



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

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

**Valorización Energética por Coprocesamiento de Residuos  
Sólidos Municipales: Revisión Sistemática.**

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

**AUTORES:**

Panta Hernandez, Jhon Jonatan (ORCID: 0000-0001-5325-5670)

Peña Ramirez, Reyes Mirely (ORCID: 0000-0002-4084-6938)

**ASESOR:**

M.Sc. Grijalva Aroni, Percy Luis (ORCID: 0000-0002-2622-784)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y gestión de residuos solidos

LIMA – PERÚ

2022

## Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico, primeramente, a dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por ayudarme a alcanzar nuevas metas y sueños. A mis amados padres Jonhy Panta y Socorro Hernandez, por ser un gran ejemplo en mi vida, por su sacrificio, sabiduría, amor y apoyo en todo momento.

Jonatan Panta Hernández

A mi abuelita Catita que, aunque ya no esté junto a mí, sé que estará feliz por mis logros. Gracias por creer siempre en que yo llegaría a ser grande. Gracias por el inmenso amor que me demostraste día a día. ¡Ya soy Ingeniera abuelita! A mis padres: María y Lizandro, gracias por su amor, por su sacrificio, por su apoyo incondicional. Gracias por creer en mí. Y gracias porque, ustedes son un ejemplo de vida.

Reyes Mirely Peña Ramirez

## **Agradecimiento**

Agradecemos en primer lugar a Dios por la salud y la vida, agradecemos a nuestros padres por todo el apoyo que nos han dado desde el inicio de nuestra carrera profesional, a la universidad Cesar Vallejo por habernos permitido poder cumplir con esta meta de obtener nuestro Título Universitario, a nuestro asesor Mg. Grijalva Aroni Percy Luis por el apoyo en el proceso de elaboración de tesis.

## Índice de contenido

Carátula.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenido.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	24
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	24
3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística.....	24
3.3. Escenario de estudio.....	25
3.4. Participantes.....	25
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	25
3.6. Procedimiento.....	26
3.7. Rigor científico.....	27
3.8. Método de análisis de información.....	28
3.9. Aspectos éticos.....	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	29
4.1. Identificación de residuos utilizados para coprocesamiento.....	29
4.2. Poder calorífico teórico de los residuos sólidos municipales.....	30
4.3. Ventajas del coprocesamiento.....	32
V. CONCLUSIONES.....	34
VI. RECOMENDACIONES.....	35
REFERENCIAS.....	36
ANEXOS	

## Índice de tablas

<b>Tabla N°01:</b> Principios para el coprocesamiento .....	16
<b>Tabla N°02:</b> Residuos a evitar en el Coprocesamiento.....	17
<b>Tabla N°03:</b> Contenido energético de los residuos.....	21
<b>Tabla N°04:</b> Comparacion entre incineracion y co-procesamiento .....	23
<b>Tabla N°05:</b> Residuos Sólidos Municipales Coprocesables.....	29
<b>Tabla N°06:</b> Poder calorífico Teórico de residuos sólidos municipales coprocesables ....	30
<b>Tabla N°07:</b> Ventajas de coprocesar residuos solidos.....	32

## Índice de gráficos y figuras

<b>Figura N°01:</b> Jerarquía de gestión de los residuos.....	14
<b>Figura N°02:</b> Procedimiento para el Coprocesamiento.....	17
<b>Figura N°03:</b> Puntos de alimentación de AFR de un sistema de horno de cemento de última generación. ....	19
<b>Figura N°04:</b> Diferentes categorías AF para diferentes fuentes de alimentación.....	20
<b>Figura N°05:</b> El principio de la economía circular. El papel de las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos sólidos.....	22
<b>Gráfico N°01:</b> Procedimiento de información .....	26
<b>Gráfico N°2:</b> Poder calorífico Teórico de residuos sólidos municipales coprocesables .....	31

## Resumen

El presente trabajo es una investigación de revisión sistemática donde se pretende evaluar al coprocesamiento como una alternativa de valorización energética para los residuos sólidos municipales. Se revisaron 30 estudios tanto nacionales como internacionales obtenidos de plataformas como Scielo, Scopus, Science Direct y Google Académico como bases del estudio.

Se obtuvieron resultados directos con respecto a los objetivos principales de la investigación, para el primer objetivo; se identificó que residuos como la biomasa, residuos de comida, residuos de jardines y parques, maderas, plástico, papel, cartón, residuos de textiles, neumáticos, vidrio y algunos metales son los que se utilizan para el coprocesamiento en hornos cementeros. En el segundo objetivo sobre el poder calorífico de los residuos sólidos municipales se determinó que todos los residuos suman un poder calorífico teórico de 9.602 MJ/kg siendo este un valor muy bueno para coprocesar. Y por último en nuestro tercer objetivo se determinó que las ventajas de este proceso son: recupera energía, recicla y reutiliza materiales, no deja residuos, disminuye el consumo de los combustibles fósiles, evita afectaciones a la calidad ambiental, elimina la necesidad de invertir en un sitio de disposición final y reduce la utilización de materias primas.

**Palabras clave:** Coprocesamiento, residuos sólidos, poder calorífico, valorización energética.

## Abstract

The present work is a systematic review investigation where it is intended to evaluate co-processing as an energy recovery alternative for municipal solid waste. 30 national and international studies obtained from platforms such as Scielo, Scopus, Science Direct and Google Scholar were reviewed as the basis of the study.

Direct results were obtained with respect to the main objectives of the research, for the first objective; It was identified that waste such as biomass, food waste, garden and park waste, wood, plastic, paper, cardboard, textile waste, tires, glass and some metals are used for co-processing in cement kilns. In the second objective on the calorific value of municipal solid waste, it was determined that all waste has a theoretical calorific value of 9,602 MJ/kg, this being a very good value for co-processing. And finally, in our third objective, it was determined that the advantages of this process are: it recovers energy, recycles and reuses materials, leaves no waste, reduces the consumption of fossil fuels, avoids damage to environmental quality, eliminates the need to invest in a final disposal site and reduces the use of raw materials.

**Keywords:** co-processing, solid waste, calorific value, energy recovery.

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de cualquier actividad económica como la producción y consumo de bienes y servicios genera residuos que si no son gestionados adecuadamente pueden generar un impacto negativo en el ambiente y por ende a la salud humana. Las ciudades modernas tienen un gran reto al buscar el balance entre el ámbito social, medio ambiental y económico y así propiciar que sus habitantes vivan en un entorno saludable con buenas oportunidades laborales y por supuesto una excelente calidad ambiental en todos los aspectos.

Los desechos de ciudades y comunidades de todo el mundo son un desafío que preocupa a todos. Esto incluye los desechos orgánicos e inorgánicos comunes generados en los hogares, industrias y negocios. Existen varias soluciones para este tipo de residuos municipales, incluyendo la reducción, reutilización y reciclaje en la fuente donde se producen. Además, iniciativas como la no eliminación de residuos en los vertederos ayudan a reducir los residuos que se envían a los vertederos.

En Perú se genera un promedio de 21.000 toneladas de residuos municipales por día producidos por los 32 millones de habitantes, lo que equivale a 0,8 kilogramos de producción de residuos por persona y por día y de esto más de la mitad de los residuos son orgánicos como alimentos o vegetales. Estos residuos se dividen en 53,6% residuos sólidos orgánicos, 18,9% residuos inservibles, 19,8% residuos inorgánicos y 7,7% residuos peligrosos. Lima ocupa el primer lugar con aproximadamente 7.918,1 toneladas de residuos por día, Piura ocupa el segundo lugar con 1.224,1 toneladas por día y Madre de Dios ocupa el tercer lugar con 73,4 toneladas por día.

El MINAM informa que el 1% de los residuos sólidos municipales de producción nacional se recicla, pero investigaciones técnicas muestran que existe un "alto potencial" de reciclaje. En cuanto a la infraestructura para la disposición final de los residuos, el MINAM señala que se está trabajando para llenar el vacío en este aspecto. Sorprende que más del 50% del territorio esté cubierto por este tipo de

obras como plantas de valorización o rellenos sanitarios que cumplan con todos los requisitos de las normas ambientales.

El manejo de los residuos sólidos en el Perú es un tema que tiene muchísimo por mejorar. Actividades como segregación, recolección, valorización y disposición final se están desarrollando gradualmente en nuestro país, pero aun nos falta. Tenemos datos que nos da el MINAM; que un total de 745 municipalidades valorizan sus residuos sólidos y que alrededor de 93 mil toneladas de residuos sólidos fueron valorizados en el 2020 a nivel nacional, pero si comparamos estos datos con la cantidad de residuos que se genera en nuestro país (7 905 118.13 Tn en el 2020) nos daremos cuenta de que menos del 1% de residuos son valorizados y que estamos perdiendo la posibilidad de generar oportunidades y contribuir al modelo de economía circular al que queremos llegar.

Existen más tipos de valorización, como el coprocesamiento el cual es un tipo de valorización energética muy completa y que se viene desarrollando en varios países de Latinoamérica y Europa. Los investigadores, los administradores de residuos y los responsables políticos de los países en desarrollo y emergentes deben abordar estos nuevos desafíos y, recientemente, las conversiones de residuos en energía está en crecimiento ya que el volumen de residuos en las ciudades esta cada día en aumento.

El coprocesamiento, definido por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), a través del Convenio de Basilea, es el uso de materiales de desecho adecuados en los procesos de producción con el fin de recuperar energía y recursos y, por lo tanto, reducir el uso de combustibles convencionales y materias primas. Estas alternativas se han convertido en una de las mayores oportunidades de crecimiento en la última década, principalmente para abordar los desafíos de la gestión racional de residuos en los países en desarrollo. Al realizar el análisis de toda la información encontrada y mencionada anteriormente se planteó el siguiente Problema General: ¿Es viable la valorización de los residuos sólidos municipales mediante el coprocesamiento? Y como problemas específicos: ¿Cuáles son los residuos sólidos municipales que son utilizados mayormente en el coprocesamiento?, ¿Cuáles son los residuos sólidos municipales con mayor poder calorífico para su valorización mediante el Coprocesamiento? Y ¿Qué beneficios

aporta el Coprocesamiento de residuos sólidos municipales? Resolver estas preguntas nos permitió conocer el potencial que tiene el coprocesamiento para valorizar los residuos sólidos municipales, así mismo conocer los veneficios que trae consigo.

El coprocesamiento ofrece los beneficios de la infraestructura básica, como los hornos de cemento, que ya existen en prácticamente todos los países. Los hornos de cemento están disponibles y el principal desafío son los requisitos técnicos y económicos de la cadena de suministro de materiales determinados por el manejo adecuado de los desechos de producción, transporte, almacenamiento, tratamiento y uso en los hornos de cemento. Esta actividad es un modelo para la gestión sostenible de todas las partes involucradas.

Esta investigación se justifica por la necesidad de contribuir a un nuevo patrón en el tratamiento y valorización de residuos sólidos municipales mediante un estudio que permitió determinar la viabilidad de realizar coprocesamiento. En lugares donde se ha implementado el coprocesamiento se logró estabilizar cantidades importantes de residuos sólidos que llegan a botaderos de basura o rellenos sanitarios, también ayudó a la industria cementera a reducir las emisiones que se generan al usar combustibles convencionales en sus procesos.

El **objetivo general** de la investigación fue: Evaluar la viabilidad de valorización de los residuos sólidos municipales mediante el coprocesamiento. Y como objetivos específicos: Identificar los tipos de residuos sólidos municipales que son utilizados para realizar coprocesamiento, Realizar un análisis del poder calorífico de residuos sólidos municipales necesarios para su valorización mediante el coprocesamiento e Identificar las ventajas del coprocesamiento de residuos sólidos municipales.

## II. MARCO TEÓRICO

Para esta investigación se presenta las investigaciones internacionales que son estudiados para poder realizar este estudio, como es el caso de (SIMAO, y otros, 2019), Este estudio se realizó en Brasil, donde se manifiesta la preocupación por el aumento de residuos sólidos en varios sectores industriales, por lo que, enfatiza en que se requieren medidas efectivas que garanticen que el descarte de residuos sea “ambientalmente adecuado y económicamente viable”. También, menciona que el Coprocesamiento tiene más ventajas que los incineradores tradicionales pues produce menores emisiones atmosféricas por lo tanto se minimizan los impactos ambientales.

Con respecto a lo mencionado por el autor concordamos con lo que manifiesta respecto a la preocupación que genera el aumento de residuos sólidos ya que estos son acumulados en vertederos de basura los cuales no son controlados adecuadamente y en consecuencia se contamina los suelos y las aguas superficiales y subterráneas.

(Velasco, y otros, 2018), el propósito de su investigación es evaluar el potencial de los residuos industriales sólidos no reciclables generados en Ciudad Juárez en Chihuahua, México, como combustible alternativo a los hornos de cemento. Los diversos flujos de residuos se clasifican primero y luego se caracterizan física y químicamente utilizando métodos estandarizados. Esto produce un residuo de biomasa de alta fracción de masa, que posteriormente se clasifica como una fracción de residuos orgánicos energéticamente eficientes (FROEE). Esto incluye mezclas residuales de madera, papel, cartón, plástico y ropa automotriz. El poder calorífico neto se ordenó de mayor a menor (8869, 5895 y 3553 kcal/kg), correspondientes a los residuos de neumáticos, FROEE y biomasa, respectivamente.

Por lo tanto, según lo que mencionan los autores en este estudio se puede concluir que los residuos generados en Ciudad Juárez, Chihuahua en México cumplen con los estándares recomendados para ser utilizados en combustibles alternos.

(ZHENG, y otros, 2022) Basado en la evaluación del ciclo de vida híbrido integrado, este estudio compara el desempeño ambiental y económico de la utilización de baja temperatura de MSWIFA (cenizas volantes de incineración de residuos sólidos municipales) con la técnica de Coprocesamiento en horno de cemento cuando se consideraron los escenarios con o sin recuperación de sal. Donde el resultado muestra que la evaluación del ciclo de vida integrada híbrida captura mayores beneficios ambientales y económicos de la utilización de MSWIFA que el método tradicional. Es así que la evitación del calentamiento global, la demanda de energía primaria y la toxicidad humana del sistema económico de insumo-producto representan entre el 15 % y el 53 %, entre el 26 % y el 65 % y entre el 93 % y el 96 % de los impactos totales, respectivamente.

(ELFAHAM, y otros, 2018) En este estudio, se emplearon métodos modernos de análisis químico para asistir en la posibilidad de coprocesamiento de material de desecho dentro de la planta de cemento donde se recolectaron muestras reales de una planta de cemento en Egipto para validar y respaldar el enfoque de coprocesamiento. Los resultados muestran que la composición de las muestras recolectadas contiene los principales elementos requeridos para la producción de clinker y cemento. Sin embargo, existen algunos metales pesados y otros elementos peligrosos, pero la concentración está por debajo del rango aceptado de las especificaciones.

Es así como, este estudio demostró los tipos de residuos adecuados que pasarán por el coprocesamiento. Así mismo (SONI, y otros, 2021) Investigó y analizó el coprocesamiento de residuos plásticos. Este estudio es muy importante para el ámbito ambiental debido a que en los últimos años la demanda en el uso de plástico se ha incrementado y por ende genera gran impacto e incremento de residuos sólidos a nivel mundial.

(YANG, y otros, 2021) este estudio realizado en China menciona que los contaminantes orgánicos persistentes en el suelo no se degradan fácilmente a corto plazo. Menciona que el coprocesamiento puede ser una buena forma de eliminar el suelo contaminado con diclorodifeniltricloroetano (CS). La viabilidad del coprocesamiento de CS pretratado para disolver diclorodifeniltricloroetano se evaluó mediante la realización de una prueba a escala industrial, centrándose en

los riesgos que plantean las emisiones al medio ambiente. Se recolectaron muestras de entrada y salida en el horno de cemento para determinar la calidad del clínker, la operación de producción, las emisiones contaminantes, la eficiencia de destrucción del sistema del horno de cemento y los perfiles de distribución de contaminantes orgánicos persistentes producidos involuntariamente en el horno. En conclusión, a comparación con los parámetros de procesamiento en el clínker, el polvo del horno de cemento y los gases de combustión en condiciones de línea de base y de coprocesamiento puso de manifiesto que el coprocesamiento no tuvo efecto sobre la operación o la calidad del cemento del horno de cemento. Por lo tanto, el coprocesamiento de CS a una velocidad de 20 t/h con un proceso de pretratamiento es un tratamiento ambientalmente racional y altamente eficiente para CS.

Según lo mencionado por los autores es importante la utilización del Coprocesamiento para remover estos contaminantes orgánicos persistentes sobre todo porque demostraron mediante el Coprocesamiento que la calidad del cemento no se ve afectado. También de esta manera se demuestra que la utilización del Coprocesamiento ha venido tomando importancia en los últimos años.

(Cravioto, y otros, 2021) Este artículo analiza los beneficios ambientales de implementar un esquema de Coprocesamiento de base regional entre las industrias siderúrgica y cementera de tres economías emergentes del sudeste asiático: Vietnam, Laos y Camboya. Este Esquema representaría un ahorro en millones de toneladas de materia prima y reducciones de emisiones de carbono en la región.

Destacamos la importancia de este estudio ya que al momento de utilizar el Coprocesamiento se realiza una práctica que es fundamental para una producción más limpia, sostenible y que contribuye de una manera significativa a la economía circular.

(Suárez, y otros, 2021) Esta investigación se desarrolló en Canadá, se investigó el coprocesamiento de mascarillas quirúrgicas de desecho, aceite de motor de desecho y biomasa para reducir los impactos ambientales de la creciente contaminación plástica de origen médico, así como para dilucidar su efecto en la producción de productos químicos. Los resultados mostraron altos rendimientos

hacia un producto oleoso con un interesante contenido de hidrocarburos en el rango del diésel. Este trabajo podría impactar en la gestión de los residuos de mascarillas quirúrgicas y la valorización conjunta de los residuos cotidianos hacia productos de alto valor añadido y para la producción de combustibles verdes.

(NAGLE, y otros, 2020) investigación realizada en Irlanda, titulada “Una evaluación comparativa del ciclo de vida entre el vertido y el coprocesamiento de residuos de palas de aerogeneradores irlandeses fuera de servicio” nos explica que el tratamiento de los residuos compuestos de las palas de turbinas eólicas fuera de servicio se convertirá en un problema importante en los próximos años. Este estudio tiene como objetivo determinar el método de eliminación más sostenible para los residuos de cuchillas irlandesas en los próximos diez años mediante el uso de la evaluación del ciclo de vida para comparar tres escenarios: coprocesamiento en hornos de cemento en Alemania, coprocesamiento en Irlanda y vertedero en Irlanda. Los resultados de este estudio establecen un escenario de impacto de referencia con el que comparar futuras soluciones de reutilización, que están más arriba en la jerarquía europea de residuos. El coprocesamiento no se lleva a cabo en Irlanda en este momento, pero a medida que aumenta el desperdicio de cuchillas, existe una gran probabilidad de que sea viable.

Los combustibles sólidos recuperados (SRF) han sustituido cada vez más a los combustibles primarios en la industria del cemento, incluso hasta en un 100%. (VICZEK, y otros, 2021) mediante su investigación establecen que se deben tomar medidas para garantizar que se cumplan los criterios de calidad, que las concentraciones de contaminantes se mantengan en un nivel bajo o que produzcan SRF sin contaminantes al usar residuos sólidos comerciales. Este trabajo investiga y analiza las posibles medidas para reducir las concentraciones de contaminantes: eliminación de las fracciones finas, tereftalato de polietileno (PET), cloruro de polivinilo (PVC) y materiales negros y grises.

Es necesario estudiar en detalle la formación y emisión de COP producidos de forma no intencional por los hornos de cemento que se coprocesa desechos sólidos para poder evaluar los riesgos potenciales que plantean las técnicas de Coprocesamiento de los hornos de cemento. (YANG, y otros, 2019) investigación realizada en China, demuestran que Los COP producidos no intencionalmente se

encuentran generalmente en concentraciones más bajas. Concentraciones en los medios emitidos cuando los residuos sólidos se coprocesan en hornos de cemento que, en los medios emitidos durante otros procesos térmicos industriales, probablemente debido a las altas temperaturas y alcalinidad de ambientes en hornos de cemento. Los cálculos de balance de masa han demostrado que las concentraciones de masa de PCDD/F y algunos compuestos similares a las dioxinas emergentes disminuyen cuando los desechos se coprocesan en un horno de cemento.

(GOMES, y otros, 2018) Investigación realizada en Brasil titulada “Coprocesamiento de residuos peligrosos: La percepción de los trabajadores sobre la sustentabilidad y las cuestiones de salud en una cementera brasileña” mediante la cual nos dicen que la industria del cemento podrá reducir aún más la huella ambiental de sus operaciones y productos en su aplicación final y garantizar la seguridad de los trabajadores y las poblaciones que viven cerca de la industria a través de la experiencia y el conocimiento. Como resultado se obtuvo que los trabajadores encuestados en este estudio percibieron que, en los últimos años, hubo mejoría en la cementera relacionada con aire, contaminación, ruido, condiciones y seguridad en el trabajo, oportunidades de trabajo y compromiso de la industria cementera con la protección del medio ambiente y velar por la salud, la seguridad y la formación de sus empleados.

(BAIDYA, y otros, 2016) mediante el artículo científico titulado “Coprocesamiento de Residuos Industriales en Horno de Cemento – Un Sistema Robusto para la Recuperación de Material y Energía”, este estudio muestra la sostenibilidad del coprocesamiento como proceso de recuperación de energía y materiales y aborda las cuestiones relacionadas con la gestión sostenible de los residuos industriales. El número de estudios está disponible en la literatura, pero el análisis se basa sobre múltiples estudios de casos específicos del escenario indio es escaso.

(PARLIKAR, y otros, 2016) mediante su investigación se evalúan los resultados de 22 pruebas de coprocesamiento de demostración, que fueron respaldadas como exitosas por CPCB, para comprender el grado de variación presente en los componentes químicos de estos flujos de desecho. También se concluyó a través de esta evaluación que las diferentes corrientes de desechos que tienen una gran

variación en las características químicas se pueden manejar de manera ambientalmente racional en los hornos de cemento.

Una de las investigaciones novedosas que hemos encontrado es la de (YUH, y otros, 2022), investigación titulada “Coprocesamiento a escala piloto de biomasa lignocelulósica, algas, desechos de mariscos a través de un enfoque termoquímico: avances recientes y direcciones futuras” Este artículo trata sobre el diseño y operación de reactores a escala piloto para torrefacción, pirólisis y gasificación, así como los parámetros clave para coprocesamiento de biomasa en productos específicos y de calidad mejorada para su uso como combustible, aplicación agrícola y remediación ambiental. El análisis tecno-económico revela que el precio de venta del producto final, la dinámica del mercado, las políticas gubernamentales y el costo de la biomasa son factores cruciales que influyen en la sostenibilidad del coprocesamiento térmico.

(YANG, y otros, 2019) a través de su estudio titulado “Dioxinas y furanos bromados en un horno de cemento que coprocesa residuos sólidos municipales” investigaron los niveles, perfiles y distribuciones de PBDD/Fs de un horno de cemento que coprocesaba desechos sólidos. El horno de cemento tenía una alta eficiencia de destrucción de PBDD/F, ya que las concentraciones en las materias primas eran mucho más altas que las de las partículas de las diferentes etapas.

(PERILLA, y otros, 2020) Estudio realizado en Bogotá, Colombia. En su trabajo para optar el grado de Magister en proyectos de desarrollo sostenible, este se plantea como propuesta para vincular el programa de gestión de residuos actual de la ciudad, como una tecnología de recuperación de energía que complementa el sistema de gestión de residuos bajo una jerarquía integral de gestión de residuos para abordar uno de los desafíos clave de la ciudad, se propone incinerar residuos sólidos urbanos. También se refiere a algunas perspectivas actuales que sustentan el proceso en el marco del apoyo y la experiencia internacional al respecto, así como la seguridad del suministro de RSU que se valoricen energéticamente, modelo económico que contribuye a la economía circular y existencia de incentivos fiscales. Con referencia a los resultados presentados, se concluye que existen tecnologías para la valorización energética de los residuos sólidos urbanos, que contribuyen a su gestión integral y, gracias a la transformación energética, se

reintegran al sistema productivo. En el modelo de proceso de jerarquía analítica que intentó establecer una alternativa teórica a la recuperación de energía RS en Bogotá, se priorizó el incinerador (30,2 %), seguido del pirólisis (24,10 %) y la gasificación (23 %), que se muestran y los pesos son más similares. Importancia, y finalmente se considera una alternativa a la digestión anaerobia (22,6%).

(GARCIA, 2016) analizó a profundidad la valorización energética de residuos sólidos urbanos como combustibles alternativos para los hornos de las cementeras. La recuperación energética a partir de estos residuos en los hornos cementeros puede contribuir significativamente a apoyar las estrategias planteadas por las autoridades correspondiente al manejo de residuos sólidos y cumplir con algunas de las metas en temas relacionados al cambio climático. Como conclusión de esta investigación se determina que la sustitución de residuos con alto poder calorífico en hornos de cemento es una opción favorable siendo un claro ejemplo de soluciones sociales y medioambientales ya que: Se evita el vertido de grandes cantidades de residuos en vertederos y por tanto permite su aprovechamiento y minimiza el impacto sobre el medio ambiente, reducen el consumo de fuentes energéticas no renovables, se disminuyen las emisiones de CO<sub>2</sub> y algunos compuestos con efectos ambientales adversos.

(VARGAS, y otros, 2014) A través de sus investigaciones, han demostrado que el aprovechamiento material y energético de los residuos municipales para la producción industrial de combustibles alternativos (CDR), por un lado, representa una oportunidad para la gestión ambiental empresarial. Por otro lado, ayuda a apoyar la gestión integral de residuos sólidos en el sector público local. Este estudio analiza el valor calorífico potencial de los residuos sólidos urbanos (RSM) de Guanenta como base para la producción de RDF para reemplazar el carbón bituminoso en la industria del cemento para la producción de clinker. Al utilizar RDF como combustible alternativo renovable se evita el 5,72% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se producen 12.300 ton/año de carbono neutro y 1.128 ton/año de CO<sub>2</sub> la neutralidad es de 5,4, se puede concluir que se puede evitado reemplazando%. Antracita necesaria a través de la posibilidad de residuos domésticos.

(GALARZA, y otros, 2020) Estudio elaborado en Cuenca, Ecuador donde elaboraron una tesis de investigación titulada “Caracterización de los residuos sólidos industriales de la Ciudad de Cuenca para Coprocesamiento para la industria cementera” para obtener el título de ingeniería civil. Este estudio se enfoca en caracterizar los residuos sólidos industriales de la ciudad de Cuenca para su coprocesamiento en la industria cementera, y proporciona alargar la vida útil de rellenos sanitarios, reciclaje de residuos industriales y coprocesamiento, un sistema típico de mejora. La estructura que se llevó a cabo en este proyecto da un aprovechamiento superior en comparación con la que se inició. Después de la investigación se puede observar que se cumplen las expectativas esperadas, que era aumentar la vida útil del relleno, ya que ahora se aprovechan alrededor de 20 toneladas diarias, que son enviadas a las cementeras para servir con la combustión y la energía que esta emite al ser incinerada.

Así mismo, presentamos los estudios realizados a nivel nacional pues en nuestro País investigaciones acerca del Coprocesamiento son casi inexistentes. (PEÑA, 2018) decidió realizar su investigación para obtener el título de Ingeniero Ambiental a través de su tesis titulada “Alternativas de valorización y aprovechamiento energético a través de Coprocesamiento de residuos sólidos en la industria cementera” Este estudio tiene como objetivo desarrollar alternativas de valorización y aprovechamiento de materiales mediante el Coprocesamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) en Arequipa y el distrito de Yura de la región. Para ello, se realizó un diagnóstico del estado actual de los RCD generados en Yura. Se analizó y correlacionó información sobre las demandas energéticas del proceso de fabricación del cemento, las propiedades de los cementos más exigentes en el entorno, las condiciones para el uso de combustibles alternativos, la composición química de los RCD y la observación de los constituyentes químicos, por ejemplo, bajo la influencia del calor; y finalmente, con base en la experiencia, sugerir alternativas de recuperación y uso.

(BURGA, y otros, 2020) Estudio realizado en Trujillo, Perú. Mediante su tesis para optar el grado académico de Doctora en Ciencias Ambientales, Los resultados afirman que es una información muy importante para evaluar y proponer diversas técnicas de conversión y valorización energética en relación con la composición

química de los residuos. A la hora de utilizarlos como combustibles es necesario conocer sus principales propiedades (análisis físico, contenido energético, punto de fusión de las cenizas y análisis elemental).

(ZEVALLOS, y otros, 2020) Este estudio se realizó en la ciudad de Arequipa, Perú. Resulta que el coprocesamiento es una buena alternativa al problema de la generación de residuos sólidos y tiene valores energéticos que pueden ser aprovechados analizando su poder calorífico y gestionando adecuadamente. Menciona el coprocesamiento como una opción para tratar los residuos sólidos para aprovechar la energía. Se presenta como resultado del residuo esencialmente identificado de alto poder calorífico. Poder calorífico 1.411 MJ/kg, 0.424 MJ/kg, 0.276 MJ/kg, 0.746 MJ/kg madera, papel, cartón corrugado, plástico. También se afirma que es importante la correcta selección de los residuos sólidos, ya que los residuos sólidos deben tener las propiedades requeridas para su uso en el coprocesamiento.

A continuación, presentamos la legislación nacional, De acuerdo al "Decreto Legislativo N° 1278 - Ley de Gestión Integral de Residuos sólidos", tiene como concepto que la Valorización energética son operaciones destinadas a utilizar los residuos para aprovechar su potencial energético, tales como: co-incineración, Coprocesamiento, generación de energía a partir de procesos de biodegradación, entre otros.

Según el artículo 2 del "Decreto Legislativo N° 1278 - Ley de Gestión Integral de Residuos sólidos", tiene como finalidad, con relación a los residuos que se generan, lo preferible será recuperar tanto en valorar material y energéticamente los residuos, para ello se tendrá en cuenta a la reutilización, reciclaje, compostaje, Coprocesamiento, entre otras garantizando siempre el cuidado de salud y ambiente.

De igual forma menciona en el Artículo 5, sobre la valorización de residuos: Los residuos sólidos con potencial económico y que a su vez son generados por los procesos de bienes y servicios, se priorizará su valorización, y se debe considerar actividades de: reciclaje de sustancias inorgánicas y metales, generación de energía, producción de compost, fertilizantes u otras transformaciones biológicas.

Así mismo la Ley menciona en el artículo 15 al Ministerio del Ambiente (MINAM) en calidad de ente rector a nivel nacional para la gestión y manejo de los residuos, tiene competencia en: brindar Normas respecto al manejo de los residuos sólidos, incorporando a los residuos que pertenecen a la infraestructura de manejo de residuos sólidos, reutilización, recuperación, valorización tanto material como energética; entre otros.

Del mismo modo en el Artículo 37 habla sobre valorización, que debe ser prioridad en lo que concierne a la disposición final de residuos pues esto constituye en la adecuada gestión y manejo de residuos. Incluye actividades como: reutilización, reciclaje, compostaje, valorización energética entre otras, así mismo se debe realizar en infraestructura adecuada y autorizada para tal fin. Así mismo, en el Artículo 48 sobre las formas de valorización nos menciona que constituyen operaciones de valorización energética, a aquellas operaciones que son determinadas a utilizar residuos con el objetivo de aprovechar el potencial energético, tales son: coprocesamiento, coincineración, generación de energía, biochar, y otros.

El Instituto Nacional de Calidad (INACAL) A través de ciertos programas, priorizamos la aprobación de las Normas Técnicas Peruanas (NTP) relacionadas con el manejo, tratamiento y diversas actividades de valorización de los residuos sólidos, tales como reutilización, reciclaje, compostaje y valorización energética.

De igual forma, se presentan diversos conceptos relacionados con los RESIDUOS en diversos campos. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) dijo: Se gana valor porque no hay tecnología adecuada para su uso o no hay mercado para los productos recuperados. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) dijo: "Abandonados, es decir, desechados, reciclados o naturales." Agencia de las Naciones Unidas "Materiales que no tienen utilidad directa y son desechados por el propietario."

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente "Materiales enumerados en la legislación nacional, materiales identificados como desechos en listas o tablas pertinentes y, en general, excedentes o desechos destinados a la eliminación que ya no son útiles o necesarios. "Convenio de Basilea" Una sustancia u objeto cuya

disposición se va a realizar, debe realizarse de conformidad con la legislación nacional”.

A modo de comentario ante las definiciones presentadas, se da evidencia que, al momento de generarse el residuo por parte del consumidor, industria o cualquier otra actividad aún le queda un extenso camino por recorrer hasta ser considerado como tal. Así mismo se puede diferir que el concepto va cambiando y evolucionando a lo largo del tiempo.

Según el “Principio de jerarquía en la gestión de residuos”, evitar a toda costa la generación de residuos es el primer propósito de la gestión integral; pero si no se puede evitar, entonces se procura minimizar de forma que se utilice el criterio de reducir, reutilizar y reciclar. Por tal motivo, si no es posible minimizar, se debe proponer un mejor tratamiento, y si el tratamiento no es posible, entonces recién se debe pensar en la disposición final. (RONDON, y otros, 2016)

De manera resumida, es posible visualizar lo siguiente:

- i. Se debe evitar generar residuos desde el comienzo.
- ii. Reducir lo más que se pueda la generación del residuo.
- iii. Reutilizar aquellos residuos que se generan y esto puede ser en su misma cadena de producción o en otra semejante.
- iv. Valorizar los residuos por medio de: recuperación de energía, reciclaje o Coprocesamiento, u otros.
- v. Tratar aquellos residuos que se generan antes de su disposición final.
- vi. Disponer una mínima cantidad de residuos. (RONDON, y otros, 2016)

**Figura N°01: Jerarquía de gestión de los residuos**



**FUENTE:** [coprocesamiento.org](http://coprocesamiento.org)

Según la Federación Interamericana del Cemento (FICEMAPCAC) El coprocesamiento es un proceso que consiste en ingresar al horno de cemento con residuos que son acondicionados previamente y que sirven como energía térmica o materia prima en la producción de cemento, residuo que se dispone de manera eficiente generar nuevos residuos, cenizas o emisiones diferentes a las originales ya que todos los materiales involucrados son convertidos en energía o incorporados al clinker de forma permanente e irreversible, manteniendo de esta manera la protección ambiental y calidad del producto final. La industria del cemento ha sido pionera a nivel mundial en la implementación de proyectos de cotratamiento de residuos. El coprocesamiento es la integración ambientalmente segura de uno o un subproducto en otro proceso de producción.

Para (JENSEN, 2016) define al Coprocesamiento, según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), por medio del Convenio de Basilea, como la utilización de materiales de desecho que son idóneos en procesos de fabricación para rescatar tanto energía como recursos y de esta manera reducir el uso de combustibles y materias primas tradicionales por medio de su reemplazo en sus procesos, así mismo hace la acotación que en países en desarrollo se ha convertido en una gran oportunidad de crecimiento en la última década con lo que respecta al desafío que presenta la gestión racional de los residuos.

Por otro lado, afirma que la disponibilidad de infraestructura adecuada para el manejo de residuos en los países de América Latina es uno de los principales problemas ambientales que enfrentan los gobiernos en la actualidad. Una cultura basada en la disposición final de los residuos en vertederos abiertos o mal gestionados sigue siendo la ruta principal para la eliminación de residuos. Construir un mecanismo eficiente para ascender en la jerarquía de gestión de residuos es una tarea continua, y su éxito está en las soluciones sostenibles para la recolección, el uso, el reciclaje y la reutilización debe haber un producto de gestión de residuos que permita la migración.

Es así que el autor manifiesta que el Coprocesamiento debe cumplir con ciertos principios para poder desarrollar actividades sostenibles basados en la jerarquía de gestión de residuos, comportamiento ambiental y calidad del producto final.

**Tabla N°01: Principios para el coprocesamiento**

<p><b>PRINCIPIO I</b></p>	<p><b>EL COPROCESAMIENTO RESPETA LA JERARQUÍA DE RESIDUOS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El coprocesamiento no entorpece los esfuerzos por minimizar los residuos y no se usarán residuos en los hornos rotatorios de cemento si se dispone de mejores maneras de recuperación ambiental y económicamente.</li> <li>• El coprocesamiento debe considerarse como una parte integral de la gestión de residuos moderna, ya que la gestión de residuos proporciona una opción de recuperación de recursos saludable para el ambiente.</li> <li>• El coprocesamiento cumple con los convenios ambientales internacionales; por ejemplo, el Convenio de Basilea y Estocolmo.</li> </ul>
<p><b>PRINCIPIO II</b></p>	<p><b>DEBEN EVITARSE LAS EMISIONES ADICIONALES Y EL IMPACTO NEGATIVO EN LA SALUD DEL SER HUMANO:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prevenir o mantener a un mínimo absoluto los efectos negativos de la contaminación en el ambiente, así como los riesgos para la salud del ser humano.</li> <li>• Con base en las estadísticas, las emisiones atmosféricas no deben ser mayores que las de la producción de cemento con combustible tradicional.</li> </ul>
<p><b>PRINCIPIO III</b></p>	<p><b>LA CALIDAD DEL PRODUCTO DE CEMENTO PERMANECE SIN MODIFICACIÓN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El producto (Clinker, cemento, concreto) no debe ser adulterado como si fuera un sitio de disposición final para metales pesados.</li> <li>• El producto no debe tener ningún impacto negativo en el ambiente, como se demuestra con pruebas de lixiviación.</li> <li>• La calidad del cemento permitirá la recuperación de final de ciclo.</li> </ul>
<p><b>PRINCIPIO IV</b></p>	<p><b>LAS COMPAÑÍAS COMPROMETIDAS CON EL COPROCESAMIENTO DEBEN ESTAR CAPACITADAS:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tener buenos registros de cumplimiento ambientales y de seguridad y proporcionar información relevante para el público y las autoridades adecuadas.</li> <li>• Tener personal, procesos y sistemas en el lugar que demuestren el compromiso con la protección ambiental, la salud y la seguridad.</li> <li>• Asegurarse de que todos los requisitos cumplen con las leyes, reglas y reglamentos aplicables.</li> <li>• Ser capaces de controlar los insumos y parámetros de procesos que se requieren para el coprocesamiento eficaz de residuos.</li> <li>• Asegurar buenas relaciones con el público y otros participantes en proyectos de gestión de residuos locales, nacionales e internacionales.</li> </ul>
<p><b>PRINCIPIO V</b></p>	<p><b>LA IMPLEMENTACIÓN DEL COPROCESAMIENTO TIENE QUE CONSIDERAR CIRCUNSTANCIAS NACIONALES:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los requisitos y necesidades específicos del país deben reflejarse en los reglamentos y procedimientos.</li> <li>• Una implementación gradual tiene en cuenta la formación de la capacidad requerida y el establecimiento de acuerdos institucionales.</li> <li>• La introducción del Coprocesamiento va junto con otros procesos de cambio en el sector de gestión de residuos de un país.</li> </ul>

**FUENTE:** Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento Cooperación Público-Privada GTZ-Holcim, 2006.

**Figura N°02: Procedimiento para el Coprocesamiento**



FUENTE: coprocesamiento.org

**Tabla N°02: Residuos a evitar en el Coprocesamiento**

RESIDUOS A EVITAR
Residuos Radioactivos
Residuos Infecciosos
Residuos Explosivos
Fibras de asbesto
Residuos con alto contenido de Mercurio
Residuos con alto contenido de Cianuro

Fuente: Elaboración Propia

Combustibles Alternativos y Materias Primas (AFR), AFR se refiere a residuos y subproductos seleccionados que pueden procesarse simultáneamente en la fabricación de cemento. El combustible alternativo (AF) tiene un contenido de energía utilizable (valor calórico) que reemplaza parte de la demanda energética de los combustibles fósiles tradicionales. Las llamadas materias primas alternativas (AR) están comprendidas de minerales adecuados como: calcio, ácido silícico, alúmina, hierro y azufre, que pueden reemplazar las materias primas para la producción de clínker y los componentes minerales para la producción de cemento. (HINKEL, y otros, 2020).

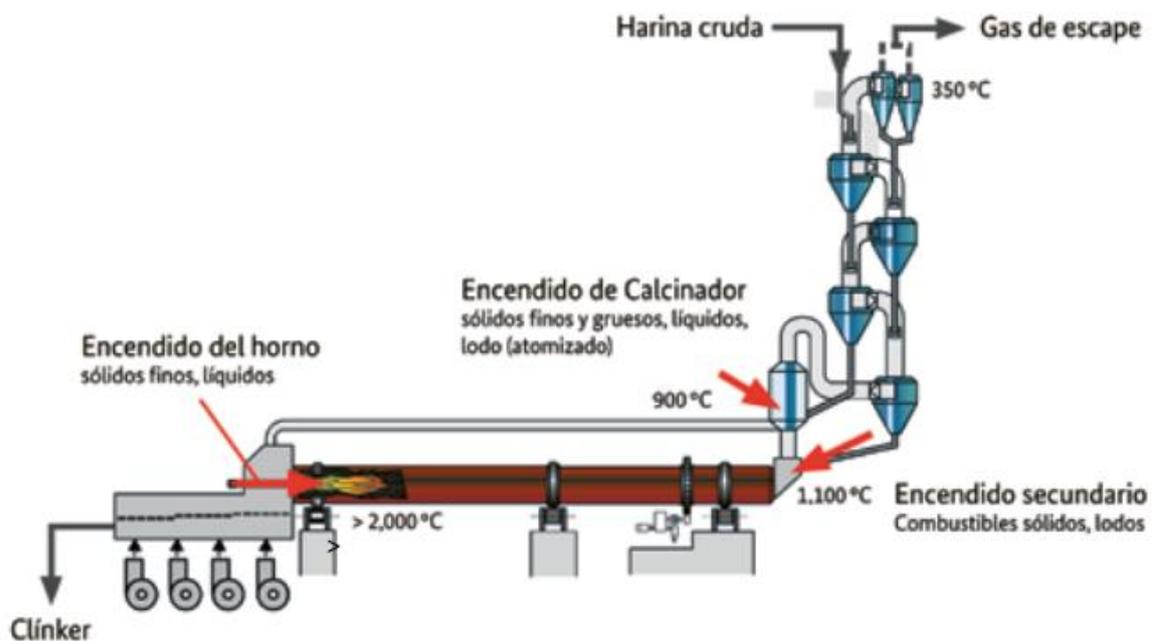
Clinker, La producción de cemento es un proceso que consume mucho material y energía. Después de extraer la materia prima natural, se somete a varios procesos de procesamiento mecánico, como trituración, molienta y homogeneización para producir la denominada harina cruda con un molino de materia prima. La harina cruda ingresa a una planta de horno de cemento, donde se llevan a cabo procesos térmicos (secado, precalentamiento, enfriamiento) y reacciones químicas (calcinación, tintineo) para obtener el producto intermedio clínker. Al final, el clínker se tritura en cemento con yeso y otros ingredientes.

Para producir una tonelada promedio de clínker se requieren toneladas de materias primas. Gran parte de la pérdida de peso se debe a la calcinación, la reacción del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) con la cal ( $\text{CaO}$ ), que tiene lugar después de que el polvo crudo se calienta a  $800\text{-}900^\circ\text{C}$ . A medida que la temperatura en el horno rotatorio aumenta a  $1450^\circ\text{C}$ , aquí es cuando comienza la fundición, ya que la cal, la sílice, el aluminio y el hierro reaccionan entre sí y se combinan para formar escoria. Los depósitos naturales de cal como la piedra caliza, la piedra caliza o la creta son una buena fuente de carbonato de calcio.

Los principales modificadores (sílice, hierro y alúmina) generalmente provienen de minerales naturales, como arena, esquisto, arcilla y mineral de hierro. Sin embargo, la AR derivada de residuos se puede usar para reemplazar estas soluciones naturales. AFR se puede implementar en varios puntos del proceso de fabricación de clínker. Cada punto de alimentación ofrece diferentes condiciones de proceso (temperatura, tasa de gas, etc.) y, por lo tanto, es adecuado para diferentes calidades de AFR. Así, en las modernas plantas de hornos de cemento de la técnica

anterior, el combustible se suministra al proceso en puntos principales, primero al precalentador para la reacción de calcinación y a través del quemador principal del horno a la salida del horno rotatorio para la reacción de clinkerización. También puede agregar una reducida porción de sus necesidades energéticas totales a la entrada del horno rotatorio. Esto es lo que se llama post-disparo.

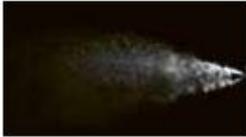
**Figura N°03:** Puntos de alimentación de AFR de un sistema de horno de cemento de última generación.



**Fuente:** Directrices sobre Coprocesamiento de Residuos en la Producción de Cemento.

Para AF fijo, el punto de alimentación está condicionada mayormente por el grado de procesamiento, especialmente tamaño de partículas y poder calorífico. Para AF (lodos) líquidos y pastosos, la elección de los puntos de aplicación depende de si se pueden pulverizar sobre gotas/partículas más o menos finas. (HINKEL, y otros, 2020).

**Figura N°04:** Diferentes categorías AF para diferentes fuentes de alimentación.

Categoría AF	Característica	Ejemplos	Imagen
<b>Combustibles sólidos</b>	No pueden ser transportados por los gases del horno (se quema a la entrada del horno)	Neumáticos enteros, tortas de filtrado, material en bolsas	
<b>Sólidos gruesos</b>	Pueden ser transportados por los gases del horno (adecuado para pre-calcinación). La alimentación neumática no es posible.	Virutas de neumáticos, plásticos y textiles triturados, RDF grueso	
<b>Sólidos finos</b>	Pueden ser transportados fácilmente por los gases del horno (adecuado para el encendido del horno). La alimentación neumática es posible.	Pelusa (RDF fino), aserrín impregnado, harina animal, cáscara de arroz	
<b>Lodos</b>	Bombeable con bomba de pistón → combustible sólido. Si se atomiza por aire comprimido o rotor de lodos → sólido grueso.	Lodos de petróleo/pintura	
<b>Líquidos</b>	Comprimido o rotor de lodo sólido grueso. Pueden ser atomizados con aire comprimido (partículas sólidas en líquido <2-4 mm).	Aceite de desecho, disolventes, emulsiones	

**FUENTE:** Directrices sobre Coprocesamiento de Residuos en la Producción de Cemento.

El Poder energético son las propiedades calorimétricas de los residuos y para ello se establecen parámetros para los que se diseñan las instalaciones de incineración y valorización energética. Su apreciación, fruto de la gran variedad de sus componentes, viene marcada por el poder calorífico de cada producto. En general, se puede decir que el poder calorífico de todos los residuos sólidos municipales está entre 1.500 y 2.200 kcal/kg. Así mismo para (JENSEN, 2016) menciona que los tipos de residuos disponibles, y sus cualidades asociadas, determinarán el potencial teórico para el coprocesamiento. Cuanto mayor sea el valor térmico de los materiales, con el bajo contenido de elementos nocivos para el proceso de fabricación en hornos de cemento y su comportamiento ambiental, mayores serán las perspectivas potenciales de coprocesamiento en una sola planta. En la medida de lo posible, también mencionó que la eficiencia en las tareas de selección y separación sería fundamental para proporcionar un combustible alternativo con

poder calorífico suficiente para impulsar la producción de clinker a un alto nivel adecuado.

De igual modo mencionó que un parámetro de calidad de un combustible alternativo sería su contenido de humedad (contenido de agua), que naturalmente está relacionado con la fuente de los desechos municipales. Una humedad superior al 20 % puede provocar dificultades de funcionamiento, principalmente relacionadas con el consumo de calor del horno de cemento y la eficiencia de producción del horno (pueden producirse pérdidas de producción).

Otro valor interesante a conocer es la temperatura a la que se funde y solidifica la ceniza resultante de la combustión de estos materiales. El punto de fusión de la ceniza es 1200°C. (CASADO)

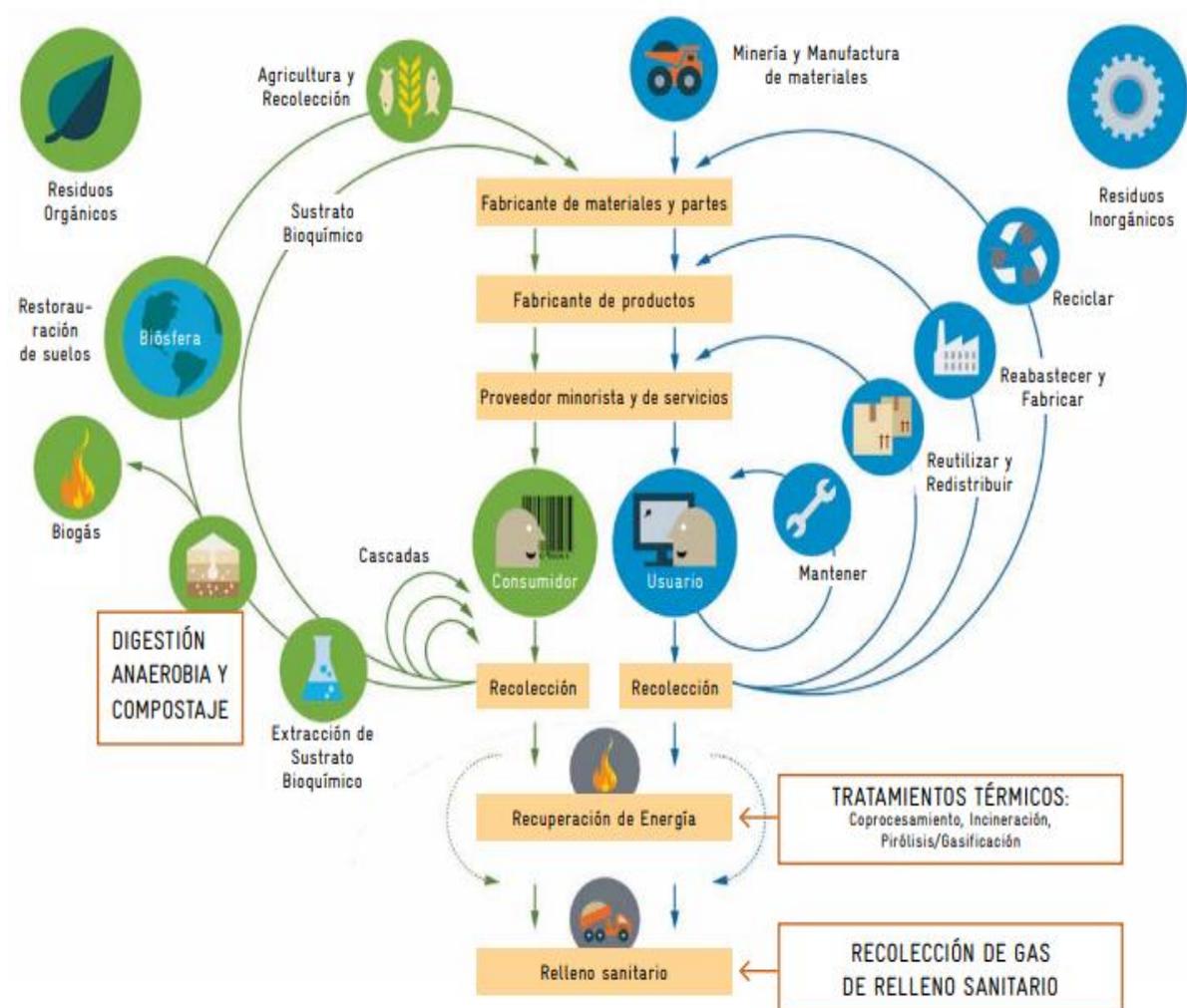
**Tabla N°03: Contenido energético de los residuos**

CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS			
Componentes	PCI en Kcal/Kg		Cenizas y otros rechazos en %
	Variación	Típico	
Residuos de comida	600-800	700	8
Madera	4.000-5.000	4.600	2
Papel y cartón	2.400-4.000	2.500	12
Plásticos	6.200-7.200	6.600	3 <sup>1</sup>
Textiles	3.000-4.000	3.400	6 <sup>1</sup>
Vidrio			98
Metales			98

Nota: Valoración sobre base seca.  
Fuente: Gestión integral sobre los residuos sólidos

Para (PRIETO, y otros, 2017) La economía circular (EC) es un modelo cuyo principal objetivo es crear auge económico, preservar el ambiente y prevenir la contaminación, facilitando de esta manera el desarrollo sostenible. El creciente interés de los gobiernos, la industria y la sociedad por implementar una economía circular nos lleva a reflexionar sobre su conexión directa con el fin último de este modelo: la Sostenibilidad. De la misma manera, la EC puede enfrentar los desafíos del crecimiento económico actual y la productividad porque promueve flujos circulares para la extracción, conversión, distribución, uso y recuperación de materiales y energía a partir de productos y servicios comercialmente disponibles.

**Figura N°05:** El principio de la economía circular. El papel de las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos sólidos.



FUENTE: Fundación Ellen MacArthur

A veces se suele confundir al co-procesamiento con la incineración de residuos, pero sin embargo ambas son tecnologías muy distintas, cada una con un propósito y ventajas diferentes, así como lo manifiesta (CEMEX, 2021) a través de la Tabla N°04.

**Tabla N°04: Comparación entre incineración y co-procesamiento**

Incineración	Co-procesamiento
Definición en LGPyGIR: XIII., incineración: Cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos.	Definición en LGPyGIR: IV, Co-procesamiento: integración ambientalmente segura de los residuos generados por una industria o fuente conocida, como insumo a otro proceso productivo.
Convierte la materia en cenizas que deben ser dispuestas en rellenos sanitarios o confinamientos controlados	No genera nuevos residuos y por tanto no genera pasivos ambientales
Las temperaturas de operación se encuentran entre 850°C y 1100°C	La temperatura a la cual opera se encuentra entre 1100 a 2000°C
La construcción y operación de incineradores implican altos costos económicos	Es un método económicamente viable al emplear hornos ya existentes
La energía consumida es para la destrucción de un residuo, sin aprovechamiento masico o energético	Emplea la energía y la masa disponible del residuo para la manufactura de un producto
Destrucción parcial de los residuos, sin aprovechamiento alguno	Integración de los residuos para aprovechamiento de su energía calorífica y su aporte masico.
Al generar más residuos demanda más espacios para rellenos sanitarios	Es posible el aprovechamiento de los residuos como combustible alterno, maximizando la vida útil de los rellenos sanitarios
Incrementa o mantiene el uso de los combustibles fósiles	Disminución del uso de combustibles fósiles

**Fuente:** (CEMEX, 2021) *Residuos Expo 2021*.

### **III. METODOLOGÍA**

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

La investigación es de tipo aplicada, con enfoque cualitativo. La investigación aplicada es la investigación que se enfoca en resolver un problema específico en industrias o servicios. Además, este estudio establece modelos basados en conocimientos probados. El enfoque cualitativo observa la realidad y su contexto natural, organiza la información, infiere e induce información para explicar fenómenos con los sujetos que participan en ellos. El estudio es aplicado y su objetivo es dar alcance sobre la viabilidad de la valorización energética de los residuos sólidos municipales a través del coprocesamiento, el cual no contribuye a la ampliación del conocimiento, ya que se limita al análisis e investigación de la narrativa. Utilizando diseño de tema narrativo cualitativo de tópicos. El diseño narrativo es un procedimiento adaptable que crea un sistema ordenado sobre recursos narrativos, psicológicos y técnicos investigados individualmente. La investigación del diseño narrativo de tópicos realizó la clasificación y subclasificación de la información recolectada. El estudio utilizará un diseño narrativo del tema, ya que utilizará un tema específico basado en un informe descrito por expertos en el tema de valorización energética por coprocesamiento en todo el mundo, además de apoyarse en una gran cantidad de artículos científicos. para obtener un relato trascendente sobre el tema de investigación.

#### **3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística**

En el Anexo 01 Se detallará la matriz de categorización apriorística donde se muestren los problemas específicos, objetivos específicos, categorías y subcategorías.

### **3.3. Escenario de estudio**

El escenario de estudio que abarcó la investigación fue en países dónde se aplicó el coprocesamiento como fuente de energía y cómo una alternativa de valorización energética, en países como Colombia, México, España y en nuestro país en las ciudades de Arequipa y Trujillo.

Estos escenarios de investigación resaltan la realidad, dónde nosotros como investigadores poseemos capacidad para explorar estos campos de investigación.

### **3.4. Participantes**

La elección de los artículos científicos, manuales, tesis y páginas nacionales como: ministerio del ambiente (Minam). Y el uso de palabras claves para la indagación de información consultada en la base de datos de: Scielo, Scopus, ScienceDirect y Google académico. Dónde dichos resultados de la investigación serán utilizados para analizar la situación y viabilidad de la valorización energética por coprocesamiento de residuos sólidos municipales.

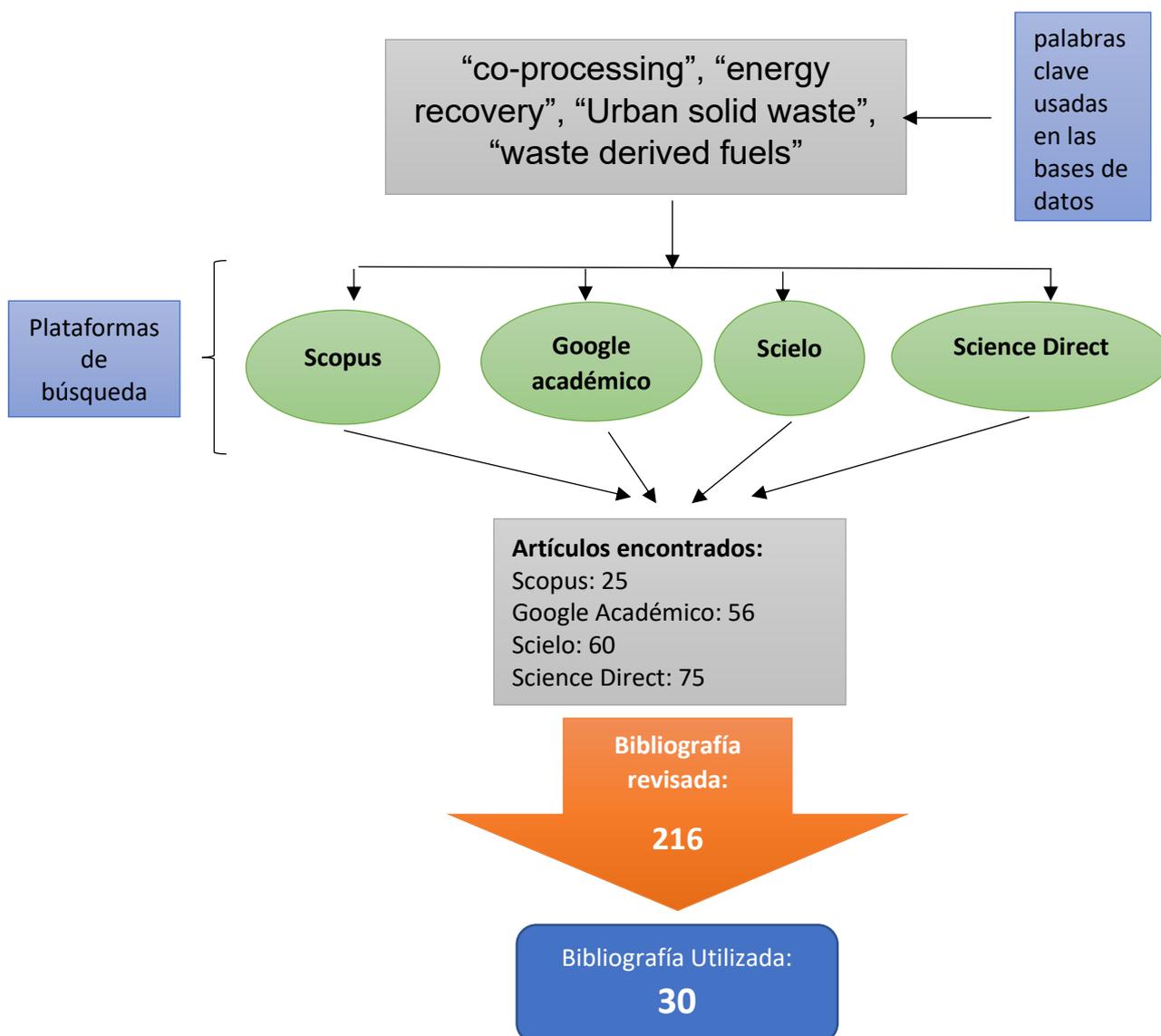
### **3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

La técnica utilizada fue una revisión sistemática que fue una recopilación bibliográfica de una serie de artículos científicos internacionales y locales, cuyas frases o palabras se utilizaron para la búsqueda de estos artículos. Se utilizaron palabras clave en inglés referentes a nuestro tema, toda la información recopilada se colocó en una tabla. (antecedentes y resultados de Coprocesamiento); de esta manera nos permitió organizar con facilidad los diferentes contenidos de información existente y de esta forma se realizó la planificación de esta investigación.

### 3.6. Procedimiento

En primer lugar, se realizó una búsqueda de artículos científicos relacionados con el tema de investigación, utilizando las palabras clave en inglés como: “co-processing”, “energy recovery”, “Urban solid waste” o “waste derived fuels” que significan “coprocesamiento”, “Valorización energética” y “Residuos sólidos urbanos”, palabras claves que fueron consultadas en las diversas bases de datos, es así que, en el proceso se realizó una revisión rápida para prescindir de una serie de artículos científicos no relacionados con nuestro tema de investigación y de esta manera se redujo la cantidad de artículos. A continuación, se realizó la valoración de cada artículo, considerando si el título y el resumen son relevantes para la información solicitada.

**Gráfico N°01: Procedimiento de información**



### **3.7. Rigor científico**

El rigor científico aplicado a una investigación cualitativa ayuda a establecer pautas y procesos teóricos y metodológicos para encontrar respuestas a los problemas planteados. Para ello se consideran aspectos importantes:

- La credibilidad o validez: Refleja la realidad del concepto previsto, es decir, un proceso iterativo de comparación y reconfirmación de conceptos y conocimientos adquiridos en la investigación.
- Transferibilidad o transferencia: Permite la transferencia de resultados a otros contextos de investigación para permitir comparaciones de investigaciones.
- Fiabilidad o confirmación: Esto incluye aplicar la misma técnica varias veces al mismo objetivo y siempre conduciendo al mismo resultado, esto también pretende revelar la claridad de los resultados que no se rigen por los propios intereses del autor.
- Consistencia: Se enfoca en la imparcialidad del análisis y evaluación de la información, se logra si se obtienen resultados similares en otras investigaciones.

Por ello, el rigor científico de este estudio se basa en mantener una postura creíble (validez) y confirmación a través de fuentes seleccionadas, es decir, la identificación de estudios realizados en contextos reales sin opiniones propias o suposiciones de los autores, también valorar las investigaciones que ameritan las plataformas oficiales. Por otro lado, para determinar el aspecto de consistencia se utilizó palabras claves de búsqueda (todo lo concerniente a valorización energética por Coprocesamiento), obteniendo artículos verificables y aptos para la investigación. Finalmente, el aspecto transferencia se introduce mediante la comprobación, es decir, verificar si la información obtenida es cierta o no.

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

La recolección de información para la construcción de esta investigación se hizo con base en los procedimientos del punto 3.6. Mientras que, para el proceso de análisis de datos, se hizo con base en los criterios especificados para cada categoría descrita en la sección 3.2.

El procedimiento realizado fue en base a la matriz apriorística donde se menciona los tipos de residuos municipales, Poder calorífico de residuos sólidos y Ventajas del Coprocesamiento; de los cuales se generaron 3 subcategorías para cada una; Tipos de residuos municipales (Orgánicos, Inorgánicos y No aprovechables), Poder calorífico de residuos sólidos (Aprovechables y no aprovechables) y Ventajas del Coprocesamiento (Ambientales, sociales y económicas).

### **3.9. Aspectos éticos**

La investigación realizada corresponde al resultado de la revisión sistemática, deducción, inferencia y análisis de datos y pertenecen exclusivamente a los autores de esta investigación. Para esta investigación se tiene en cuenta a los autores de artículos científicos, libros, revistas, tesis, entre otros, mediante la cita con estilo ISO 690. También, para afianzar la validez de la investigación se recurrió a buscadores confiables como: Scielo, ScienceDirect, Scopus, Google Académico, para de tal forma cumplir con los aspectos éticos de la Universidad Cesar Vallejo. En tal sentido, si los autores incurren en las infracciones previstas en la resolución del Consejo Universitario N° 01262017/UCV, artículo 22, los autores estarán sujetos a consideración del Tribunal de Honor de la Universidad.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 4.1. Identificación de residuos utilizados para coprocesamiento

De acuerdo con el primer objetivo específico, donde se pretende: Identificar los Tipos de residuos municipales que se utilizan para realizar coprocesamiento, se procedió a hacer un análisis de todos los artículos científicos seleccionados para así determinar que residuos sólidos municipales que se utilizan, esta información se encuentra descrita en la Tabla N°05.

**Tabla N°05: Residuos Sólidos Municipales Coprocesables**

Residuos Sólidos Municipales	
Residuos Orgánicos	Biomasa (aserrines, cascarilla de arroz, restos vegetales) Celulosa Basura de cocina Residuos de jardines y parques
Residuos Inorgánicos	Papel Carton Plastico Neumaticos Tetra Pack Caucho, cuero Textiles Vidrio Metal

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la tabla N°05 se presentan los distintos residuos sólidos que son aptos para ser coprocesados según el análisis de los autores siguientes; según (VELASCO y otros, 2019) evalúa el potencial de los residuos sólidos, mencionando a: Biomasa (aserrín y cáscara de nuez), neumáticos, FROEE (Madera, papel, cartón, plásticos y vestiduras automotrices) obteniendo así un poder calorífico inferior de 5553, 8869 y 5895 kcal/kg respectivamente. (HAN, y otros, 2019) nos dice que residuos como papel, plástico, caucho, basura de cocina, tela y madera son ideales para formar la mezcla de CDR (Combustible derivado de Residuos) para poder ser coprocesado; esta mezcla es capaz de producir un poder calorífico de 25,47 MJ/kg y de reemplazar hasta un 40% de los combustibles convencionales utilizados en cementeras y siderúrgicas. De igual manera (SILVA, y otros, 2020) nos indica que residuos como Orgánicos (Alimentos, desperdicios de alimentos, bebidas y tabaco, Residuos de jardines y parques,

Madera y productos de madera) e Inorgánicos (Papel, Cartulina, Vidrio, Rieles, tetra pack, Textiles) se vienen utilizando exitosamente en plantas cementeras del país de Brasil. (VARGAS, y otros, 2014) nos dice que residuos como Papel, cartón, residuos de jardín, residuos de textiles, residuos de madera y residuos de plásticos en conjunto tienen un poder calorífico 8,542 MJ/kg.

(GALARZA, y otros, 2020) manifiesta los altos niveles de cloro o mercurio en los desechos pueden causar problemas operativos o ambientales. Por lo tanto, los residuos de PVC-plástico, por ejemplo, no son aptos para el coprocesamiento. Así mismo menciona que se desea un poder calorífico de aproximadamente 10-15 MJ/kg para una operación económicamente robusta.

#### 4.2. Poder calorífico teórico de los residuos sólidos municipales

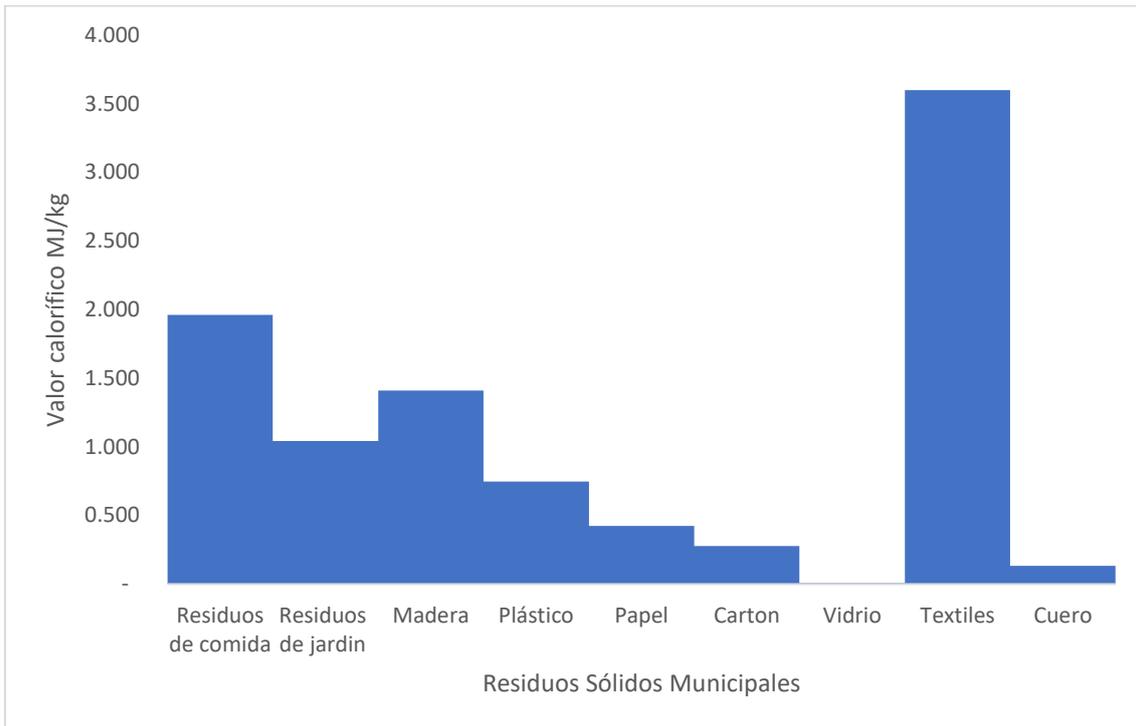
Sobre el poder calorífico de residuos sólidos municipales necesarios para su valorización mediante coprocesamiento se obtuvo como resultado los datos encontrados en la Tabla N°06 y el Grafico N°02.

**Tabla N°06: Poder calorífico Teórico de residuos sólidos municipales coprocesables**

Tipo de residuo	Residuo	Composicion Química					Valor Calorífico Teorico (MJ/kg)
		C	H	O	N	S	
Orgánicos	Residuos de comida	5.040	0.672	3.948	0.273	0.042	1.962
	Residuos de jardin	2.760	0.360	2.280	0.204	0.018	1.043
	Madera	3.960	0.480	3.416	0.016	0.008	1.411
Inorgánicos	Plástico	1.764	0.212	0.847	0.025	0.009	0.746
	Papel	1.224	0.164	1.249	0.008	0.424	0.424
	Carton	0.832	0.112	0.927	0.006	0.004	0.276
	Vidrio	0.015	0.003	0.012	0.003	0.000	0.007
	Textiles	1.728	2.304	1.440	0.079	0.007	3.599
	Cuero	0.270	0.036	0.052	0.045	0.002	0.134
TOTAL							9.602

**Fuente:** Elaboración Propia.

**Gráfico N°2: Poder calorífico Teórico de residuos sólidos municipales coprocesables**



**Fuente:** *Elaboración Propia.*

(VARGAS, y otros, 2014), (VARGAS TAGUA, 2014) y (PALA, 2006) nos dicen que el poder calorífico se puede determinar mediante un cálculo, si se conocen los %C, H, O, N y S de la sustancia; La fórmula utilizada para calcular el poder calorífico se denomina fórmula de Dulong modificada la cual es la siguiente:

$$\text{Valor calorífico (MJ/kg)} = (337 C + 1419 (H - 0,125 O) + 23 N + 93 S) / 1000$$

A partir de la información de la composición fisicoquímica de los residuos sólidos municipales y utilizando la fórmula de Dulong modificada por Nithikul 2007, los datos de poder calorífico en MJ/kg obtenidos para cada componente se incluyen en la tabla N° 06. Esto permite inferir que los residuos de textiles, residuos de alimentos, de madera, de jardines y residuos plásticos se pueden considerar residuos con potencial para realizar coprocesamiento.

(VARGAS, y otros, 2014) nos comenta que la producción de cemento en diferentes grados requiere del uso de fuentes de energía y calor y que para alcanzar la temperatura requerida en el proceso de producción de cemento se requiere combustible y energía eléctrica, son los factores que representan los

mayores costos en la producción de cemento. La energía del combustible necesaria para fabricar 1 kg de clínker es de 4,31 MJ.

(MUTZ, y otros, 2017) y (DIAZ, y otros, 2020) manifiestan que los residuos sólidos utilizados en el coprocesamiento deben tener varias características, incluido un alto poder calorífico, que oscila entre aproximadamente 8 MJ/kg o un valor sustancial, esto indicará que los residuos forman una mezcla idónea para proyectos de aprovechamiento energético. En esta investigación, podemos apreciar que la mezcla de los residuos seleccionados en la tabla N°05 tienen un total de 9.602 MJ/kg de valor calorífico teórico cumpliendo con lo señalado anteriormente.

Si bien es cierto que la industria del cemento es la que mejores resultados tiene a la hora de utilizar el coprocesamiento en sus procesos, este método de valorización energética es adaptable a industrias en las que se consumen en gran medida recursos y energía.

#### **4.3. Ventajas del coprocesamiento**

Con respecto a las ventajas que el coprocesamiento contribuye como valorización eficiente de los residuos sólidos municipales, estas se presentan en la Tabla N°07.

**Tabla N°07: Ventajas de coprocesar residuos solidos**

<b>VENTAJAS DE COPROCESAR RESIDUOS SÓLIDOS</b>
➤ Recupera energía
➤ Recicla
➤ Reutiliza materiales
➤ No deja residuos
➤ Disminución de combustibles fósiles no renovables
➤ Evita afectaciones en aire, agua y suelo
➤ Producción más eficiente ecológicamente
➤ Elimina la necesidad de invertir en un sitio de disposición final seguro
➤ Reducción en la utilización de materias primas

**Fuente:** Elaboración Propia.

Según Geocycle que es una empresa proveedora líder a nivel mundial de servicios de gestión de residuos industriales, agrícolas y municipales que gestiona los residuos de forma ambientalmente segura Coprocesando en hornos de cemento, menciona que el Coprocesamiento recupera energía, recicla y reutiliza materiales y no deja residuos, por ende, el Coprocesamiento ofrece una solución de residuos amigable con el medio ambiente (GEOCYCLEMX, 2018). Del mismo modo, para Argos, empresa productora y comercializadora de cemento y concreto, manifiesta lo mismo que la empresa Geocycle, que una de las ventajas del Coprocesamiento es que no se generan residuos como, por ejemplo; cenizas. Así mismo menciona que se reduce la disminución de combustibles fósiles no renovables, contribuye a la reducción global de gases de efecto invernadero y evita afectaciones en aire, agua y suelo creando así comunidades más sostenibles (ARGOS, 2016).

Para Holcim empresa suiza líder mundial en materiales y soluciones para la construcción con operaciones en cuatro segmentos de negocios: cemento, agregados, concreto y soluciones y productos. Su meta es liderar la industria en la reducción de las emisiones de carbono y avanzar hacia una construcción baja en carbono., menciona que una de las ventajas de realizar Coprocesamiento es ahorrar en combustible fósil y reducir el consumo de materias primas, lo que contribuye a una producción más eficiente ecológicamente hablando, también menciona que elimina la necesidad de invertir en un sitio de disposición final seguro. (LAFARGEHOLCIM, 2022). Del mismo modo para la empresa Votorantim Cimentos, compañía de cemento más grande de Brasil y la octava más grande del mundo, concuerda con la empresa Holcim pues menciona que una de las principales ventajas es la reducción de la utilización de materias primas, evitando así la utilización de recursos nuevos (OLIVEIRA, 2017). Para (MUTZ, y otros, 2017) una de las ventajas al realizar Coprocesamiento es la reducción de los costos de combustibles y de materia prima concordando así con los autores anteriores. Sin embargo, esa decisión de inversión depende de las fluctuaciones en los precios de mercado del carbón, el coque, el gas natural y las materias primas, u otros factores económicos. Cuanto mayor sea el costo del combustible primario o de las materias primas, más atractivo será invertir en coprocesadores.

## V. CONCLUSIONES

- Los residuos sólidos municipales más utilizados en coprocesamiento para valorización energética basado en experiencias en el extranjero son la basura de comida, residuos de jardines y parques, residuos de madera, biomasa, plástico, papel, cartón y residuos de textiles, así mismo, podemos deducir que los residuos como el PVC-plástico no son aptos para realizar coprocesamiento por su alto porcentaje en cloro y azufre.
- El poder calorífico de los residuos sólidos municipales que son utilizados para realizar coprocesamiento suma un total de 9.602 MJ/Kg siendo superior a lo establecido por los autores investigados que es de 8MJ/Kg. Además, podemos deducir que los componentes como textiles, residuos de comida, madera, residuos de jardín, y plástico tienen un poder caloríficas más elevado, y pueden considerarse como potenciales en la utilización de combustibles alternos para el coprocesamiento.
- El Coprocesamiento contribuye a una valorización eficiente de los residuos sólidos municipales puesto que las ventajas son: recicla, reutiliza materiales, no deja residuos, reduce la utilización de materias primas nuevas y lo más importante es que elimina la necesidad de invertir en un sitio de disposición final.

## **VI. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar análisis y monitoreos para generar información del porcentaje de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera que se reducen cuando se usa el CDR y realizar una comparación con las emisiones de gases que se emiten en el proceso tradicional de fabricación de cemento con materias primas.

Se recomienda detallar y mencionar los efectos negativos que generan ciertos residuos sólidos municipales que no son aptos para realizar coprocesamiento.

A las entidades privadas, instituciones de investigación y EO-RS, recomendamos se investigue e invierta en más tecnologías de valorización como el coprocesamiento ya que esta ofrece una mejor gestión y aprovechamiento material-energético de los residuos.

## REFERENCIAS

**AGUILAR, Sebastian y CRIOLLO, Eduardo. 2020.** *Caracterización de los residuos sólidos industriales de la Ciudad de Cuenca para Coprocesamiento para la industria cementera.* Cuenca, Ecuador : s.n., 2020.

**ARGOS. 2016.** *Coprocesamiento Argos.* 2016.

**BAIDYA, Rahul, GHOSTH, Sadhan y PARLIKAR, Ulhas. 2016.** *Co-processing of industrial waste in cement kiln – a robust system for material and energy recovery.* India : s.n., 2016.

**BURGA, Boggiano y DOLORES, Lucia. 2020.** *Valorización energética de los residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de trujillo.* Trujillo : s.n., 2020.

**CASADO, Esther.** *ambientum. ambientum.* [En línea] [Citado el: 11 de marzo de 2022.] [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/suelos/caracteristicas\\_quimicas\\_de\\_los\\_rsu.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/caracteristicas_quimicas_de_los_rsu.asp).

**CEMEX. 2021.** *Valorización hasta el último gramo.* Guadalajara : s.n., 2021.

**Christian, Zevallos y Nicolle, Dias. 2020.** *Análisis bibliográfico de los residuos con alto poder calorífico como alternativa de sustitución a los combustibles fósiles en la industria.* Arequipa : s.n., 2020.

**Cravioto, J, y otros. 2021.** *Benefits of a regional co-processing scheme The case of steel/iron and cement industries in Vietnam, Laos, and Cambodia.* Japon : s.n., 2021. Vol. 312.

**DIAZ, Andrea y ZEVALLOS, Arturo. 2020.** *Análisis bibliográfico de los residuos con alto poder calorífico como alternativa de sustitución a los combustibles fósiles en la industria.* Arequipa : s.n., 2020.

**ELFAHAM, M y ELDEMERDASH, U. 2018.** *Advanced analyses of solid waste raw materials from cement plant using dual spectroscopy techniques towards co-processing.* Egipto : s.n., 2018. págs. 338-346.

**GALARZA, Sebastián y MARTINEZ, Eduardo. 2020.** *Caracterización de los residuos sólidos industriales de la Ciudad de Cuenca para Coprocesamiento para la industria cementera.* Cuenca, Ecuador : s.n., 2020.

**GARCIA, Jesica Bañuelos. 2016.** *Implementacion del uso de combustibles derivados de residuos solidos como sustitucion de combustibles faciles, en la industria cementera.* Mexico : s.n., 2016.

**GEOCYCLEMX. 2018.** *CO-PROCESAMIENTO.* 2018.

**GOMES, André, y otros. 2018.** *Co-processing of hazardous waste: The perception of workers regarding sustainability and health issues in a Brazilian cement company.* Brasil : s.n., 2018.

**HAN, Jun , y otros. 2019.** *Refused derived fuel from municipal solid waste used as an alternative fuel during the iron ore sinter process.* Wuhan : s.n., 2019.

**HINKEL, Michael, y otros. 2020.** *Directrices sobre Pre- y Co-procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento.* Reinheim /Alemania : s.n., 2020.

**JENSEN, Andrés. 2016.** *Potencial para la valorización energética de residuos urbanos en México, a través del coprocesamiento en hornos cementeros.* México : s.n., 2016.

**LAFARGEHOLCIM. 2022.** *DESARROLLO SOSTENIBLE.* [En línea] 2022. [https://www.lafargeholcim.es/desarrollo-sostenible.](https://www.lafargeholcim.es/desarrollo-sostenible)

**MUTZ, Dieter, HENGEVOSS, Dirk y HUGL, Christoph. 2017.** *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos.* Eschborn : s.n., 2017.

**MUTZ, Dieter, y otros. 2017.** *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos .* Eschborn, Alemania : s.n., 2017.

**NAGLE, Angela, y otros. 2020.** *A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades.* Irlanda : s.n., 2020.

**OLIVEIRA, Fausto. 2017.** *Construcción Latinoamericana . Construcción Latinoamerica .* [En línea] 7 de agosto de 2017. [Citado el: 24 de marzo de 2022.] [https://www.construccionlatinoamericana.com/news/votorantim-invierte-m-s-en-coprocesamiento/4128528.article.](https://www.construccionlatinoamericana.com/news/votorantim-invierte-m-s-en-coprocesamiento/4128528.article)

**PALA, Henry. 2006.** *Estudio del potencial energético a partir de los residuos sólidos en algunos distritos del cono norte de Lima Metropolitana.* Lima : s.n., 2006.

**PARLIKAR, Ulhas , y otros. 2016.** *Effect of Variation in the Chemical Constituents of Wastes on the Co-processing Performance of the Cement Kilns.* India : s.n., 2016.

**PEÑA, Valery Dioses. 2018.** *ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE CO-PROCESAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA.* Lima, Perú : s.n., 2018.

**PERILLA, Angélica y PONGUTÁ, David. 2020.** *Selección de una alternativa valorización energética de residuos para la ciudad de Bogotá, utilizando el análisis jerárquico multicriterio(AHP).* Bogotá-Colombia : s.n., 2020.

**PRIETO, Vanessa, JACA, Carmen y ORMAZABAL, Marta. 2017.** *Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación.* San Sebastian - España : s.n., 2017.

**RONDON, Estefani, y otros. 2016.** *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios.* 2016.

**SILVA, Victor , CONTRERAS, Francisco y BORTOLETO, Paula . 2020.** *Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasília, Brazil.* Brasil : s.n., 2020.

**SIMAO, Lisandro, y otros. 2019.** *Characterization of pulp and paper mill waste for the production of waste-based cement.* Brazil : s.n., 2019.

**SINERGIAPE, ASESORE. 2019.** *Estudio de caracterización de residuos sólidos Municipales del distrito de Piura.* Piura, Perú : s.n., 2019.

**SONI, K, y otros. 2021.** *Thermochemical Recycling of Waste Plastics by Pyrolysis: A Review.* India : s.n., 2021.

**Suárez, Carolina , y otros. 2021.** *Waste surgical masks to fuels via thermochemical co-processing with waste motor oil and biomass.* Canada : s.n., 2021.

**VARGAS TAGUA, Frank. 2014.** *ALTERNATIVA DE VALORIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO Y MATERIAL POR COPROCESAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN UNA PLANTA PRODUCTORA DE CEMENTO EN LA PROVINCIA DE GUANENTÁ-SANTANDER COMO CONTRIBUCIÓN A LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA REGIONAL .* Bogotá : s.n., 2014.

**VARGAS, Frank C. y RAMIREZ, Yuleimy. 2014.** *Potencial de Energía Calorífica de los Residuos Sólidos Municipales para Reemplazar el Carbón Mineral.* Colombia : s.n., 2014.

**Velasco, Antonia, Lozoya Márquez, Luis Armando y González Sánchez, Guillermo. 2018.** *Potencial de residuos industriales generados en ciudad Huárez, Chihuahua,*

*Mexico, como combustibles alternos en un horno cementero.* Huárez, Chihuahua, México : s.n., 2018.

**VICZEK, S.A., y otros. 2021.** *Production of contaminant-depleted solid recovered fuel from mixed commercial waste for co-processing in the cement industry.* Australia : s.n., 2021.

**YANG, L, y otros. 2021.** *Field-scale study of co-processing dichlorodiphenyltrichloroethane-contaminated soil in a cement kiln.* China : s.n., 2021. págs. 133-140.

**YANG, Lili , y otros. 2019.** *Brominated dioxins and furans in a cement kiln co-processing municipal solid waste.* China : s.n., 2019.

**YANG, Lili, y otros. 2019.** *Unintentional persistent organic pollutants in cement kilns co-processing solid wastes.* China : s.n., 2019.

**YUH, Peter , y otros. 2022.** *Pilot-scale co-processing of lignocellulosic biomass, algae, shellfish waste via thermochemical approach: Recent progress and future directions.* China : s.n., 2022.

**ZEVALLOS, Christian y DIAS, Nicolle. 2020.** *Análisis bibliográfico de los residuos con alto poder calorífico como alternativa de sustitución a los combustibles fósiles en la industria.* Arequipa : s.n., 2020.

**ZHENG, R, y otros. 2022.** *Environmental and economic performances of municipal solid waste incineration fly ash low-temperature utilization: An integrated hybrid life cycle assessment.* Shaighai-China : s.n., 2022.

## ANEXOS:

Evaluación de la valorización energética por coprocesamiento de RS Municipales.

Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
¿Cuáles son los residuos sólidos municipales que son utilizados mayormente en el coprocesamiento?	Identificar los tipos de residuos sólidos municipales que son utilizados para realizar coprocesamiento	Tipos de residuos municipales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orgánicos</li> <li>• Inorgánicos</li> <li>• No aprovechables</li> </ul>	(HAN, y otros, 2019) (SILVA, y otros, 2020) (VARGAS, y otros, 2014)
¿Cuáles son los residuos sólidos municipales con mayor poder calorífico para su valorización mediante el Coprocesamiento?	Realizar un análisis del poder calorífico de residuos sólidos municipales necesarios para su valorización mediante el coprocesamiento	Poder calorífico teórico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orgánicos</li> <li>• Inorgánicos</li> </ul>	(MUTZ, y otros, 2017) (DIAZ, y otros, 2020)
¿Qué beneficios aporta el Coprocesamiento de residuos sólidos municipales?	Identificar las ventajas del coprocesamiento de residuos sólidos municipales	Ventajas del Coprocesamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económico</li> <li>• Ambiental</li> <li>• Social</li> </ul>	(GEOCYCLEMX, 2018) (ARGOS, 2016) (LAFARGEHOLCIM, 2022) (OLIVEIRA, 2017)