama, Rimber Jesús (ORCID: 0000-0002-2178-5658)

**ASESOR:**

Mgtr. Reyna Mandujano, Samuel Carlos (ORCID: 0000-0002-0750-2877)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mi madre por su apoyo incondicional, a mi padre, a mis hermanos que siempre estuvieron ahí y a toda mi familia en general por brindarme su apoyo absoluto por este gran logro en mi vida.

**Baca Accostupa Ebert**

Dedico esta tesis a mi mamá por apoyarme en todo lo necesario para poder llegar a esta etapa de mi vida, que gracias a su esfuerzo y dedicación a mi persona estoy cumpliendo una meta más.

**Farfán Ccama Rimber Jesús**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a mi madre Lucila por su apoyo infinitamente, a mi padre Rene mis hermanos Henry, Fernando, Fabiola y a mis sobrinos Franshresco, Amaya y Mateo por su fuerza y aliento que siempre me brindaron y a mi cuñada Alejandrina que siempre estuvo ahí alentándome a no rendirme y continuar con mis objetivos y metas, si más nada que decir gracias a todos siempre estaré eternamente agradecido, y a todos que creyeron y tuvieron la confianza en mí.

**Baca Acostupa Ebert.**

Agradezco a mi madre por haber estado todos estos años apoyándome y por haber siempre confiado en mí.

**Rimber Jesús Farfán Ccama**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	vii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	4
III. METODOLOGÍA .....	13
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	13
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización .....	13
3.3. Escenario de estudio .....	15
3.4. Participantes.....	15
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	15
3.6. Procedimiento .....	15
3.7. Rigor científico.....	17
3.8. Método de análisis de información .....	17
3.9. Aspectos éticos .....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	19
V. CONCLUSIONES.....	27
VI. RECOMENDACIONES.....	28
REFERENCIAS .....	29
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Mapa de EEUU</i> -----	4
<i>Tabla 2. Modelo conceptual de un sistema de manejo de malezas</i> -----	6
<i>Tabla 3. Uso de pesticidas para el agua años 2013 a 2017</i> -----	8
<i>Tabla 4. Proceso de remediación por pesticidas</i> -----	11

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Generación de RSU (kg/cápita/día) por varias regiones del mundo</i>	4
<i>Figura 2. Contaminación del medio ambiente por residuos sólidos municipales no tratados</i>	6
<i>Figura 3. Tipos de tratamientos de RSU</i>	8

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

*Gráfico 1. Procedimiento de Selección de Investigaciones*\_\_\_\_\_ 16

## RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta una metodología de tipo aplicada de diseño narrativo de tópico, siendo para la resolución del análisis de los aspectos más relevantes de las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales, necesario el filtro de selección, la técnica de análisis documental y el instrumento aplicado.

Donde la comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico señala que, las técnicas usadas son la torrefacción, pirolisis, gasificación y combustión o incineración y los procesos usados por las técnicas que permiten realizar la comparación de las técnicas son los procesos realizados para la recuperación de energía y materiales de los residuos; siendo estos la atmosfera empleada, la temperatura usada, Productos clave, Termoquímica, tipo de residuo y Tecnología. Además, se pudo comprobar que los fenómenos químicos y físicos fundamentales detrás de las cuatro técnicas son bastante similares, ya que los residuos sólidos, al estar expuestos a altas temperaturas, sufren subprocesos consecutivos similares. Los mecanismos de pirolisis son cuatro; el modelo de mecanismo global de un paso, el mecanismo único multicomponente, el mecanismo competitivo de un componente y el mecanismo detallado. Los modelos de cama de combustibles usados se basan en tres aspectos principales; la metodología aplicada, tipo de cama de combustibles y la dimensionalidad del modelo. Así también, los acoplamientos unidireccional y bidireccional son los más usados; siendo un acoplamiento unidireccional o bidireccional los que puede presentar un modelo de cama separada; es decir, modelo de cama independiente.

**Palabras clave:** Técnicas de tratamiento térmico, reducción de residuos sólidos urbanos, mecanismos de pirolisis

## ABSTRACT

This research work presents a methodology of applied type of topical narrative design, being necessary for the resolution of the analysis of the most relevant aspects of the thermal treatment techniques for the reduction of municipal solid waste, the selection filter, the documentary analysis technique and the applied instrument.

Where the comparison of the processes used in the thermal treatment techniques points out that, the techniques used are torrefaction, pyrolysis, gasification and combustion or incineration and the processes used by the techniques that allow to make the comparison of the techniques are the processes carried out for the recovery of energy and materials from the waste; being these the atmosphere used, the temperature used, Key products, Thermochemistry, type of waste and Technology. In addition, it was found that the fundamental chemical and physical phenomena behind the four techniques are quite similar, since solid wastes, when exposed to high temperatures, undergo similar consecutive sub-processes. The pyrolysis mechanisms are four; the one-step global mechanism model, the single multicomponent mechanism, the one-component competitive mechanism and the detailed mechanism. The fuel bed models used are based on three main aspects; the methodology applied, type of fuel bed and the dimensionality of the model. Also, unidirectional and bidirectional couplings are the most used; being a unidirectional or bidirectional coupling the ones that can present a separate bed model; that is, independent bed model.

**Keywords:** Thermal Treatment Techniques, Reduction of Municipal Solid Waste, pyrolysis mechanisms

# I. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos municipales (MSW) son una serie de materiales heterogéneos que contienen principalmente desechos de jardín, papel de oficina, periódicos impresos corrugados, desechos de cáscaras de frutas y vegetales, desechos de hojas, desechos de alimentos y hojarasca, entre los cuales los desechos de alimentos representan la mayor parte de la fracción orgánica de los RSU (Ghosh P. et al., 2020, p.89).

A nivel mundial es un problema punzante y generalizado tanto en áreas urbanas como rurales, tanto en países desarrollados y en desarrollo (Abdel-Shafy H. et al., 2018, p.1). En 2016, la población urbana generó 2010 millones de toneladas de desechos sólidos, y cada persona contribuyó con aproximadamente 0,74 kg/día (Khan M. et al., 2016, p.237).

Por otro lado, en Estados Unidos, la suma de los principales componentes orgánicos, como papel, desechos de jardín, desechos de alimentos, caucho, madera y plásticos, superó el 83 % en 2013, que fue el componente más importante de los MSW (Adhikari S. et al., 2018, p.239) y en 2010 se generaron 250 millones de toneladas de MSW de los cuales se obtuvo mayor cantidad de desecho de papel y carbón (28.5%) (Funk K. et al., 2020. p.385).

A pesar de las estrictas condiciones restrictivas para reducir las emisiones de las instalaciones de tratamiento de desechos sólidos, persisten los conflictos y las preocupaciones por los olores desagradables (Liu Y. et al., 2016, p.1).

De los cuales, las emisiones de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) se han relacionado con molestias que afectan en la salud humana tanto para los trabajadores en el sitio como para las personas que viven en las áreas circundantes (Nunes M. et al., 2021, p.1).

Estas afecciones incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación del suelo, los malos olores, la contaminación subacuática y la propagación de enfermedades, entre otras (Díaz-Barriga-Fernández A. et al., 2018, p.1).

Es así como la liberación y el transporte de lixiviados de los vertederos de desechos sólidos municipales representan un peligro potencial para los ecosistemas circundantes (Samadder S. et al., 2017, p.1).

Para el ser humano las posibles complicaciones son cáncer, irritaciones respiratorias, y el daño al sistema nervioso central relacionados con la exposición a HAP, incluso en bajas concentraciones (Rostami R. et al., 2019, p.1).

En la actualidad, el tratamiento térmico de los MSW en un incinerador puede generar calor, combustible o gas; ante ello, la tecnología de conversión térmica de MSW se realiza principalmente a través de tres vías (incineración, pirolisis y gasificación), incluida la conversión de energía térmica en energía eléctrica (Kumar A. et al., 2017, p.177).

Es así como el tratamiento térmico es considerado como un método eficaz para disminuir los residuos sólidos municipales y producir material secundario con buenas propiedades de utilización (Chen Z. et al., 2021, p.1).

Es así que, de acuerdo a lo detallado y la realidad problemática expuesta, se propone el siguiente problema general:

**¿Cuáles son los aspectos más relevantes de las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales?**

**PE1:** ¿Cuál es la comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales?

**PE2:** ¿Cuáles son los mecanismos de pirolisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales?

**PE3:** ¿Cuáles son los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales?

A causa de ello se genera el problema de estudio, **Analizar cuáles son los aspectos más relevantes de las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales;** y como objetivos específicos:

**OE1:** Clasificar la comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales

**OE2:** Describir cuáles son los mecanismos de pirolisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales

**OE3:** Detallar cuáles son los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales

La presente investigación, presenta una justificación teórica, debido que a la búsqueda y recolección de estudios literarios traten sobre las técnicas de tratamiento térmico, teniendo como objeto ampliar los conocimientos sobre los residuos sólidos municipales; por tal motivo se realizará una revisión sistemática de los estudios más recientes que se encuentren enfocadas en la problemática planteada para servir como un aporte a los futuros investigadores.

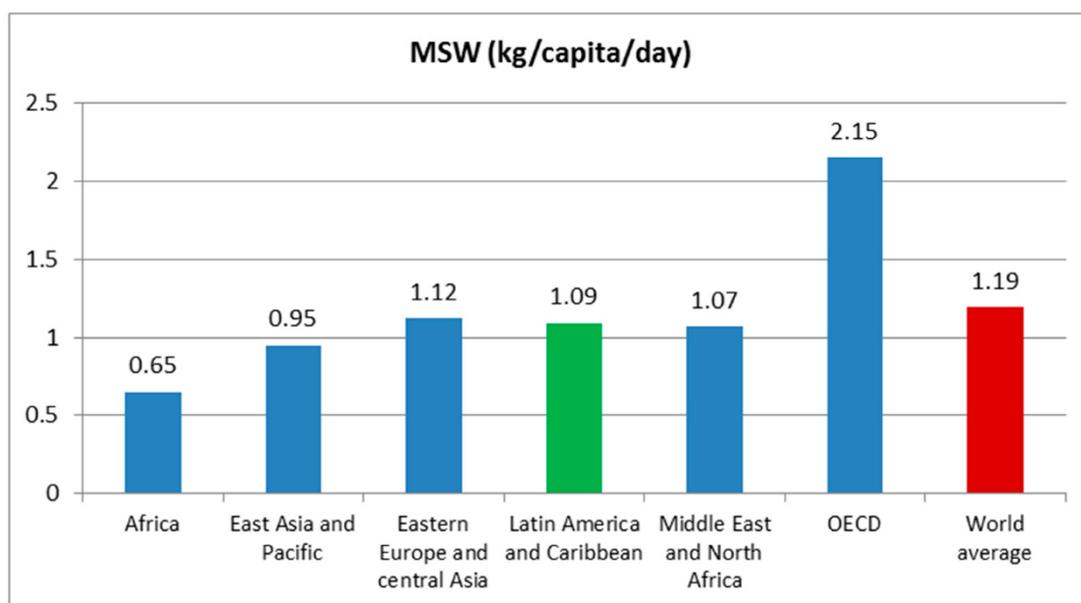
## II. MARCO TEÓRICO

El aumento significativo en la generación de residuos, la falta de planes de gestión sostenible de residuos y sus políticas de implementación, son responsables de causar daños ambientales como la contaminación del suelo, el agua y el aire, la contaminación de plantas y animales y la generación de olores (Awasthi M. et al., 2019, p.79). Los desechos que terminan en vertederos causan basura y emisiones de gases de efecto invernadero responsables de causar problemas relacionados con la salud y daños ambientales (Ibrahim M. et al., 2016, p.2).

En todo el mundo, las economías en desarrollo han sido testigos de la tendencia de la población rural a migrar áreas urbanas en busca de empleo, mejores instalaciones y comodidad (Woolridge A. y Hoboy S., 2019, p.518). Esto ha llevado a un aumento significativo en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) (Khan S. et al., 2018, p.1).

Siendo que en todo el mundo se generó 2010 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) en el año 2016 y de acuerdo al Banco Mundial para el 2050 se incrementará 1,7 veces la cantidad (Edwards J. et al., 2018, p.2). Además, en Europa, el total de RSU generado por los países de la UE-28 ascendió a 167,10 millones de toneladas en 2016 y se ha mantenido estable desde 2012 (Iqbal A. et al., 2020, p.4).

*Figura N°1: Generación de RSU (kg/cápita/día) por varias regiones del mundo*



*Fuente: Hettiarashshi H. et al., (2018)*

América Latina y el Caribe (ALC) es una región que alberga a más de 600 millones de personas (Cepal N. et al., 2016, p.1). Y como se muestra en la figura 1 las estadísticas de gestión de RSU en los países de ALC tienen algunas diferencias notables en comparación con otras regiones del mundo (Botello Álvarez J. et al., 2018, p.2). La generación de RSU en ALC es de 1,09 kg/cápita/día, lo que mantiene a ALC a la par con la región de Europa del Este y MENA.

Los países de América Latina han sido también testigos de un aumento significativo de la población urbana y de la generación de residuos (Hettiarachchi H. et al., 2018, p.2). Siendo definido por la Directiva Europea 2008/98/EC al residuo como “cualquier sustancia u objeto, que el poseedor desecha o tiene la intención o la obligación de desechar” (Van Caneghem Jo et al., 2019, p.4).

Así mismo, los residuos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de residuos, como se muestra en la Tabla 1.

*Tabla N°1: Tipos de residuos y métodos de tratamiento según las normas de la Unión Europea (UE)*

<b>Tipos de residuos</b>
Residuos municipales (domésticos y comerciales)
Residuos industriales (incluida la fabricación)
Residuos peligrosos
Residuos de construcción y demolición
Residuos mineros
Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
Residuos de embalaje
Vehículos y neumáticos al final de su vida útil
Residuos agrícolas
Residuos municipales biodegradables

*Fuente: Ojovan M. et al., (2019)*

Así también, los residuos se pueden clasificar en diferentes secciones según el estado físico (sólido, líquido, gaseoso), la fuente (comercial, residencial, agrícola, urbana) y la composición química (peligrosos/no peligrosos). Entre estos RSU se define como los residuos recogidos de las zonas urbanas y eliminados por los organismos municipales (Ikhlal M., 2018, p.4).

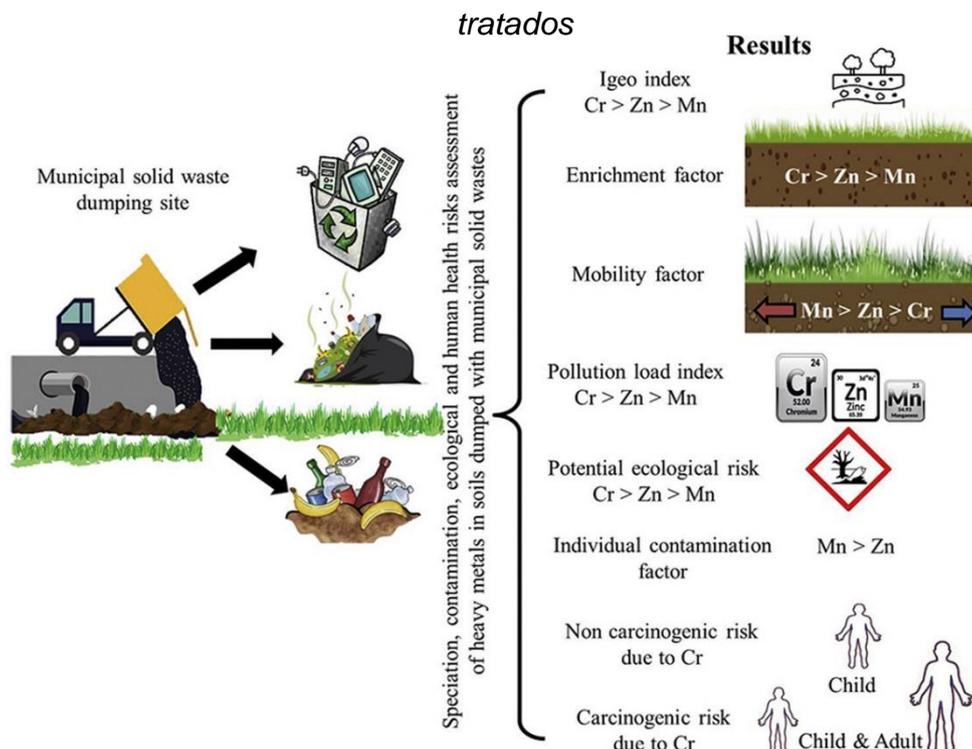
Siendo que los residuos sólidos municipales (MSW) son un conjunto de diversos residuos sólidos por pueblos y ciudades de diferentes tipos de actividades domésticas

(Niazi Nabeel Khan et al., 2016, p.3). Conteniendo principalmente desechos de jardín, papel de oficina, periódicos impresos corrugados, desechos de cáscaras de frutas y verduras, desechos de hojas, desechos de alimentos y hojarasca, entre los cuales los desechos de alimentos representan la mayor parte de la fracción orgánica de los RSU (Ghosh Pooja et al., 2020, p.3).

Las áreas urbanas sustentan al 56 % (4130 millones) de la población mundial total y representan el 80 % de la producción mundial, el 75 % del consumo de recursos, así como la mayor parte de la producción de desechos sólidos (King Kameron J., 2021, p.7). Es así que estos números establecen una correlación directa entre el crecimiento de la economía y el deterioro ambiental (Follador M. et al., 2019, p.20).

Donde del total de los residuos sólidos generados a nivel mundial el 70% termina en vertederos, el 19% se recicla y solo el 11% se emplea para la generación de energía (Sahí G. et al., 2021, p. 2). Siendo que, en los países en desarrollo, la eliminación no científica de los RSU es un problema medioambiental y sanitario de primer orden (Tsai Feng M. et al., 2020, p.3). Siendo así que en la Figura 2 se muestra la contaminación del suelo, los posibles riesgos ecológicos y efectos para la salud asociados con la eliminación de desechos sólidos municipales (RSU).

*Figura N°2: Contaminación del medio ambiente por residuos sólidos municipales no tratados*



Fuente: Gujre Nihal et al., (2021)

Como consecuencia entre los efectos se provoca la contaminación del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas (Alam Pervez et al., 2020, p.2).

Ello debido a que los contaminantes como los metales pesados (HM) en el suelo son tóxicos para las plantas, los animales y los seres humanos, además, una exposición más prolongada conduce a la biomagnificación (Gao Meng et al., 2019, p.1).

Los RSU suelen contener HM tóxicos y cancerígenos en diferentes formas que pueden filtrarse al suelo y a las masas de agua (Vyas Shaili et al., 2022, p.4). El arsénico (As), el cadmio (Cd), el cromo (Cr) y el níquel (Ni) están clasificados como carcinógenos del grupo 1 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, que también son tóxicos por naturaleza (Singh Pooja et al., 2020, p.1).

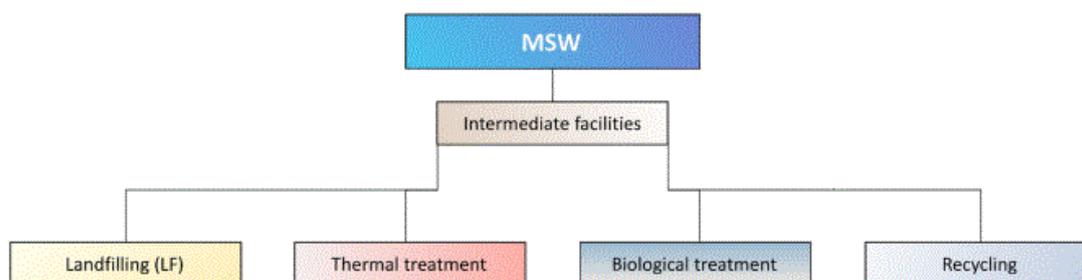
Además, el enriquecimiento de HMs puede causar graves riesgos ecológicos al ser absorbidos por diferentes organismos acuáticos, entrando así en la compleja cadena alimentaria (Dash Siddhant et al., 2019, p.3). También tiene impactos directos en el funcionamiento de las enzimas del suelo y la biomasa microbiana (Zhang Chang et al., 2016, p.1).

Dentro de la pedosfera, los HM no solo degradan la calidad del suelo, sino que también se inmiscuyen y dificultan el crecimiento de la comunidad microbiana (Lin Yaoben et al., 2019, p.2). Por ejemplo, el plomo (Pb) y el Zn tienen efectos perjudiciales en las bacterias el Cd impacta en la población de hongos y el Cr afecta a la diversidad bacteriana del suelo (Pan Xiaomei et al., 2020, p.1).

Además, en los seres humanos, la exposición prolongada a los suelos contaminados tiende a afectar negativamente al sistema nervioso central, gástrico y respiratorio (Khanam rubina et al., 2019, p.1). Además, estudios anteriores han informado de que la exposición prolongada a HMs como Cr, Cd y Ni puede provocar alergia asma, dermatitis, diarrea o incluso cáncer de pulmón (Moreira Leo et al., 2018, p.1).

Se tienen diferentes técnicas de tratamiento de los residuos sólidos municipales, presentándose en la figura 3.

Figura N° 3: Tipos de tratamientos de RSU



Fuente: Iqbal A., Liu X. y Chen G., (2020)

En los procesos de gestión de residuos se utilizan diversas tecnologías de tratamiento de residuos en todo el mundo como se puede observar en la figura 3.

Desde la separación en origen hasta el reciclaje, el tratamiento y la eliminación final, las de la fuente, el reciclaje, las tecnologías implicadas van desde los métodos básicos, por ejemplo, el vertido/quema a cielo abierto, hasta los métodos de tratamiento avanzados, como la ingeniería (Tseng Chao et al., 2019, p.2).

Ante estos tratamientos es debido señalar que la fracción combustible de los RSU puede considerarse como una mezcla de materiales lignocelulósicos (es decir, que contienen celulosa, hemicelulosa y lignina), plásticos y algunos otros materiales como caucho/llantas y componentes orgánicos de baja estabilidad (Khodaei H. et al. 2016, p.3). Donde el análisis termogravimétrico (TGA) es el método más utilizado para estudiar el comportamiento de descomposición de los RSU (Haberle Inge et al., 2017, p.5).

Según estudios de TGA, la descomposición de los RSU puede tener lugar en dos a cinco etapas y las dos grandes etapas corresponden a la desvolatilización de la fracción celulósica y hemicelulosa (250 - 400 °C) y de los plásticos libres de cloro (350 - 500 °C); estas dos etapas también se superponen con la degradación del PVC (Chhabra V. et al., 2016, p.3).

Se presenta a continuación los estudios a nivel mundial de artículos científicos que traten de los tratamientos térmicos para la disminución de residuos sólidos municipales:

Gu Tianbao et al., (2019); en este artículo, se desarrolló un modelo integral para simular la incineración de desechos sólidos en un lecho empacado, que avanza el estado del arte con condiciones de contorno corregidas, reacciones homogéneas y método de cálculo para productos de pirólisis. El modelo se valida primero mediante un problema analítico simplificado. Entonces, el modelo está validado en detalle por un estudio experimental dedicado en la literatura, en el que el frente de pirólisis y combustión de gas y el posterior frente de oxidación del carbón se propagan desde la superficie del lecho hasta la parrilla debido a la abundante disponibilidad de oxígeno en el lecho de combustible. Donde los resultados señalan que El mecanismo de combustión en el lecho depende de las propiedades de la materia prima y del caudal de aire primario, además, las bajas presiones de operación pueden retrasar notablemente el agotamiento del lecho de combustible empaquetado.

Lai Adrián et al., (2019); en su estudio tiene como objetivo abordar esta brecha mediante el desarrollo de un modelo numérico de lecho de residuos de incineradores. Se ha desarrollado un modelo lagrangiano unidimensional para el lecho de residuos de incineración, que se puede acoplar al modelo CFD del horno. Los cambios en la masa del lecho debido al secado, la pirolisis, la desvolatilización y la oxidación del carbón están todos incluidos en el modelo. También se predicen la masa y la concentración de los gases producidos en estos procesos a través de las reacciones. Las ecuaciones unidimensionales de energía no estacionaria de las fases sólida y gaseosa, que representan la radiación del horno, la conducción, la convección y el calor de las reacciones, se resuelven mediante el método del volumen de control. Los cambios en la masa del lecho debido al secado, la pirolisis, la desvolatilización y la oxidación del carbón se explican de forma explícita utilizando varias ecuaciones de Arrhenius establecidas en la literatura.

Xia Zihong et al., (2020); en su documento, desarrolla un modelo integral de reacción de dos fluidos que integra la incineración de parrilla de gas sólido y la combustión turbulenta de gas en un esquema para incineradores industriales. Se logra una geometría de rejilla realista y un acoplamiento simultáneo directo del lecho de combustible y la fase de gas libre. De acuerdo con los diferentes tratamientos de la fase sólida, todo el incinerador se divide en tres regiones, a saber, la región del lecho empacado, la región de caída y la región del horno. Se introduce la teoría cinética del flujo granular (KTGF) para describir las propiedades ecológicas de las partículas de desecho, y se utiliza el modelo de Ergun para el arrastre gas-sólido. La conversión

térmica de los desechos se caracteriza por reacciones heterogéneas de evaporación de humedad, desvolatilización, char-O<sub>2</sub> combustión y las reacciones homogéneas de combustión de hidrocarburos.

Kuwagi Kenya et al., (2016); en su estudio desarrolló un código de simulación basado en el método de elementos discretos (DEM) y el modelo de acoplamiento de dinámica de fluidos computacional (CFD) para simular el comportamiento del cesio radiactivo en incineradores de desechos. El bulto de desecho fue representado por partículas en la simulación. La ecuación de energía para un gas mixto, la ecuación de difusión para cada componente del gas, así como las ecuaciones de energía, secado, pirolisis y combustión para cada partícula se resolvieron en la simulación agregando un modelo de combustión al modelo estándar de acoplamiento DEM-CFD. El tamaño de partícula de los desechos cambió a medida que avanzaba el secado, la pirolisis y la combustión. Al final del proceso de combustión, los desechos de partículas se convirtieron en cenizas y la cantidad de partículas de ceniza fue enorme.

Wissing F. et al., (2017); en su trabajo presenta un enfoque inicial del uso de un método basado en partículas (Método de elementos discretos, DEM) para simular la incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) en parrillas. Se han formulado modelos para secado, liberación de volátiles y conversión de carbón. Los volátiles liberados se convierten en el horno sobre el lecho de residuos que se ha calculado con FLUENT. Una comparación de simulaciones con mediciones en una planta de incineración de RSU existente de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y temperaturas por encima de la cama se presenta. Los resultados demuestran que el enfoque desarrollado brinda una nueva visión de la compleja interacción del movimiento de desechos, la conversión de desechos y la combustión en fase gaseosa sobre el lecho que no se puede obtener con otros enfoques, como los modelos continuos para la cama de residuos.

Matzing Hartmut et al., (2018); en su artículo utiliza un modelo de reactor en cascada para la simulación numérica de la combustión en lecho fijo de biomasa, residuos sólidos municipales y otros combustibles de bajo rango. Se presenta un procedimiento numérico simplificado que permite estimar la estructura de un lecho de combustible que se mueve sobre la parrilla, así como la temperatura y composición del gas sobre el lecho. Estos datos sirven como entrada para aplicaciones CFD separadas que simulan el flujo de gas a pequeña escala y en plantas de energía a

escala industrial junto con los procesos de transferencia de calor asociados. Los resultados muestran que la aplicación CFD se demuestra para instalaciones a escala industrial.

Sun Rui et al., (2016); Este trabajo presenta experimental y numéricamente el efecto de los tamaños simulados de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el proceso de combustión en lecho fijo. El efecto de la temperatura, las emisiones de gases, la velocidad del frente de llama y la velocidad del proceso se analizan para tres tamaños diferentes de RSU: 10, 30 y 50 milímetro. El estudio encontró que, para las condiciones operativas del modelo actual, cuando se reduce el diámetro de las partículas, aumenta la densidad aparente del material, lo que resulta en una disminución de la transferencia de calor por convección y de la velocidad de combustión. Los resultados también muestran que la concentración de emisión promedio de CO y CO<sub>2</sub> disminuye gradualmente con un aumento en el tamaño del diámetro de las partículas.

Sun Rui et al., (2015); empleó un modelo numérico para simular el proceso de combustión en un lecho poroso fijo de residuos sólidos urbanos (RSU). Se establecieron ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y especies del lecho de desechos para describir el proceso de incineración. La tasa de evaporación de humedad, desvolatilización de materia volátil, combustión de carbón, NO<sub>x</sub> la producción, reducción y formación de dioxinas se calcularon y establecieron de acuerdo con las condiciones térmicas locales y las características de las propiedades de los residuos. Los cambios en el volumen del lecho durante la incineración se calcularon según la velocidad de reacción del proceso. Los resultados de la simulación se compararon con los datos experimentales, lo que demuestra que el proceso de incineración de residuos en el lecho fijo fue razonablemente simulado; además, los resultados de la simulación de la pérdida de peso y la temperatura del sólido en el lecho concuerdan con los datos experimentales, que muestran que la tasa de combustión de los desechos es casi constante en medio del proceso de incineración y que la evaporación de la humedad ocupa la mayor parte del tiempo de la incineración general.

Kang Yating et al., (2022); este estudio desarrolla un inventario de series temporales largas de emisiones de GEI (incluidos CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O) de RSU para 294 ciudades chinas a nivel de prefectura. El modelo de índice de divisia media logarítmica temporal y espacial (LMDI) se utiliza además para revelar los impulsores detrás del cambio y

la diferencia de emisiones. Los resultados mostraron que las emisiones domésticas de GEI del tratamiento de RSU aumentaron de 39,24 Mt CO<sub>2</sub> e en 2006 a 128,81 Mt CO<sub>2</sub> e en 2019, de las cuales entre el 63,41 % y el 88,95 % fueron emisiones de CH<sub>4</sub> que representan entre el 8,13 % y el 10,22 % del total de CH<sub>4</sub> de China emisiones Las ciudades de primer nivel y las nuevas ciudades de primer nivel (6,44 %) contribuyeron con el 35,44 % de las emisiones nacionales en 2019. Además, el aumento de las emisiones nacionales se debió principalmente a la producción económica (66,09 %), mientras que la intensidad del tratamiento de RSU por PIB provocó emisiones reducción en un 5,23%.

Voss Raoul et al., (2021); este estudio evalúa los impactos ecológicos y económicos asociados con el reciclaje químico de los desechos sólidos municipales residuales en Alemania. Combinando enfoques de evaluación del ciclo de vida y análisis tecnoeconómico, Las vías de tratamiento basadas en el reciclaje químico y la incineración convencional se evalúan comparativamente en términos de potencial de calentamiento global y desempeño económico (es decir, inversión de capital fijo, valor actual neto, período de recuperación dinámico y costo nivelado de reducción de carbono). Los resultados indican que, en comparación con las vías convencionales basadas en la incineración, el reciclaje químico puede contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas energéticos de bajas emisiones. Sin embargo, el rendimiento económico del reciclaje químico depende en gran medida de su escala de operación.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

Las investigaciones científicas nos permiten resolver dudas e incertidumbres sobre los fenómenos que suscitan en nuestro día a día. Pasar la teoría a la práctica lleva a las investigaciones a un grado más alto de generar conocimientos por ellos existen diferentes tipos de investigaciones.

La investigación aplicada se centra en investigar un fenómeno o hecho en específico, esta aplica directamente en los problemas para la generación de conocimientos a través de los hechos dados en la realidad, dado que esta depende de sus descubrimientos y teorías generadas se vincula estrechamente con la investigación pura (Tamayo y Tamayo, 2006).

En el presente estudio se usó este tipo de investigación debido a que se espera resolver la disminución de residuos sólidos municipales a través de los resultados que se obtuvieron en la investigación.

Diseño narrativo: el investigador describe lo sucedido como es narrado por los participantes quienes tuvieron contacto directo o vivieron el hecho a investigar donde la descripción de los hechos se traspa a través del investigador sin ser tergiversado. (Hernández, 2016, p.702). Por ello en el presente estudio se aplicó el diseño narrativo, ya que, la información recolectada y recopilada se mantiene como en su origen y se evitó emitir juicios al usar la información de los artículos científicos tomados para el desarrollo del presente estudio.

Diseño narrativo de tópicos: el presente trabajo presenta este diseño ya que se tomó un tema en específico a investigar (Mertens, 2005), a través de la recolección de diferentes fuentes con el tema en específico.

#### **3.2 Categorías, subcategoría y matriz de categorización apriorística**

Las categorías y sub categorías fueron planteados de acuerdo a los objetivos específicos como se muestran en la Tabla N°2

Tabla N° 2: Matriz de Categorización Apriorística

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Problemas específicos</b>	<b>Categoría</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Unidad de análisis</b>
<b>Clasificar la comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales</b>	¿Cuál es la comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales?	Comparación de tratamientos térmicos para la disminución de residuos sólidos (Chen Z. et al., 2021, p.1)	Torrefacción	(Matsakas Leonidas et al., 2017, p.2), (Pan Xiaomei et al., 2020, p.1), (Chhabra V. et al., 2016, p.3).
			Pirolisis	
			Gasificación	
<b>Describir cuáles son los mecanismos de pirolisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales</b>	¿Cuáles son los mecanismos de pirolisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales?	Mecanismos de pirolisis para los residuos sólidos (Gu Tianbao et al., 2019)	Modelo de mecanismo global de un paso	(Wissing F. et al., 2017, p.1), (Lin Yaoben et al., 2019, p.2), (Khodaei H. et al. 2016, p.3).
			Mecanismo único multicomponente	
			Mecanismo competitivo de un componente	
<b>Detallar cuáles son los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales</b>	¿Cuáles son los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales?	Modelos de cama de combustible para los residuos sólidos (Gu Tianbao et al., 2019)	Mecanismo detallado	(Dash Siddhant et al., 2019, p.3), (Tseng Chao et al., 2019, p.2), (Kuwagi Kenya et al., 2016, p.2).
			Modelos de medio poroso continuo	
			Modelos de fase discreta	
			Otros modelos	

Elaboración propia

### **3.3 Escenario de estudio**

El uso de artículos científicos nos presentó diferentes escenarios que se consideraron como escenario de estudio del presente trabajo de investigación, por ello, las bibliotecas, campos y/o laboratorios usados en la información recopilada fueron tomadas como escenario de estudio.

### **3.4 Participantes**

El estudio presentado es una revisión sistemática por ellos los participantes de este son todas las plataformas visitadas y de donde fueron usadas la información que ayudo a la realización de la investigación. La biblioteca virtual y/o red de revistas científicas como Sciencedirect, Redalyc y Pubmed son las participantes.

### **3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

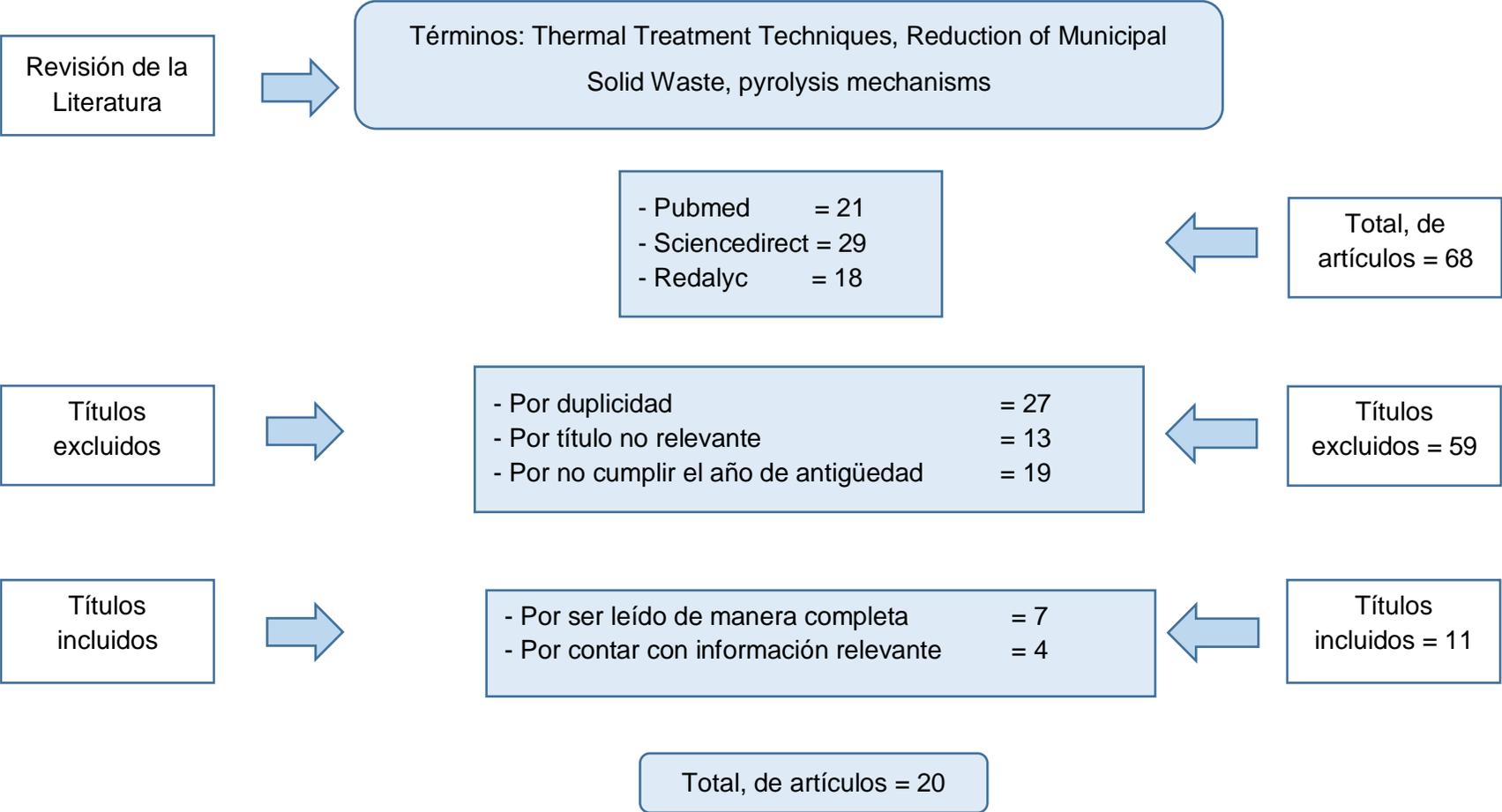
Análisis documental: a través de esta técnica se generó un nuevo documento que permitirá recolectar toda información relevante ayudando al lector a encontrar la información o documento original. En el presente trabajo se hizo un análisis de toda la información recopilada de los artículos científicos ahondando en los datos más importantes que ayudaron al desarrollo del estudio.

Para concretar el análisis documental se hizo uso de la ficha de análisis de contenido que nos permitió identificar los documentos a través de la descripción bibliográfica.

### **3.6 Procedimientos**

El proceso de selección se dio mediante las palabras claves tal como se muestra en el Grafico N°1.

Gráfico N° 1: Procedimiento de Selección de Investigaciones



Elaboración propia

### **3.7 Rigor científico**

La investigación debe cumplir con ciertos criterios que reflejen la originalidad de su información. Los criterios considerados y que contemplan a la originalidad son:

**Criterio de credibilidad:** este criterio nos permite saber a través de los resultados que los hechos descritos en la investigación son verdaderos y no fueron alterados, ya que se verán ligados estrechamente los resultados con los hechos, donde los participantes podrán reconocer a través de los resultados los sucesos que vivieron con el fenómeno a estudiar (Hamberg, 1994, p.177). Por ello se aplicó este criterio en el presente estudio donde se puede ver los resultados estrechamente relacionado con la recopilación de datos.

**Criterio de confirmabilidad:** se lleva a través de este criterio una investigación neutral donde el investigador no cambia la realidad de los hechos al describir el entorno, el tiempo, el contexto, participantes entre otros, es decir se plasma la realidad tal y como es (Hamberg, 1994, p.179). En el presente trabajo debido a la descripción real que se hizo de los datos recopilados como en su origen se cumplió con este criterio.

**Criterio de dependencia:** en este criterio el estudio puede ser llevado a otros contextos y arrojar los mismos resultados. Los fenómenos surgen en contextos concretos y en un tiempo determinado, si bien estas características son explícitamente relacionadas (Hamberg, 1994, p.177), a través de este criterio el estudio se adapta al entorno cambiante. Debido a ello el presente trabajo de investigación aplico este criterio permitiendo el uso del presente estudio por otros en sus diferentes entornos.

**Criterio de transferibilidad:** las conclusiones o resultados obtenidos en una investigación pueden ser reconocibles con otras investigaciones, es decir si bien no se pueden generalizar los resultados para todos los casos estudiados, los resultados son la interpretación de lo investigado donde se puede comparar los resultados con otras investigaciones (Hamberg, 1994, p.179). Este criterio fue aplicado en la presente investigación a través de sus resultados razonables donde las conclusiones pueden ser interpretadas por el lector.

### **3.8 Método de análisis de información**

La recolección de datos para el presente estudio de investigación fue base los procedimientos de selección de investigación, el cual se realizó con la matriz apriorística, el cual emplea 3 categorías y 11 Sub categorías.

- Categorías: Mecanismos de pirolisis para los residuos sólidos, Tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos, Modelos de cama de combustible para los residuos sólidos.
- Sub categoría; Torrefacción, Pirolisis, Gasificación, Combustión; Modelo de mecanismo global de un paso, Mecanismo único multicomponente, Mecanismo competitivo de un componente, Mecanismo detallado; Modelos de medio poroso continuo, Modelos de fase discreta, Otros modelos.

### **3.9 Aspectos éticos**

El presente estudio cumple con la originalidad, respeto a la autoría y cumplimiento de la guía de productos observables de la Universidad Cesar Vallejo. A través del uso de la ISO 690 se cumplió con la originalidad de las referencias bibliográficas. Además, el trabajo paso por el programa Turnitin indicando este la originalidad de la información presentada.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al objetivo de estudio de analizar cuáles son los aspectos más relevantes de las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales se tiene que, se realizó una comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales y se clasificó en la tabla 3.

*Tabla N° 3: procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico*

	<b>Torrefacción</b>	<b>Pirolisis</b>	<b>Gasificación</b>	<b>Combustión (es decir, incineración)</b>	<b>Ref.(s)</b>
<b>Atmósfera</b>	Atmósfera inerte	Deficiente en oxígeno	Oxígeno limitado	Exceso de oxígeno	Matsakas L. et al., (2017), Beyene H. et al., (2018)
<b>Temperatura</b>	200–350 °C	300–1300 °C	800–1200 °C	750–1100 °C	Matsakas L. et al., (2017), Beyene H. et al., (2018)
<b>Presión</b>	–	1 barra	1 - 45 barras	1 barra	(Neuwhl F. et al., 2019)
<b>Productos clave</b>	Carbonizar se	Char + combustible líquido (alquitrán) + gas de síntesis	Syngas (CO, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , HC ligeros)	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O + calor	Matsakas L. et al., (2017)
<b>Termoquímica</b>	endotérmico	endotérmico	Exotérmico	Exotérmico	Matsakas L. et al., (2017)
<b>Velocidad de</b>	–	Lenta (10 °C/min); Rápida	–	Intermedio	Matsakas L. et al., (2017)

<b>calentamiento</b>		do (hasta 600 °C/ seg )			al., (2017)
<b>tipo de residuo</b>	Residuos de alimentos, plástico PVC, neumáticos desechados y residuos de madera	RSU tratados (eliminación de vidrio, metal, inertes, contaminantes)	RSU tratados (eliminación de vidrio, metal, inertes, contaminantes)	RSU mixtos	(Makaric hi L. et al., 2019)
<b>Tecnología</b>	Tambor giratorio, reactores de tornillo, horno de solera múltiple, reactor torbed, lecho compacto móvil, secador de banda, reactor de microondas	Horno rotatorio / reactor tubular (instalaciones ampliadas) Reactores de lecho fijo y lecho fluidizado (estudios a escala de laboratorio)	Gasificador de flujo arrastrado, gasificadores de lecho fluidizado, gasificadores ciclónicos, gasificadores de lecho empacado	Lecho fluidizado, lecho en chorro, lecho fijo (horno rotatorio, cocción en parrilla)	Matsakas L. et al., (2017)

*Elaboración propia*

De acuerdo a la clasificación realizada en la tabla 3 de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales se tiene que; las técnicas usadas son la torrefacción, pirolisis, gasificación y combustión o incineración y los procesos usados por las técnicas que permiten realizar la comparación de las técnicas son los procesos realizados para la recuperación de energía y materiales de los residuos; siendo estos la atmosfera empleada, la temperatura usada, Productos clave, Termoquímica, tipo de residuo y Tecnología.

Además, se pudo comprobar que los fenómenos químicos y físicos fundamentales detrás de las cuatro técnicas son bastante similares, ya que los residuos sólidos, al estar expuestos a altas temperaturas, sufren subprocesos consecutivos similares, es

decir, calentamiento, secado, desgasificación (es decir, pirolisis) y combustión. (si hay oxígeno presente).

Así también se tiene que la incineración o combustión es la técnica más utilizada para el tratamiento térmico de los RSU siendo el 100% de los investigadores quienes lo aplican; ello es corroborado por Matsakas L. et al., (2017), Beyene H. et al., (2018), Matsakas L. et al., (2017), (Neuwahl F. et al., 2019), Matsakas L. et al., (2017), Matsakas L. et al., (2017), Matsakas L. et al., (2017), (Makarichi L. et al., 2019), Matsakas L. et al., (2017).

Y ello es respaldado por Beyene H. et al., (2018, p.3), quien menciona que la eficiencia energética bruta global de la incineración de RSU varía desde un 30 % si todo el vapor se utiliza para la producción de electricidad hasta un 80 % si todo el vapor se aplica como fuente de calor y una ventaja de la incineración de desechos es que normalmente reduce la masa de desechos en un 70 % y el volumen en un 90 %.

Al igual que las menciones anteriores Ortiz C. et al., (2021, p.3), manifiesta en su estudio que, la incineración es una técnica simple y probada que ofrece una gran flexibilidad en el tratamiento de combustibles sólidos con una amplia variación en composición, tamaño y propiedades.

Así, las diferencias entre Lombardi L. et al., (2016, p.2), realizó un extenso estudio sobre las diferencias entre incineración, gasificación y pirolisis, donde los estudios científicos muestran que las plantas de incineración y gasificación tienen potenciales de recuperación de energía comparables. Sin embargo, la eficiencia energética general de las plantas de gasificación podría ser menor si se incluye la pérdida de energía durante los procesos de pretratamiento necesarios.

Así también Van Caneghem J. et al., (2019, p.5), señala que, en cuanto a la temperatura de pirolisis, aunque la investigación ha demostrado su potencial, solo hay unas pocas aplicaciones documentadas en la industria, que se restringen a flujos de residuos puros y homogéneos.

Por otro lado, también se buscó describir cuáles son los mecanismos de pirolisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales, para lo cual se realizó la comparación de la tabla 4.

Tabla N° 4: mecanismos de pirolisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de MSW

	<b>Modelo de mecanismo global de un paso</b>	<b>Mecanismo único multicomponente</b>	<b>Mecanismo competitivo de un componente</b>	<b>Mecanismo detallado</b>
<b>Mecanismo</b>	Biomasa → Carbón + Volátiles	Celulosa → Volátiles + Hemicelulosa de carbón → Volátiles + Carbón de Lignina → Volátiles + Carbón	Biomasa → Biomasa volátiles → Biomasa de alquitrán → Carbón de alquitrán → Alquitrán volátil → Carbón	Consideración de reacciones competitivas y paralelas para múltiples componentes, así como reacciones secundarias e interacciones entre productos. No indica
<b>Tasa de expresiones</b>	$\frac{d\rho_{sb}}{dt} = -Ae^{-\frac{E}{RT_s}} \rho_{sb}$	$\frac{d\rho_{si}}{dt} = -Ae^{-\frac{E_i}{RT_s}} \rho_{si}$	$\frac{d\rho_{sb}}{dt} = -\rho_{sb} \sum_i A_i e^{-\frac{E_i}{RT_s}}$	
<b>Aplicabilidad</b>	Predice la tasa de pérdida de masa, los efectos de la temperatura están bien capturados	Predice la tasa de pérdida de masa	Predice la tasa de conversión y los rendimientos del producto cuando se combina con fenómenos de transporte.	No indica
<b>Ventajas</b>	Fácil de implementar	Una descripción más precisa de las curvas de desvolatilización de la biomasa; se puede	Tiene suficiente flexibilidad y precisión para describir el proceso de pirolisis en la combustión de biomasa.	Más comprensivo

			aplicar a varios tipos de biomasa		
<b>Desventajas</b>	No se pueden predecir las variaciones de rendimiento, los datos cinéticos específicos para cada materia prima	Necesita más datos de entrada, no puede incluir la interacción entre componentes	Los datos cinéticos se describen en detalle	Los datos cinéticos se dispersan; la biomasa como reactivo no se describe en detalle	Complicado, requiere más avances y una comprensión más profunda
Fuente	Dernbecher A. et al., (2019)	Mehrabian R. et al., (2016)	Haberle I. et al., (2017)	Khodaei H. et al., (2016)	Ranzi E. et al., (2016)

#### *Elaboración propia*

De acuerdo a la tabla 4 se tiene que los mecanismos de pirólisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales son cuatro; el modelo de mecanismo global de un paso, el mecanismo único multicomponente, el mecanismo competitivo de un componente y el mecanismo detallado.

Ante ello, de acuerdo con Dernbecher A. et al., (2019, p.2), tales mecanismos se clasifican en función de dos puntos; si la biomasa se considera como un pseudocomponente o como una mezcla de componentes (típicamente celulosa, hemicelulosa y lignina) y si la reacción de desvolatilización de cada componente se considera una reacción única o un conjunto de reacciones competitivas; lo que permitiría elegir el mecanismo más simple, detallado y menos complicado.

De acuerdo con los resultados presentados para Dernbecher A. et al., (2019), el modelo de mecanismo global de un paso ha sido ampliamente utilizado en el pasado debido a su simplicidad, además de ser un mecanismo con limitaciones en cuanto a precisión y flexibilidad. Así también lo corroboran Kuwai K. et al., (2016, p.3) y Gu Tianbao et al., (2019, p.2).

Mientras que, el mecanismo competitivo de un componente es apoyado por Haberle I. et al., (2017) quien mencionan como ventajas la suficiente flexibilidad y precisión para describir el proceso de pirólisis en la combustión de biomasa y debido a que se

puede utilizar como biomasas la biomasa volátil, de alquitrán, carbón de alquitrán y carbón. Además, Khodaei H. et al., (2016), afirma que las reacciones secundarias, que implican la descomposición del alquitrán en carbón y gas ligero a altas temperaturas, se incluyeron en algunos de estos modelos de pirolisis.

Pero estudios como Matzing H. et al., (2018, p.3), han señalado la necesidad de incluir la pirolisis de plásticos, posiblemente componentes orgánicos de baja estabilidad y caucho/neumáticos en el modelo de combustión de RSU; ya que, la pirolisis de plásticos solo se incluyó en dos estudios sobre el modelado de lechos de RSU.

Por otro lado, se buscó también detallar cuáles son los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales, para lo cual se elaboró la tabla 5.

*Tabla N°5: modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico*

<b>autor y año</b>	<b>tipo de cama</b>	<b>Escala</b>	<b>materia prima</b>	<b>Metodología</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Equilibrio térmico sólido-gas</b>
<i>Modelos de medio poroso continuo</i>						
<b>Salvador et al. 2010</b>	Un cono de calorímetro estándar	Laboratorio	Cartón + PE	-	1D	Equilibrio térmico
<b>Ismael T. et al. 2016</b>	Parrilla móvil tipo Martin	Industrial	RSU	Modelo multifásico de Euler-Granular	2D	Equi. no térmico.
<b>Sol R. et al. 2017</b>	Camas fijas/móviles	Laboratorio.	Residuos simulados	Modelo multifásico de Euler-Granular	2D	Equi. no térmico.
<b>sol R. et al. 2016</b>	Banco de pruebas de combustión en banco 1-D + lecho móvil	Laboratorio.	Residuos simulados	Modelo multifásico de Euler-Granular	2D	Equi. no térmico.
<b>Gu T. et al. 2019</b>	Plataforma de cama empacada/cama móvil	Laboratorio.	Cartón + patatas	código BÁSICO	1D	Equilibrio térmico

<b>Lai A. y Law W., 2019</b>	cama móvil	Laboratorio.	Residuos simulados	Enfoque lagrangiano (cama)	1D	Equi. no térmico.
<b>Xiao Z. et al. 2020</b>	cama móvil	Industrial	RSU	Flujo granular	3D	Equi. no térmico
<i>Modelos de fase discreta</i>						
<b>Brosh B. et al. 2016</b>	Lecho fijo/rejilla recíproca/rejilla de acción hacia adelante	Laboratorio. / Industriales	Madera de haya / RSU	Modelo DEM interno	2D	Equi. no térmico.
<b>Kuwagi K. et al. 2016</b>	Incinerador pequeño	Piloto	Desperdicio	Acoplamiento DEM-CFD	3D	Equi. no térmico.
<b>Wissing F. et al. 2017</b>	Sistemas de rejilla común	Industrial	RSU	Modelo DEM interno	3D	Equi. no térmico.
<i>Otros modelos</i>						
<b>Matzing H. et al. 2018</b>	Cama fija / cama móvil	Lab./Piloto / Industrial	Astillas de madera / CSR / RSU	Modelo de reactor en cascada (código KLEAA)	1D	Equi. no térmico.

#### *Elaboración propia*

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 5, se tiene que los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales se basan en tres aspectos principales: la metodología aplicada, tipo de cama de combustibles y la dimensionalidad del modelo.

Así también un modelo de cama separada (es decir, modelo de cama independiente) puede tener un acoplamiento unidireccional o bidireccional con el francobordo, mientras que un modelo completamente acoplado no requiere una estrategia de acoplamiento separada. Siendo en el presente estudio los acoplamientos unidireccional y bidireccional los más usados; siendo ello corroborado por: Salvador

et al. 2010, Gu T. et al. 2019, Lai A. y Law W., 2019, Matzing H. et al. 2018, aplicando acoplamiento unidireccional y Ismael T. et al. 2016, Sol R. et al. 2017, sol R. et al. 2016, Brosch B. et al. 2016, quienes aplicaron acoplamiento bidireccional.

El acoplamiento unidireccional se aplica cuando los modelos de lecho (incluidos los modelos empíricos) se utilizan principalmente para proporcionar los flujos másicos de las especies de gas y la temperatura del gas como condiciones de entrada para el modelado de francobordo (Law W., 2019, p.2).

Además, de estas afirmaciones, el acoplamiento bidireccional más interactivo implica información sobre el flujo de radiación incidente del modelo de francobordo como condiciones límite de entrada para el lecho de combustible. Ello es apoyado por sol R. et al. (2016), quien menciona que, en un modelo completamente acoplado, la simulación de la fase sólida se acopla directamente al código CFD de la fase gaseosa y ambas fases se resuelven simultáneamente.

Así también, este enfoque se puede aplicar tanto para DPM como para modelos de medio poroso continuo (kuwagi K. et al., 2016, p.3).

Además, los modelos medio porosos continuos fueron aplicados en un 70% y los modelos fase discreta en un 30%; siendo ello corroborad por: Salvador et al. 2010, Ismael T. et al. 2016, Sol R. et al. 2017, Sol R. et al. 2016, Gu T. et al. 2019, Lai A. y Law W., 2019, Xiao Z. et al. 2020; quienes aplicaron el modelo poroso continuo.

Ello debido a que, el modelo de medio poroso continuo (es decir, modelos heterogéneos con una fase continua), un lecho de combustible se considera como un medio poroso macroscópicamente homogéneo y en aras de la simplicidad, los fenómenos entre partículas e intrapartículas generalmente no se consideran; sin embargo, incluyen la interacción entre partículas al emplear la teoría cinética del flujo granular para describir la fase sólida (Xia Z. et al., 2020, p.6).

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo al objetivo del estudio de analizar cuáles son los aspectos más relevantes de las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales, se pudo concluir que las tecnologías de tratamiento térmico de residuos en general, no pierden su importancia, sino que se enfrentan a un reto creciente y los aspectos más importantes a saber se detallan a continuación, en los siguientes puntos:

- La comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales señala que, las técnicas usadas son la torrefacción, pirolisis, gasificación y combustión o incineración y los procesos usados por las técnicas que permiten realizar la comparación de las técnicas son los procesos realizados para la recuperación de energía y materiales de los residuos; siendo estos la atmosfera empleada, la temperatura usada, Productos clave, Termoquímica, tipo de residuo y Tecnología. Además, se pudo comprobar que los fenómenos químicos y físicos fundamentales detrás de las cuatro técnicas son bastante similares, ya que los residuos sólidos, al estar expuestos a altas temperaturas, sufren subprocesos consecutivos similares, es decir, calentamiento, secado, desgasificación (es decir, pirolisis) y combustión. (si hay oxígeno presente).
- Los mecanismos de pirolisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales son cuatro; el modelo de mecanismo global de un paso, el mecanismo único multicomponente, el mecanismo competitivo de un componente y el mecanismo detallado.
- Los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales se basan en tres aspectos principales; la metodología aplicada, tipo de cama de combustibles y la dimensionalidad del modelo. Así también, los acoplamientos unidireccional y bidireccional son los más usados; siendo un acoplamiento unidireccional o bidireccional los que puede presentar un modelo de cama separada; es decir, modelo de cama independiente.

## VI. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los estudios realizados se puede realizar las siguientes recomendaciones:

- Desarrollar una estrategia de modelado más avanzada que pueda manejar los RSU como un sistema de múltiples componentes en múltiples niveles (nivel de partículas y lecho).
- También, ya que, además de los aspectos mecánicos y térmicos convencionales, se deben considerar los aspectos químicos y materiales del proceso de combustión de residuos; en este sentido, existe la necesidad de una investigación más fundamental sobre la combustión de RSU.
- Así mismo, se recomienda centrarse en los aspectos termoquímicos de los residuos, ya que, sería un punto de partida prometedor.
- Se recomienda estudiar la formación y el transporte de especies químicas como metales pesados que se generan en los procesos de combustión para que se generen soluciones rentables para prevenir y reducir las emisiones que se emiten.
- Debido a que para tener una mejor comprensión de la degradación térmica de los RSU se debe comenzar con una mejor comprensión de las características físicas y químicas de los RSU como materia prima se recomienda desarrollar un modelo que pueda encarnar esta complejidad de los RSU.

## REFERENCIAS

1. Abdel-Shafy, HI y Mansour, HSH (2018). Problema de residuos sólidos: Fuentes, composición, disposición, reciclaje y valorización. Revista egipcia de petróleo. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
2. Adhikari, S., Nam, H. y Chakraborty, JP (2018). Conversión de Residuos Sólidos a Combustibles y Químicos Mediante Pirólisis. Biorrefinería de residuos, 239–263. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00008-2>
3. ALAM, Pervez; SHARHOLY, Mufeed; AHMAD, Kafeel. A study on the landfill leachate and its impact on groundwater quality of Ghazipur area, New Delhi, India. En Recent Developments in Waste Management. Springer, Singapore, 2020. p. 345-358. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0990-2\\_27](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0990-2_27)
4. AWASTHI, Mukesh Kumar, et al. Sustainable management of solid waste. En Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches. Elsevier, 2019. p. 79-99. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00006-2>
5. BEYENE, Hayelom Dargo; WERKNEH, Adhena Ayaliew; AMBAYE, Tekilt Gebregergs. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. Renewable Energy Focus, 2018, vol. 24, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001>
6. BOTELLO-ÁLVAREZ, José Enrique, et al. Informal collection, recycling and export of valuable waste as transcendent factor in the municipal solid waste management: A Latin-American reality. Journal of cleaner production, 2018, vol. 182, p. 485-495. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.065>
7. BROSCH, Björn; SCHERER, Viktor; WIRTZ, Siegmur. Simulation of municipal solid waste incineration in grate firing systems with a particle based novel Discrete Element Method. VGB powertech, 2016, vol. 1, no 2, p. 75.

8. CEPAL, N. U., et al. Latin American economic outlook 2017: youth, skills and entrepreneurship. ECLAC, 2016. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1787/leo-2017-en>
9. CHHABRA, Vibhuti; SHASTRI, Yogendra; BHATTACHARYA, Sankar. Kinetics of pyrolysis of mixed municipal solid waste-a review. *Procedia environmental sciences*, 2016, vol. 35, p. 513-527. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.036>
10. Chen, Z., Lin, X., Zhang, S., Xiangbo, Z., Li, X., Lu, S., & Yan, J. (2021). Thermal cotreatment of municipal solid waste incineration fly ash with sewage sludge for PCDD/Fs decomposition and reformation suppression. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 126216. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126216>
11. DASH, Siddhant; BORAH, Smitom Swapna; KALAMDHAD, Ajay. A modified indexing approach for assessment of heavy metal contamination in Deepor Beel, India. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 106, p. 105444. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105444>
12. DERNBECHER, Andrea, et al. Review on modelling approaches based on computational fluid dynamics for biomass combustion systems. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2019, vol. 9, no 1, p. 129-182. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00370-z>
13. Diaz-Barriga-Fernandez, A. D., Santibañez-Aguilar, J. E., Betzabe González-Campos, J., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2018). Strategic planning for managing municipal solid wastes with consideration of multiple stakeholders. *Computer Aided Chemical Engineering*, 1597–1602. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64241-7.50261-5>
14. EDWARDS, Joel, et al. Life cycle assessment to compare the environmental impact of seven contemporary food waste management systems. *Bioresource technology*, 2018, vol. 248, p. 156-173. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.070>

15. FOLLADOR, Marco, et al. Assessing the impacts of the EU bioeconomy on third countries: potential environmental impacts in Brazil of EU biofuel demand to 2030. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.2760/304776>
16. Funk, K., Milford, J. y Simpkins, T. (2020). Waste not, want not: análisis de la viabilidad económica y ambiental de la tecnología de conversión de residuos en energía para la optimización específica del sitio de las opciones de energía renovable. *Bioenergía*, 385–423. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00019-1>
17. GAO, Meng, et al. Bioaccumulation and health risk assessments of trace elements in housefly (*Musca domestica* L.) larvae fed with food wastes. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 682, p. 485-493. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.182>
18. Ghosh, P., Shah, G., Sahota, S., Singh, L. y Vijay, VK (2020). Producción de biogás a partir de residuos: descripción técnica, progreso y desafíos. *Biorreactores*, 89–104. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00007-3>
19. GU, Tianbao, et al. Municipal solid waste incineration in a packed bed: A comprehensive modeling study with experimental validation. *Applied Energy*, 2019, vol. 247, p. 127-139. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.014>
20. GUJRE, Nihal, et al. Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes. *Chemosphere*, 2021, vol. 262, p. 128013. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128013>
21. HABERLE, Inge, et al. Numerical models for thermochemical degradation of thermally thick woody biomass, and their application in domestic wood heating appliances and grate furnaces. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, vol. 63, p. 204-252. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.07.004>
22. HETTIARACHCHI, Hiroshan, et al. Municipal solid waste management in Latin America and the Caribbean: issues and potential solutions from the governance

- perspective. Recycling, 2018, vol. 3, no 2, p. 19. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/recycling3020019>
23. IBRAHIM, Mohamed Ibrahim Mohamed; MOHAMED, Nanis Abd El Monem. Towards sustainable management of solid waste in Egypt. Procedia Environmental Sciences, 2016, vol. 34, p. 336-347. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.030>
24. IKHLAYEL, Mahdi. Development of management systems for sustainable municipal solid waste in developing countries: a systematic life cycle thinking approach. Journal of Cleaner Production, 2018, vol. 180, p. 571-586. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.057>
25. IQBAL, Asad; LIU, Xiaoming; CHEN, Guang-Hao. Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques. Science of The Total Environment, 2020, vol. 729, p. 138622. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138622>
26. ISMAIL, T. M., et al. Three dimensional model of transport and chemical late phenomena on a MSW incinerator. International journal of Thermal sciences, 2016, vol. 77, p. 139-157. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.10.019>
27. KANG, Yating, et al. China's changing city-level greenhouse gas emissions from municipal solid waste treatment and driving factors. Resources, Conservation and Recycling, 2022, vol. 180, p. 106168. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106168>
28. KHAN, M. Nuruzzaman, et al. Cellulase in waste management applications. En New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. Elsevier, 2016. p. 237-256. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00014-8>
29. KHAN, Salman; ALVAREZ, Laura Cristina Macias; WEI, Yan. Sustainable management of municipal solid waste under changing climate: A case study of Karachi, Pakistan. Asian Journal of Environmental Biotechnology, 2018, vol. 2, no 1, p. 23-32. ISSN 2548-6691

30. KHANAM, Rubina, et al. Metal (loid) s (As, Hg, Se, Pb and Cd) in paddy soil: Bioavailability and potential risk to human health. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 699, p. 134330. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134330>
31. KHODAEI, Hassan, et al. An overview of processes and considerations in the modelling of fixed-bed biomass combustion. *Energy*, 2015, vol. 88, p. 946-972. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.099>
32. KING, Kameron J. *Integrated Processing of Municipal Solid Waste for Maximizing Waste Reduction, Carbon Recovery and Fuel Production*. 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.25777/fmr4-nb76>
33. Kumar, A. y Samadder, SR (2017). Una revisión sobre las opciones tecnológicas de conversión de residuos en energía para la gestión eficaz de los residuos sólidos municipales. *Gestión de residuos*, 69, 407–422. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
34. KUWAGI, Kenya, et al. Development of DEM–CFD simulation of combustion flow in incinerator with the representative particle model. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2016, vol. 49, no 5, p. 425-434. Disponible en: <https://doi.org/10.1252/jcej.15we099>
35. LAI, Adrian Chun Hin; LAW, Adrian Wing-Keung. Numerical modeling of municipal waste bed incineration. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2019. ISSN: 0961-5539
36. LIN, Yaoben, et al. The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, vol. 180, p. 557-564. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.057>
37. LOMBARDI, Lidia; CARNEVALE, Ennio; CORTI, Andrea. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste management*, 2015, vol. 37, p. 26-44. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>

38. MAKARICHI, Luke, et al. Suitability of municipal solid waste in African cities for thermochemical waste-to-energy conversion: The case of Harare Metropolitan City, Zimbabwe. *Waste Management & Research*, 2019, vol. 37, no 1, p. 83-94. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/0734242X18804029>
39. MATSAKAS, Leonidas, et al. Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2017, vol. 26, p. 69-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.01.004>
40. MÄTZING, Hartmut, et al. Modelling grate combustion of biomass and low rank fuels with CFD application. *Waste Management*, 2018, vol. 78, p. 686-697. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.008>
41. MEHRABIAN, Ramin, et al. Multi-physics modelling of packed bed biomass combustion. *Fuel*, 2016, vol. 122, p. 164-178. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.027>
42. MOREIRA, Leo JD, et al. Speciation, bioaccessibility and potential risk of chromium in Amazon forest soils. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 239, p. 384-391. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.025>
43. NEUWAHL, Frederik, et al. Best available techniques (BAT) reference document for waste incineration. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.2760/761437>
44. NIAZI, Nabeel Khan, et al. Removal and recovery of metals by biosorbents and biochars derived from biowastes. En *Environmental materials and waste*. Academic Press, 2016. p. 149-177. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00007-X>
45. NUNES, M. I., et al. Hydrogen sulfide levels in the ambient air of municipal solid waste management facilities: A case study in Portugal. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2021, vol. 4, p. 100152. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100152>
46. Ojovan, M. I., Lee, W. E., & Kalmykov, S. N. (2019). Nuclear Waste Disposal. *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*, 415–432. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102702-8.00022-4>

47. ORTIZ, Carlos, et al. Scaling-up the calcium-looping process for CO<sub>2</sub> capture and energy storage. *KONA Powder and Particle Journal*, 2021, vol. 38, p. 189-208. Disponible en: <https://doi.org/10.14356/kona.2021005>
48. PAN, Xiaomei, et al. Effects of soil chemical properties and fractions of Pb, Cd, and Zn on bacterial and fungal communities. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 715, p. 136904. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136904>
49. RANZI, Eliseo, et al. Kinetic modeling of the thermal degradation and combustion of biomass. *Chemical Engineering Science*, 2014, vol. 110, p. 2-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.08.014>
50. Rostami, R., Zarei, A., Saranjam, B., Ghaffari, H. R., Hazrati, S., Poureshg, Y., & Fazlzadeh, M. (2019). Exposure and risk assessment of PAHs in indoor air of waterpipe cafés in Ardebil, Iran. *Building and Environment*, 155, 47–57. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.031>
51. ŞAHİN, Gökтуğ; TAKSİM, Muhammed Ali; YİTGİN, Burak. Effects of The European Green Deal on Turkey's Electricity Market. *İşletme Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 2021, vol. 4, no 1, p. 40-58. Disponible en: <https://doi.org/10.33416/baybem.835052>
52. SALVADOR, Sylvain; QUINTARD, Michel; DAVID, Céline. Combustion of a substitution fuel made of cardboard and polyethylene: influence of the mix characteristics—modeling. *Fire and Materials: An International Journal*, 2010, vol. 32, no 7, p. 417-444. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/fam.978>
53. SAMADDER, S. R., et al. Analysis of the contaminants released from municipal solid waste landfill site: a case study. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 580, p. 593-601. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.003>
54. SINGH, Pooja, et al. River water irrigation with heavy metal load influences soil biological activities and risk factors. *Journal of environmental management*, 2020, vol. 270, p. 110517. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110517>

55. SUN, Rui, et al. Influence of simulated MSW sizes on the combustion process in a fixed bed: CFD and experimental approaches. *Waste management*, 2016, vol. 49, p. 272-286. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.019>
56. SUN, Rui, et al. Numerical and experimental studies on effects of moisture content on combustion characteristics of simulated municipal solid wastes in a fixed bed. *Waste management*, 2017, vol. 39, p. 166-178. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.018>
57. SUN, Rui, et al. Numerical simulation of gas concentration and dioxin formation for MSW combustion in a fixed bed. *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 157, p. 111-117. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.007>
58. TSAI, Feng Ming, et al. A causal municipal solid waste management model for sustainable cities in Vietnam under uncertainty: A comparison. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, vol. 154, p. 104599. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104599>
59. TSENG, Chao-Heng; LEE, I.-Hsuan; CHEN, Ying-Chu. Evaluation of hexavalent chromium concentration in water and its health risk with a system dynamics model. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 669, p. 103-111. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.103>
60. VAN CANEGHEM, Jo, et al. Waste-to-energy is compatible and complementary with recycling in the circular economy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2019, vol. 21, no 5, p. 925-939. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01686-0>
61. VOSS, Raoul, et al. Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany. *Waste Management*, 2021, vol. 134, p. 206-219. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.040>
62. VYAS, Shaili, et al. Municipal solid waste management: Dynamics, risk assessment, ecological influence, advancements, constraints and

perspectives. *Science of The Total Environment*, 2022, p. 152802. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152802>

63. WISSING, F.; WIRTZ, S.; SCHERER, V. Simulating municipal solid waste incineration with a DEM/CFD method—Influences of waste properties, grate and furnace design. *Fuel*, 2017, vol. 206, p. 638-656. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.06.037>

64. Woolridge, A., & Hoboy, S. (2019). Medical Waste. *Waste*, 517–530. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815060-3.00027-x>

65. XIA, Zihong, et al. A two-fluid model simulation of an industrial moving grate waste incinerator. *Waste Management*, 2020, vol. 104, p. 183-191. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.016>

66. ZHANG, Chang, et al. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 557, p. 785-790. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.170>

# ANEXOS

## ANEXOS N° 1

Tabla N° 2: Matriz de Categorización Apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
<b>Clasificar la comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales</b>	¿Cuál es la comparación de los procesos usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales?	Comparación de tratamientos térmicos para la disminución de residuos sólidos (Chen Z. et al., 2021, p.1)	Torrefacción	(Matsakas Leonidas et al., 2017, p.2), (Pan Xiaomei et al., 2020, p.1), (Chhabra V. et al., 2016, p.3).
			Pirólisis	
			Gasificación	
<b>Describir cuáles son los mecanismos de pirólisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales</b>	¿Cuáles son los mecanismos de pirólisis aplicados a los materiales lignocelulósicos de residuos sólidos municipales?	Mecanismos de pirólisis para los residuos sólidos (Gu Tianbao et al., 2019)	Modelo de mecanismo global de un paso	(Wissing F. et al., 2017, p.1), (Lin Yaoben et al., 2019, p.2), (Khodaei H. et al. 2016, p.3).
			Mecanismo único multicomponente	
			Mecanismo competitivo de un componente	
<b>Detallar cuáles son los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales</b>	¿Cuáles son los modelos de cama de combustibles usados en las técnicas de tratamiento térmico para la disminución de residuos sólidos municipales?	Modelos de cama de combustible para los residuos sólidos (Gu Tianbao et al., 2019)	Mecanismo detallado	(Dash Siddhant et al., 2019, p.3), (Tseng Chao et al., 2019, p.2), (Kuwagi Kenya et al., 2016, p.2).
			Modelos de medio poroso continuo	
			Modelos de fase discreta	
			Otros modelos	

ANEXOS N° 2

		<b>FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO</b>	
<b>DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)</b>			
<b>PAGINAS UTILIZADAS</b>	<b>AÑO DE PUBLICACION</b> <input type="text"/>	<b>LUGAR DE PUBLICACION</b> <input type="text"/>	
<b>TIPO DE INVESTIGACION:</b>			

<b>CÓDIGO:</b>	
<b>PALABRAS CLAVES:</b>	Thermal Treatment Techniques, Reduction of Municipal Solid Waste, pyrolysis mechanisms
<b>MECANISMOS DE PIROLISIS PARA LOS RESIDUOS SOLIDOS</b>	
<b>TRATAMIENTO TERMICO PARA LA DISMINUCION DE RESIDUOS</b>	
<b>MODELOS DE CAMA DE COMBUSTIBLE PARA LOS RESIDUOS</b>	
<b>RESULTADOS:</b>	
<b>CONCLUSIONES:</b>	

*Elaboración propia*