

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
ESCUELA DE POSGRADO



**MODELO DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DEL LODO
PROVENIENTE DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
RESIDUAL PARA REDUCIR EL RIESGO DE IMPACTO NEGATIVO
AL MEDIO AMBIENTE EN LA PROVINCIA DE CHICLAYO**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE
OPERACIONES Y LOGÍSTICA**

AUTORA

ZAIDA BRENILDA CHAVEZ ROMERO

ASESOR

Mtro. MARCOS GREGORIO BACA LÓPEZ

Chiclayo, 2019

DEDICATORIA

A mi familia: mi madre y mi hermana, que nunca han dejado de apoyarme y su camino de lucha me han inspirado a seguir adelante.

A mi padre, que hace más de 10 años me guía desde el cielo.

A Diego, mi esposo y compañero de vida, por todo su apoyo y comprensión, y porque me alienta a cada paso para que luchemos juntos por nuestra fuente de motivación: María Cristina.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida que me concede, una familia y permitirme seguir creciendo.

A mis amigos y profesores en Italia, por haberme facilitado las herramientas para completar este estudio.

A mi asesor, Ing. Marcos Baca López, por su paciencia y guía en la elaboración de esta tesis.

RESUMEN

El sistema de tratamiento de aguas residuales ubicado en el distrito de San José en la provincia de Chiclayo, presenta serias deficiencias en su proceso de tratamiento, gran parte de estos problemas se debe al excesivo almacenamiento de los lodos residuales al fondo de las lagunas de estabilización que no permiten eficiencias de remoción de contaminantes aceptables. Con el objetivo de proponer un modelo de valorización energética para estos residuos y reducir el riesgo de impacto ambiental negativo, se plantea la mejorar del sistema para alcanzar los LMP y ECA del agua vigentes en el país.

Los lodos residuales, presentan un potencial energético que puede ser aprovechado a través de procesos de conversión termoquímica. En la presente investigación se ha evaluado el proceso de gasificación del lodo a través de simulaciones utilizando el software Aspen Plus, considerando un reactor de tipo isotérmico y otro de tipo adiabático. El modelo adiabático permitió observar condiciones más cercanas a la realidad obteniendo que el PCI del syngas alcanza valores de hasta $4,5 \text{ MJ/Nm}^3$, empleando una mezcla de lodo con biomasa residual proveniente de actividades agrícolas de la región para alimentar el reactor, se pueden lograr incrementar el PCI hasta en 6 MJ/Nm^3 , para mezclas no mayores al 70% de biomasa. Sin embargo, las necesidades energéticas externas requeridas para garantizar un óptimo proceso de gasificación representan un balance energético poco favorable para los objetivos que se desean conseguir. No obstante, en el análisis ambiental y de costo – beneficio se demuestra que se reduce el riesgo de impacto negativo con el ambiente y por ende la mejora de la calidad de vida de la población.

Palabras clave: Agua residual, lodo de depuradora, gasificación, PCI, beneficios socio-ambientales.

ABSTRACT

San José wastewater treatment plant in Chiclayo city presents serious efficiency problems, mainly because sewage sludge remain into the facultative ponds causing poor pollution removal efficiencies. With the purpose of energy valorization of sewage sludge in the wastewater treatment plant and reducing the environmental impact, an improvement of the current plant was proposed in order to achieve Maximun Allowable Limit and Water Quality Standard according peruvian regulations.

Sewage sludge presents an energy potential which could be used through thermochemical conversion processes. Gasification process has been considered and evaluated using Aspen Plus software. Two reactor model have been considered: Isothermal reactor and adiabatic reactor for several simulations. Adiabatic reactor showed closer to reality conditions, LHV of syngas was 4,5 MJ/Nm³. In order to increase the LHV, residual biomass from agricultural activities of Lambayeque region were taking account due to their energy power; LHV could be increase to 6 MJ/Nm³. Its important to considered no more than 70% of agricultural waste in the inlet.

Nevertheless, external energy sources requirement in order to guarantee an optimal gasification process represents an unfavourable energy balance between energy required and energy obtained. However, environmental assessment and cost benefits analysis allowed to demonstrate that negative environmental impact is reducing while people life quality is improvement.

Keywords: Wastewater, sewage sludge, gasificatiosn, LHV, social and environmental benefits.

ÍNDICE

	N. Pag
I. INTRODUCCIÓN	13
II. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Antecedentes	15
2.2. Bases teóricas	23
2.3. Marco conceptual	39
III. METODOLOGÍA	42
3.1. Tipo y Nivel de investigación	42
3.2. Diseño de Investigación	42
3.3. Población, muestra y muestreo	45
3.4. Operacionalización de variables	46
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	46
3.6. Técnicas de Procesamiento de Datos	46
3.7. Matriz de metodologías, técnicas y herramientas	47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1. Diagnóstico	51
4.1.1. CAUSA 1: Métodos ineficientes de tratamiento de efluentes.	52
4.1.2. CAUSA 2: No uso de Tecnología sofisticada.	63
4.1.3. CAUSA 3: Usos inadecuados del lodo que deterioran el medio	74
4.1.4. CAUSA 4: No se aplican métodos de valorización del lodo.	75
4.1.5. CAUSA 5: Eliminación inadecuada al medio ambiente.	78
4.2. Desarrollo	82
4.2.1 Causa 1: ÁREA – Tecnología – No uso de tecnología sofisticada.	82
4.2.2 Causa 2 y 3: ÁREA – Método	101
4.2.3 Causa 4: ÁREA – Medio Ambiente y Tecnología:	104
4.2.4 Causa 5: ÁREA – Medio Ambiente y Tecnología:	128
4.3. Análisis costo - beneficio	138
V. CONCLUSIONES	143
VI. RECOMENDACIONES	145
VII. LISTA DE REFERENCIAS	146
VIII. ANEXOS	153

ÍNDICE DE TABLAS

	N. Pag
Tabla 1: PCI de los lodos con un contenido en humedad del 10% y emisiones gaseosas en el proceso de combustión.	16
Tabla 2: Fuentes de lodo en el tratamiento de aguas residuales	26
Tabla 3. Características de los lodos.	28
Tabla 4: Comparación entre los reactores a lecho fijo y a lecho fluidizado.	34
Tabla 5: Operacionalización de variables.	44
Tabla 6: Composición del agua residual cruda en las lagunas de Estabilización de San José.	55
Tabla 7: Porcentaje de remoción de DBO y Coliformes Totales en las Lagunas de Estabilización de San José, 2008 – 2010.	56
Tabla 8: Relación del LMP del nivel de concentración de los contaminantes presentes en el agua residual de la PTAR San José según el Decreto Supremo N° 003 – 2010.	57
Tabla 9: Comparación entre los LMP para efluentes de PTAR y ECA del agua.	59
Tabla 10: Guías sugeridas por la FAO para reúso agrícola de aguas residuales tratadas y sus requerimientos de tratamiento.	62
Tabla 11: Características de los reactores UASB en la PTAR Río Frío.	70
Tabla 12: Principales diferencias entre PTAR San José, Río Frío y Novi Ligure.	73
Tabla 13: Impactos ambientales de la ineficiente operatividad de la PTAR San José.	79
Tabla 14: Impactos ambientales de la ineficiente operatividad de la PTAR San José.	80
Tabla 15: Composición del Biogás.	84
Tabla 16: Análisis elemental y proximal del lodo seco.	102
Tabla 17: Resultados de análisis elemental obtenido en otras experiencias con lodos de depuradora.	102
Tabla 18: Datos de análisis elemental de lodo seco en fuentes bibliográficas.	102

Tabla 19: Datos de Poder Calorífico Inferior de lodo seco en fuentes bibliográficas.	103
Tabla 20: Diferencias entre los principales tipos de tecnología para la generación de energía a partir de residuos.	106
Tabla 21: Matriz de enfrentamiento para ponderación de los criterios.	108
Tabla 22: Calificación de las tecnologías para la generación de energía a partir del lodo.	109
Tabla 23: Características de la biomasa.	113
Tabla 24: Condiciones de operación para la gasificación del lodo	113
Tabla 25: Composición de los gases de salida, resultado de la gasificación del lodo en un reactor isotérmico.	113
Tabla 26: Composición de los gases de salida, resultado de la gasificación del lodo en un reactor adiabático.	121
Tabla 27: Condiciones operacionales considerando variables cinéticas y composición del lodo.	121
Tabla 28: Composición del lodo.	121
Tabla 29: Composición del syngas.	121
Tabla 30: Residuos agrícolas y agroindustriales de la Región Lambayeque.	124
Tabla 31: Condiciones de operación de biomasa agrícola.	125
Tabla 32: Características de alimentación de lodo considerando diversos porcentajes de biomasa en la mezcla.	125
Tabla 33: Características de salida del syngas al variar el porcentaje de biomasa en la mezcla alimentada al reactor.	126
Tabla 34: Identificación de los impactos potenciales.	134
Tabla 35: Medidas de mitigación para los impactos identificados.	136
Tabla 36: Inversión aproximada para gasificación del lodo:	138
Tabla 37: Inversión total aproximada.	149
Tabla 38: Costos de operación de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.	140
Tabla 39: Costos de operación del Sistema de Gasificación del Lodo	140
Tabla 40: Parámetros de diseño para el dimensionamiento.	154
Tabla 41: Dimensiones de los reactores UASB en PTAR San José.	155
Tabla 42: Dimensiones de otros componentes de los reactores UASB.	156

Tabla 43: Eficiencia de los reactores en PTAR propuesta San José.	156
Tabla 44: Diseño de post-tratamiento y características del efluente final.	157

ÍNDICE DE FIGURAS

	N. Pag
Figura 1: Esquema del aparato experimental.	17
Figura 2: Variación del contenido de humedad vs radio de la esfera para 48°C y velocidad del aire 5,2 m/s.	17
Figura 3: Variación del contenido de humedad vs radio de la esfera para 54°C y velocidad del aire 4,1 m/s.	18
Figura 4: Desviación de los valores experimentales y simulados del Contenido de Humedad (eje izquierdo). Variación de la temperatura leída por el termostato, la temperatura media y la de la partícula central de la esfera de lodo (eje derecho.).	19
Figura 5: Formas de generación de Biomasa	24
Figura 6: Diferencias entre un ciclo tradicional y uno de cogeneración.	31
Figura 7: Esquema de diversos tipos de gasificadores con perfil de temperatura y porcentaje de conversión del carbón a lo largo del reactor. A) Reactor de lecho fijo tipo Updraft. B) Reactor de lecho fijo tipo Downdraft. C) Reactor de lecho fluidizado burbujeante. D) Reactor de lecho fluidizado circulante.	34
Figura 8: Diagrama de Ishikawa para el problema de investigación.	51
Figura 9: Sistema de tratamiento de aguas residuales de Chiclayo. Planta de estabilización de San José.	54
Figura 10: Esquema transversal de las lagunas de estabilización de San José.	55
Figura 11: Cámara de Rejas	64
Figura 12: Medidor de Caudales Parshall	65
Figura 13: Caja de distribución de Caudales.	65
Figura 14: Lagunas Anaeróbicas.	66
Figura 15: Lagunas Aeróbicas.	66
Figura 16: Estructura del efluente de salida.	67
Figura 17: Esquema de tratamiento de aguas residuales de la Comunidad de Novi Ligure (AI), Italia.	69
Figura 18: Esquema de tratamiento de aguas residuales de la PTAR Río Frío, Bucaramanga Colombia.	72
Figura 19: Esquema de una PTAR de aguas residuales domésticas	71

Figura 20: Tecnología de tratamiento de aguas residuales domésticas con filtros percoladores o reactores biológicos.	76
Figura 21: Propuesta de valorización de lodo proveniente de plantas de tratamiento de agua residual.	81
Figura 22: Esquema de tratamiento propuesto para el tratamiento de aguas residuales de la PTAR San José de Chiclayo.	87
Figura 23: Sistema de distribución del afluente, campana colectora de gas y descarga de lodos del reactor UASB.	88
Figura 24: Comparación de la concentración de DBO y DQO en el efluente tratado por cada una de etapas del sistema de tratamiento propuesto y el actual proceso.	89
Figura 25: Comparación de la concentración de Coliformes Fecales en el efluente tratado por cada una de etapas del sistema de tratamiento propuesto y el actual proceso.	90
Figura 26: Esquema representativo de la producción de lodo y la fracción diaria a descargar.	91
Figura 27: Detalle de la disposición de los ladrillos en el lecho de secado de lodos.	93
Figura 28: Principio de funcionamiento del sistema de secado solar propuesto.	94
Figura 29: Modelo de secador solar de lodos SRT.	95
Figura 30: Aspecto del lodo seco	96
Figura 31: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) para un tiempo de permanencia de 200 horas.	97
Figura 32: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) en una muestra de 6cm de altura	98
Figura 33: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) según la altura de la capa de lodo.	99
Figura 34: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) para una frecuencia de 12 horas.	100
Figura 35: Esquema para la simulación del proceso de gasificación del lodo seco de depuradora.	112
Figura 36: Análisis paramétrico del Poder Calorífico (LHV) Vs Flujo de aire.	114

Figura 37: Análisis paramétrico de los componentes del syngas vs Flujo de aire.	115
Figura 38: Análisis paramétrico del Poder Calorífico (LHV) Vs cantidad de humedad del lodo.	116
Figura 39: Análisis paramétrico de los componentes del syngas vs cantidad de humedad del lodo	117
Figura 40: Análisis paramétrico del Poder Calorífico (LHV) Vs temperatura de operación del reactor.	118
Figura 41: Análisis paramétrico de los componentes del syngas vs temperatura de operación del reactor.	119
Figura 42: Variación del PCI del lodo (eje principal) y caudal de aire (eje secundario) según la temperatura del oxidante.	121
Figura 43: Esquema de simulación para una mezcla de lodo con biomasa agrícola.	124
Figura 44: Propuesta de modelo de valorización energética para lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales doméstica.	127

I. INTRODUCCIÓN

Según el Tyndall Center de Inglaterra, el Perú ocupa el tercer lugar a nivel mundial en vulnerabilidad al cambio climático después de países como Bangladesh y Honduras [1]. La vulnerabilidad climática significa el grado de susceptibilidad de un territorio, que varía según su exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa frente a los efectos del cambio climático como el incremento en la frecuencia de inundaciones y sequías, pérdida de la superficie glacial y de cultivos como papa, a medidas de prevención y adecuación según el Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología Ambiental (CTA) de la Universidad Católica San Pablo (UCSP) [2].

En efecto y según el Ministerio del Ambiente (MINAM) cada día se generan más de 18 mil toneladas de residuos provenientes de diversas actividades como domésticas, agrícolas, industriales, comerciales, etc. Sólo el 40% de estos termina en rellenos sanitarios autorizados, y los demás en botaderos municipales o en otros destinos no identificados [3]. Las aguas residuales, así como los residuos sólidos urbanos, carecen también de una gestión eficiente pues terminan contaminando el mar o los campos de cultivos donde son reutilizadas muchas veces sin autorización. En Chiclayo, este problema no es ajeno, y la población enfrenta actualmente serios problemas sanitarios.

Producto de la depuración de aguas residuales, se obtiene un residuo semi-sólido, catalogado como lodo de depuradora; por su composición se ha determinado su potencial valor energético, que viene estudiado en la presente investigación.

Dadas sus características, y con fines de aprovechamiento energético; en el presente trabajo se propone evaluar un modelo de valorización energética del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual para reducir el riesgo de impacto negativo al medio ambiente. Para ello se han establecido los siguientes objetivos específicos: Diagnosticar el impacto ambiental de la disposición final del lodo obtenido de la planta de tratamiento de agua residual en la Provincia de Chiclayo. Evaluar las características físicas y químicas del lodo procedente de plantas de tratamiento de agua residual. Identificar y determinar la metodología a utilizar para mejorar el Poder Calorífico del lodo en modo de producir la mayor cantidad de energía. Desarrollar el modelo de valoración energética del lodo. Evaluar la reducción del impacto ambiental en las zonas aledañas a la planta de tratamiento; y, realizar un análisis costo-beneficio.

Por su localización geográfica, en particular la ciudad de Chiclayo permite la presencia de infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales que luego de su proceso de depuración son descargadas en el mar y de manera no controlada usada también para irrigar campos de cultivo. Sin embargo, la calidad de estos efluentes aún no ha alcanzado los requerimientos exigidos por las regulaciones vigentes en esta materia. Ante esta situación diversas técnicas de tratamiento se pueden aplicar que resultan más eficientes en la depuración de contaminantes y sobre todo permiten agregar valor al proceso recuperando los residuos para su posterior valorización. La presente investigación resalta las cualidades de un residuo que actualmente está siendo desechado sin tener en cuenta el impacto ambiental negativo que genera. Una valoración en términos energéticos, conlleva a la búsqueda de nuevas alternativas que permitan reducir su impacto ambiental.

El desarrollo de la presente investigación busca, además, aportar una información provechosa a la comunidad universitaria para ampliar el conocimiento en las áreas de tecnología ambiental, específicamente en el tratamiento y recuperación con valor agregado de los residuos. La investigación representa una fase más de un proceso académico acrecentador, enriquecedor y satisfactorio que inició en la etapa de pregrado y ha continuado a través de otros estudios de post-grado que ha llegado incluso a desarrollar cooperaciones con instituciones internacionales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

A. Internacionales

Según, F. Colomer, A. Gallardo, F. Robles, M. Bovea, y L. Herrera [4]; en su investigación, *Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales*, toma como referencia la reglamentación vigente en la Unión Europea que sugiere, los lodos de depuradora de aguas residuales se reutilicen como abono para cultivos. Sin embargo, la cantidad de metales pesados presentes en el lodo puede limitar esta aplicación; esta situación es más probable en el caso de lodos de aguas residuales provenientes de industrias. En este panorama, una segunda opción como la recuperación energética es más atractiva. Para la realización de esta investigación, se han analizado lodos digeridos procedentes de siete distintas depuradoras de aguas residuales españolas y se ha estudiado su viabilidad para usarse como abono, como combustible derivado de residuos o ser enviados a vertedero. Para determinar su poder como fertilizante se ha realizado el análisis elemental (C, H, O, N y S) además del contenido en carbono orgánico asimilable, metales pesados, PO₄ y Potasio. También se han determinado el poder calorífico (Poder Calorífico Inferior) y el contenido en cenizas para evaluar la posibilidad de recuperación energética. Conocer el contenido en metales pesados, Cl, F, C, N y S es fundamental para estimar las emisiones atmosféricas generadas durante su incineración. La tabla siguiente, muestra una comparación de los tipos de lodos estudiados con otros tipos de combustibles:

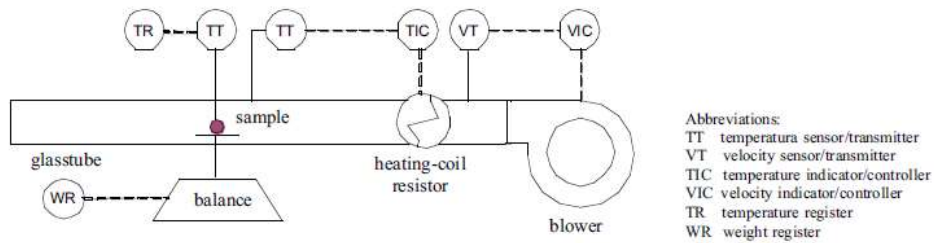
Tabla 1: PCI de los lodos con un contenido en humedad del 10% y emisiones gaseosas en el proceso de combustión.

Contenido de Humedad 10%	PCI (MJ/kg)	Nm ³ CO ₂ /kg lodo		Nm ³ NO ₂ /kg lodo		Nm ³ SO ₂ /kg lodo	
		Lodo húmedo	Lodo seco	Lodo húmedo	Lodo seco	Lodo húmedo	Lodo seco
Lodo 1	11,02	0,497	0,552	0,062	0,069	0,029	0,032
Lodo 2	13,02	0,694	0,771	0,024	0,027	0,007	0,007
Lodo 3	10,27	0,610	0,678	0,073	0,081	0,027	0,030
Lodo 4	13,61	0,776	0,863	0,090	0,100	0,024	0,027
Lodo 5	9,76	0,567	0,631	0,107	0,118	0,029	0,033
Lodo 6	5,59	0,363	0,403	0,032	0,035	0,001	0,002
Lodo 7	4,03	0,230	0,256	0,040	0,044	0,006	0,006

Fuente: [4]

Para R. Font, M. Gomez-Rico, y A. Fullana [5]; en su artículo *Skin effect in the heat and mass transfer model for sewage sludge drying*, estudia el tratamiento térmico del lodo sometándolo a rangos de temperatura entre 30 – 65°C, preparando dos tipos de lodos que mostraron diferentes comportamientos respecto a la formación de una “piel” durante el proceso térmico. Muestras en forma de pequeñas esferas de lodo (2,5 cm de diámetro) fueron introducidas en un aparato que proveía un flujo continuo de aire, se realizaron diversas pruebas a diferentes temperaturas; según el esquema experimental que se muestra en la Figura 1.

Durante cada prueba, se monitoreó la variación del Contenido de humedad vs el tiempo de operación. Las figuras 2 y 3 muestran los resultados obtenidos; para un valor de temperatura de 48°C y un flujo de aire a velocidad de 5,2 m/s; y para un valor de 54°C y un flujo de aire a velocidad de 4,1 m/s respectivamente.

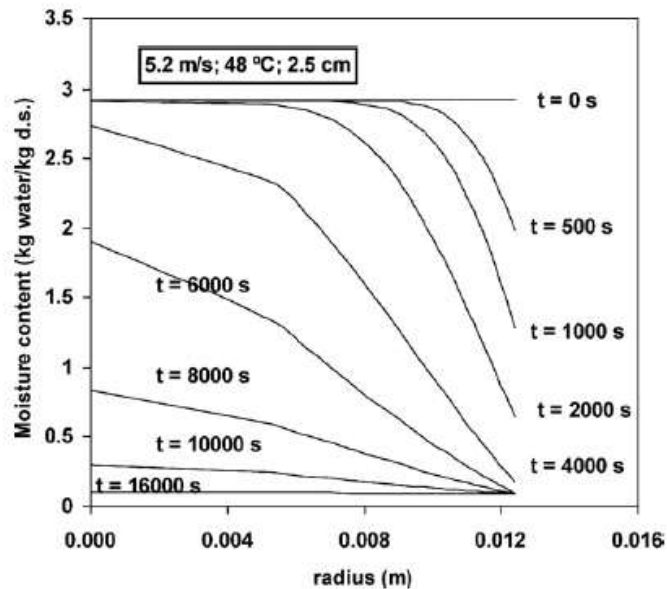


Leyenda:

- TT: Sensor de temperatura/transmisor.
 VT: Sensor de velocidad/transmisor
 TIC: Indicador de temperatura/controlador.
 VIC: Indicador de velocidad/controlador
 TR: Registro de temperatura
 WR: Registro de peso.

Figura 1: Esquema del aparato experimental.

Fuente: [5]

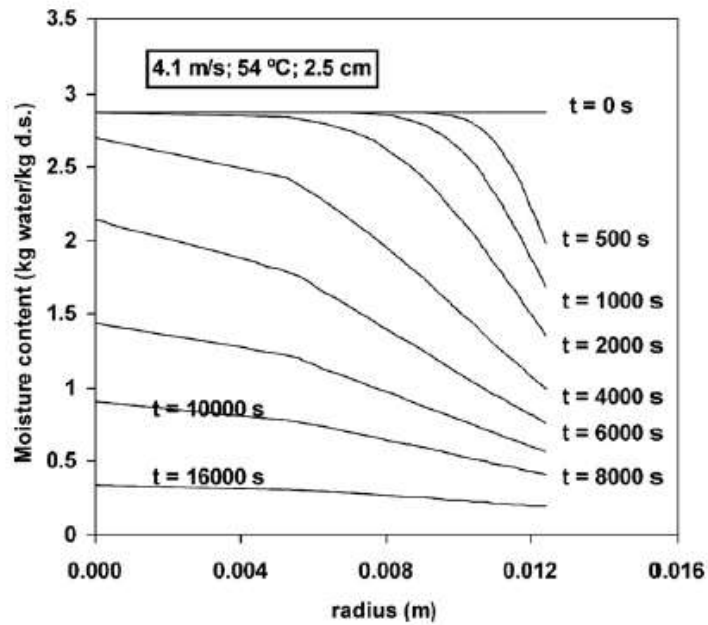


Leyenda:

- Moisture content (kg water/kg d.s.): Contenido de humedad (Kg agua/kg de materia seca)
 Radius: Radio de la esfera.

Figura 2: Variación del contenido de humedad vs radio de la esfera para 48°C y velocidad del aire 5,2 m/s.

Fuente: [5]



Leyenda:

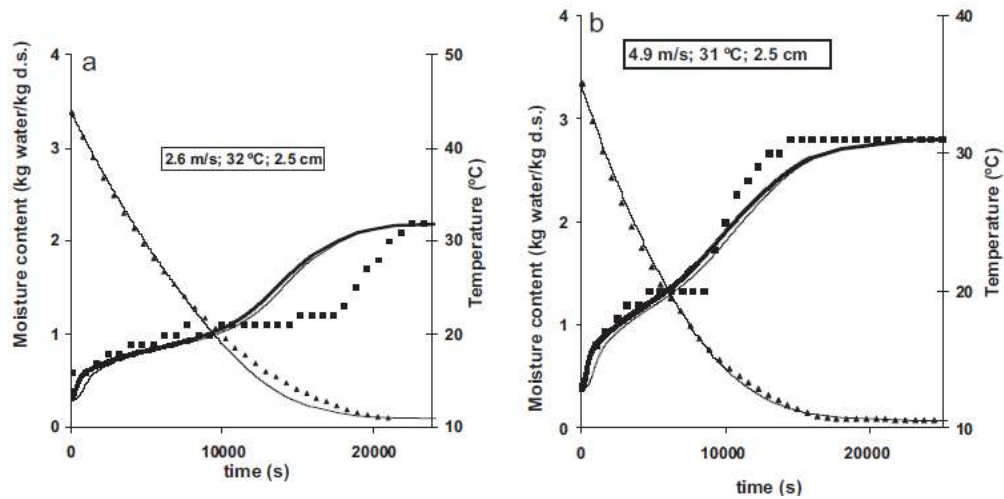
Moisture content (kg water/kg d.s.): Contenido de humedad (Kg agua/kg de materia seca)

Radius: Radio de la esfera.

Figura 3: Variación del contenido de humedad vs radio de la esfera para 54°C y velocidad del aire 4,1 m/s.

Fuente: [5]

Se desarrolló también un modelo matemático de optimización que se desarrolló a través de la herramienta SOLVER de Excel para obtener los mejores parámetros que resulten de minimizar la suma de los cuadrados entre los valores teóricos y experimentales del contenido de humedad, el modelo estaba basado en los parámetros cinéticos de coeficiente de transferencia de masa, coeficiente de transferencia de calor, parámetros para el efecto de formación de la piel, coeficiente de difusión y energía de activación. Algunos resultados se muestran en la Figura 4:



Leyenda:

Moisture content (kg water/kg d.s.): Contenido de humedad (Kg agua/kg de materia seca)

Time: Tiempo.

Temperature: Temperatura

Figura 4: Desviación de los valores experimentales y simulados del Contenido de Humedad (eje izquierdo). Variación de la temperatura leída por el termostato, la temperatura media y la de la partícula central de la esfera de lodo (eje derecho.).

Fuente: [5]

En general, el modelo muestra satisfactoriamente los resultados para los datos de humedad y temperatura calculados experimentalmente y a través del modelo. Algunas pruebas mostraron variaciones significativas lo que podría explicarse debido al efecto de la evaporación que tiene lugar en la superficie del termostato colocado al interior de las esferas de lodos.

Comúnmente, los parámetros cinéticos se han utilizado para la simulación de los secadores continuos. El análisis de la influencia de los diferentes parámetros cinéticos del proceso de secado se ha llevado a cabo con el fin de obtener un modelo general válido para diferentes tipos de lodos.

Para A. Lowman, M. McDonald, y S. Wing; en su estudio *Land application of treated sewage sludge: community health and environmental justice* [6]; sostiene que en los

Estados Unidos, la mayoría de los lodos residuales tratados son aplicados en tierras de cultivo como acondicionador de suelos. Sin embargo, las regulaciones acerca de su utilización y aplicación en tierras de cultivo pueden no ser suficientes para proteger la salud pública y el medio ambiente en las áreas cercanas. En la investigación se utilizaron métodos de investigación cualitativos para evaluar la salud y la calidad de vida cerca de las zonas donde aplican los lodos de depuradora. La investigación incluye entrevistas con personas que viven cerca de éstos lugares.

Los resultados del estudio fueron categorizados de acuerdo a temas clave identificados en las entrevistas acerca de la experiencia de vivir cerca de campos donde se usaron lodos de depuradora: impactos en la salud, impactos ambientales y justicia ambiental.

La mayoría de los encuestados respondió que las aplicaciones del lodo en campos agrícolas tienen un impacto negativo en muchos aspectos de su salud. Más de la mitad de los encuestados atribuyeron principalmente síntomas físicos a la aplicación de lodos. Muchos aludieron que los olores ofensivos interfieren con sus actividades diarias y la oportunidad de socializar con la familia y los amigos. Los entrevistados describieron sus afecciones de salud y cómo está aquejando en su calidad de vida, así como la carencia de protección de las administraciones públicas. Los señales más frecuentes de afección son a los ojos, nariz, irritación de garganta y problemas gastrointestinales (colitis, náuseas, vómitos y diarrea). Otras afecciones descritas por los entrevistados fueron: tos, dificultad para respirar, congestión nasal, lesiones cutáneas, y otras infecciones.

En cuanto a los impactos ambientales, alrededor del 50% de los entrevistados reportó que las actividades de aplicación de lodos en campos de cultivo tienen efectos ambientales de interés de para ellos. Las preocupaciones más frecuentes incluyen el derrame de lodos en vías públicas y en propiedad privada, el pastoreo del ganado en los campos poco después de la aplicación del lodo, la ausencia de señales que indiquen las zonas de aplicación y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por el escurrimiento y filtración del lodo.

En el tema de Justicia Ambiental, la mitad de los entrevistados indicaron que viven cerca de los campos de aplicación de lodos que son propiedad de individuos o entidades, incluyendo municipalidades, quienes no viven en la comunidad, y por ende no sufren las consecuencias. En ese sentido, muchos de ellos dijeron que sus comunidades rurales o semi-rurales están siendo utilizadas como vertedero de residuos de las ciudades y que se les dejó para lidiar con el olor, problemas de salud y otras molestias que esto les produce. Aseguran que no son tratados equitativamente cuando se seleccionan los sitios para la aplicación de los lodos debido a su estado rural y de bajos ingresos. Algunos, inclusive, reportaron la falta de notificación pública sobre la aplicación de los lodos en su comunidad, así como la dificultad para reportar sus preocupaciones a los funcionarios públicos e influir en las decisiones sobre cómo se lleva a cabo esta práctica en donde viven.

Como conclusión, es importante que si la aplicación de lodos residuales tratados como acondicionador de suelos continúa, ésta debería llevarse a cabo de manera que no afecte a las personas, animales y ambiente. Los miembros de las comunidades son testigos clave de los usos del lodo residual y sus impactos potenciales en la salud, la calidad de vida y el medio ambiente. La participación significativa de los miembros de la comunidad en la toma de decisiones sobre la aplicación de lodos de depuradora en la tierra fortalecerá las protecciones de la salud ambiental.

B. Nacionales

J. Francisco, P. Ramos, y G. Aguirre; para su investigación *Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra – Lima* [7] realizaron pruebas experimentales en la Estación de Invernadero de Fertilidad de Suelo de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Lima) para la fertilización del lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Puente Piedra, con el propósito de determinar su beneficio agrícola. Uno de los parámetros a tener en cuenta fue la temperatura promedio del ambiente durante la fase experimental: con valores mínimos de 14,7°C y máximos de 25,3°C, así también la humedad relativa varía entre 71% y 91%. Se analizaron los siguientes metales: Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb),

Mercurio (Hg) y Arsénico (As), para lograr esto, se aplicaron los métodos analíticos de espectrofotometría. Los análisis microbiológicos para E. Coli, Salmonella y otros parásitos también se tomaron en cuenta. El Ph y CE; así como las variables agronómicas de emergencia de la plántula (s), altura (H), grosor del tallo (D) y materia seca (Ff) para una planta de maíz (*Zea mays L.*), para un periodo de crecimiento de 60 días. Se realizaron dos pruebas, la prueba N° 1, contenía muestras de lodo seco al 0, 2, 4, 6, 8 y 10 %, mezclado con arena, y la prueba N° 2 contenía dosis de lodo compostado (de 8 meses) al 0, 25, 50, 75 y 100%. Para ambos casos se usó un fertilizante inorgánico. Los resultados mostraron que el pH del lodo estaba dentro del rango normal y no tenía afectación en las condiciones del suelo y sobre el crecimiento de la planta, mientras que la CE indicó que era un material entre ligeramente hasta muy ligeramente salino lo que llevó a su aceptación para su potencial aplicación en suelo agrícola. Para el contenido de materia orgánica considerado bueno, mayor al 35%, que cumple las recomendaciones de la United States Environmental Protection Agency (EPA). Para el contenido de metales, este resultó menor que el límite máximo permisible en lodos que se vierten al suelo de las normas técnicas sin riesgo de toxicidad para las plantas. Según, el análisis microbiológico y de parásitos, este es un lodo de clase B. En conclusión, se demostró que el lodo seco y el lodo compostado pueden ser aprovechados para producir bioabono, proporcionando una solución sostenible a largo plazo en la gestión de la disposición final de los residuos sólidos.

C. Locales

Burga A, en su tesis para optar el título de Ingeniero Industrial *Valoración de lodos sedimentados generados en las lagunas de estabilización de Epsel para uso como abono orgánico* [8], proponía la valorización de los lodos que se generan en las lagunas de estabilización de la empresa Epsel S.A. para su uso como abono orgánico. Es conocido ya de la falta de tratamiento sobre estos lodos; y por ende causantes de contaminación al ambiente. Para ello, el autor, realizó un análisis del mercado de fertilizantes en la región de Lambayeque, encontrando una demanda creciente para el uso de este producto, las proyecciones muestran un incremento en su uso de un 15,54% para el año 2020. El

método más viable fue el proceso de compostaje de pilas por volteo, debido a su bajo costo y simplicidad de proceso. Por ser procedente de un proceso natural, es una opción efectiva para contribuir a la regeneración de suelos ya que brinda efectos positivos en las características biológicas del mismo; colocándose como alternativa a los fertilizantes químicos. En cuanto a la ingeniería de la planta, se estima una producción de 970 Tn anuales; en un área de 3 483,23 m² para toda la planta y una inversión total de 283 505 USD.

El autor concluye que, de acuerdo a los resultados obtenidos, la caracterización de los lodos, la determinación del proceso para la obtención del abono y en el análisis económico han permitido demostrar que los lodos sedimentados que se generan en las lagunas de estabilización de la empresa Epsel S.A. pueden ser aprovechados a través de su uso como abono orgánico y representa un proyecto económica y financieramente viable.

2.2. Bases teóricas

Biomasa

Según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española [9], “la biomasa es la cantidad de materia acumulada en un individuo, un nivel trófico, una población o un ecosistema”.

Según la directiva 2003/30/CE [10]: biomasa es la fracción biodegradable de productos de desecho y residuos procedentes de actividades como agricultura, silvicultura y otras industrias del rubro alimenticio, así también se le considera a la fracción biodegradable de residuos industriales y municipales.

En la figura 5 se puede ver las formas de generación de la biomasa.

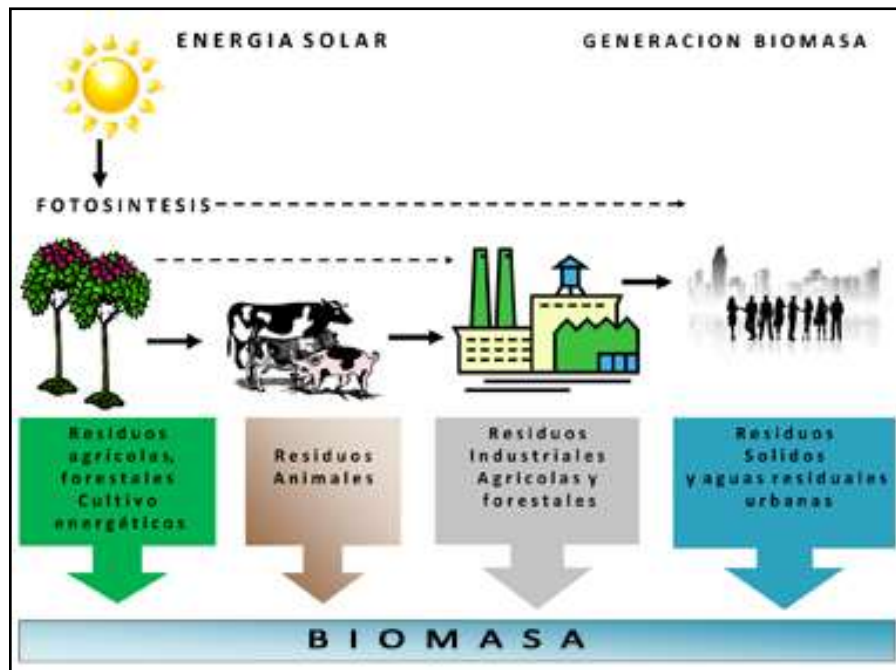


Figura 5: Formas de generación de Biomasa

Fuente: [11]

Se puede decir, entonces, que la biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, comprendiendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. La biomasa es una energía renovable de origen solar a través de la fotosíntesis de los vegetales; puesto que las plantas transforman la energía del sol en energía química a través de la fotosíntesis, parte de esta energía se almacena en forma de materia orgánica.

Biomasa residual

Según lo anteriormente mencionado, la biomasa residual es el subproducto o residuo generado en las actividades agrícolas y ganaderas, así como residuos de la industria agroalimentaria, de la industria de transformación de la madera, actividades forestales; también pueden ser considerados como biomasa el serrín, la cáscara de almendra, las podas de frutales, el orujillo, aguas residuales urbanas, residuos ganaderos, residuos industriales biodegradables, etc.

Biomasa residual húmeda

Se le denomina biomasa residual húmeda a los flujos residuales que provienen de materia orgánica como resultado de la actividad humana o animal, también pueden provenir de las urbes (llamándose agua residual urbana), de las industrias (llamándose residuos industriales biodegradables) y hasta de instalaciones agropecuarias (conocidos como residuos ganaderos). Los desechos sólidos urbanos (llamada basura orgánica) también puede ser considerada en esta clasificación, dado su alto contenido de humedad.

Las aguas residuales urbanas (efluentes residuales domésticos) provienen de actividades humanas como: higiene personal, preparación de alimentos, limpieza, lavado de ropa, etc. En su composición presentan 99,9% de agua y 0,01 % de residuos sólidos; de la parte sólida, el 70 % corresponde a materia orgánica y el 30 % a materia inorgánica [12]. Los microorganismos presentes son nocivos para el hombre como Coliformes Fecales, Salmonellas, Vibrio Cholerae (causante del cólera), parásitos (Giardia, Entamoebas), protozoarios, etc., causantes de enfermedades entéricas como Diarreas, Tifus, Hepatitis, etc. Estos agentes están presentes en elevadas concentraciones y se pueden transmitir a través de alimentos agrícolas que muchas veces son irrigados con aguas residuales, también por la mala manipulación de alimentos y carencias sanitarias al momento de prepararlos.

Por su elevada concentración de materia orgánica, la biomasa residual puede llegar a considerarse contaminante, debido, principalmente, a que durante su proceso de descomposición genera gases como metano (CH_4) y Dióxido de Carbono (CO_2). Cuando se vierte a los ríos o lagos, contamina aún más el ecosistema acuático, pues los microorganismos que la descomponen, utilizan el oxígeno disuelto en el agua. Por sus altas concentraciones de Nitrógeno, contribuye al crecimiento de algas y por ende al consumo del oxígeno disuelto, causando la muerte de otros seres vivos. Es así, que para ser eliminadas de modo seguro, necesitan un tratamiento previo de manera que puedan ser dispuestas en redes de vertimiento, sistemas de depuración construidos o naturales (lagos, ríos, embalses, etc) [13].

Lodo residual

El lodo residual, también llamado lodo de depuradora, tiene su origen en los sistemas de tratamiento de agua residual. Este material, tiene en su composición, principalmente, la materia orgánica disuelta del agua residual. Esta se descompone y tiene consecuencias igual de peligrosas para la salud humana. Uno de los principales problemas en el tratamiento de aguas residuales es el relacionado con el tratamiento y disposición de lodos, según el tipo de tratamiento de aguas residuales proveniente, se pueden generar grandes volúmenes de lodo por lo que su disposición final generaría un costo muy alto.

Según Cleverson, es necesario esclarecer los conceptos de “Lodo” y “Biosólido”. El término “Lodo” se usa para hacer referencia a un líquido con contenido de sólidos en suspensión sin ningún tratamiento, mientras que “Biosólido” se usa para referenciar un sólido procedente de procesos de estabilización, que en esta condición, no representa riesgos para la sociedad, ni a los ecosistemas naturales [14].

La Tabla 2 muestra los tipos de lodos que se generan según los diferentes tipos de procesos de tratamiento de aguas residuales convencionales:

Tabla 2: Fuentes de lodo en el tratamiento de aguas residuales

Unidad de tratamiento	Tipo de lodo	Observación
Cribado	Sólidos gruesos	Los lodos retenidos son removidos manual o mecánicamente
Desarenadores	Arena y espuma	
Pre aireación	Arena y espuma	
Sedimentación primaria	Lodos primarios	Los lodos se recirculan a la sedimentación secundaria.
Tratamiento biológico	Lodos suspendidos	
Sedimentación secundaria	Lodo secundario	Los sólidos suspendidos como resultado de la digestión de la materia orgánica.
Tratamiento de lodos	Compost, cenizas.	El producto obtenido depende del origen del lodo y el proceso usado en su tratamiento.

Fuente: [14]

Composición del lodo

Todos los tipos de lodos considerados en la tabla anterior, presentan un bajo contenido de sólidos (entre 1 y 6%), es por ello que para la disposición de esta pequeña porción del contenido de sólidos se requiere manejar grandes volúmenes de lodo crudo. La mayor dificultad se presenta para remover la mayor concentración de agua y así reducir su volumen con una mayor concentración de contenido orgánico.

En cuanto a sus características, éstas varían dependiendo de su procedencia (tipo de agua residual, y tipo de sistema de tratamiento) y antigüedad. Mientras que, la cantidad de lodo producido, depende del proceso de tratamiento usado para depurar el agua residual y de las características del agua residual; el tiempo de sedimentación, de la densidad de los sólidos, el contenido de humedad, el tipo de equipo o método de remoción de lodos y la frecuencia de remoción de los mismos son factores críticos para determinar el volumen resultante del lodo.

Los microorganismos también están presentes en el lodo, entre ellos se encuentran las bacterias, diversas especies de protozoos como flagelo, ciliados y amebas, helmintos, huevos de helmintos, diversos virus [14]. Algunos metales presentes en el lodo pueden causar envenenamiento de plantas y animales (cadmio, plata, zinc, níquel, mercurio, cromo, arsénico, selenio), procedentes de aguas residuales industriales. Además, los lodos presentan elementos traza, que han sido extraídos de las aguas residuales.

En la Tabla 3, se observan los valores típicos de las características de los lodos provenientes de los diversos procesos de tratamiento para efluentes residuales.

Como ya descrito previamente, el principal componente de los lodos es su contenido de agua, que dependerá del tipo de lodo (primario, secundario o terciario) y del tipo de estabilización (aeróbica o anaeróbica). Por su alto contenido (93% a 99%); procesos de deshidratación (reducción del contenido de agua a 35%) o secado (reducción del contenido de agua 15%) deben ser considerados si se prevén usos posteriores del lodo.

Tabla 3. Características de los lodos

Unidad	% Humedad del lodo		Densidad relativa	
	Intervalo	Típico	Sólidos	Lodos
Sedimentación primaria	88 - 96	95	1,4	1,02
Filtro percolador	91 - 95	93	1,5	1,025
Precipitación química	-	93	1,7	1,03
Lodos activados	90 - 93	92	1,3	1,005
Tanques sépticos	-	93	1,7	1,03
Tanques imhoff	90 - 95	90	1,6	1,04
Aireación prolongada	88 - 92	90	1,3	1,015
Lodo primario digerido anaeróbicamente	90 - 95	93	1,4	1,02
Laguna aireada	88 - 92	90	1,3	1,01
Lodo primario digerido aeróbicamente	93 - 97	96	1,4	1,012

Fuente: [15]

Utilización de lodo residual tratado

Según el tipo de lodo y su composición, estos pueden utilizarse como fertilizante para el mejoramiento de suelos agrícolas (con la debida autorización de la autoridad competente y siempre y cuando se cumplan con características determinadas), o en procesos de tratamiento que permitan aprovechar el contenido de energía [4].

Generalmente, los biosólidos, luego de su estabilización biológica, presentan suficiente concentración de nutrientes, baja concentración de microorganismos, presencia aceptable de metales pesados, y por ello, son mayormente utilizados como abono, acondicionador o mejorador de suelos.

Dado su elevado contenido de agua, el lodo puede ser secado antes de su utilización, el secado consiste en “retirar el agua del lodo” hasta alcanzar aproximadamente el 85% de humedad, es decir, retirar el 15% del agua. Para este fin, se utilizan técnicas como: secado sobre lechos, centrifugación, filtración al vacío o a presión, vibración sónica o mecánica. El fin último es, reducir los costos de transporte hacia su lugar de disposición final, mejorar la manejabilidad del lodo y aumentar el valor calórico para su posterior incineración.

Los lodos orgánicos dado su poder calórico, pueden ser incinerados para recuperar la energía, generando electricidad o produciendo vapor, pero restringiendo aquellos que no pueden ser eliminados por este procedimiento, debido a las características de sus componentes. También se presentan desventajas dada su requerimiento para la operación, mantenimiento y control de emisiones.

Valorización energética

La valorización energética de lodos de depuradora es una de las alternativas que más se está incrementando en la actualidad.

Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes, es justamente, el contenido de agua, que aún luego de procesos de deshidratación presentan entre un 75 – 80%. La mayoría de los procesos de depuración emplean simples procesos de deshidratación mecánica, y con ello se consigue hasta un 20 - 30% de contenido de materia seca. El elevado contenido de agua reduce considerablemente sus propiedades caloríficas (de la materia seca), por lo que una etapa previa de secado más agresivo debe considerarse como imprescindible para aumentar la viabilidad técnica de procesos con fines de valorización energética.

El método de valorización energética de lodos más conocido, es el del biogás, que es un gas compuesto de metano y dióxido de carbono en su mayor parte y que es obtenido en las estaciones depuradoras que realizan digestión anaerobia. Este biogás es aprovechado para la producción de energía eléctrica y calor mediante motores de combustión interna, pero existen otros métodos de aprovechamiento del biogás como su integración en la red de gas natural cuando la calidad del mismo es adecuada.

Otras formas de valorización energética es la incineración, ya que con este método se reduce el volumen de los lodos y puede obtenerse energía eléctrica mediante la instalación de una o varias turbinas de vapor, un método que ya está implantado varias plantas de tratamiento de efluentes de España, Alemania y Dinamarca.

Cogeneración:

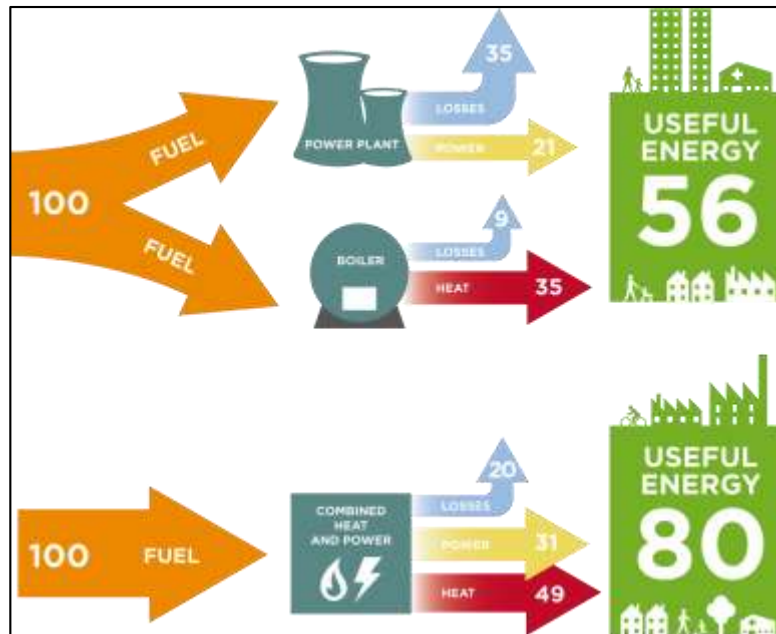
Para un máximo aprovechamiento del potencial energético de los residuos (el lodo, para la presente investigación), se puede considerar aplicar la tecnología de “co-generación”, donde una parte de la energía de los residuos se aprovecha como energía térmica (a través de la generación de vapor para uso industrial o doméstico) y otra parte se convierte en energía eléctrica [16].

En este tipo de sistemas, aproximadamente el 50% de la energía química puede convertirse en energía térmica, un 30% en energía eléctrica, con una pérdida menor al 20%. A diferencia de los sistemas convencionales de generación de electricidad donde se desperdician grandes cantidades de calor. La figura 6 muestra las fracciones aproximadas de conversión.

Las tecnologías de recuperación de la energía pueden agruparse en Conversión bioquímica y conversión térmica.

Otra forma de valorizar los lodos es gasificarlos, en este proceso primero se realiza un secado de los lodos para acondicionarlos, después una pirolisis donde se descomponen de forma endotérmica los compuestos más volátiles lo cual significa que se necesita un aporte de energía adicional, que puede proceder de un combustible auxiliar o de parte de los lodos que se van a gasificar. Finalmente se produce la gasificación propiamente dicha donde se obtienen gases como el hidrógeno (H_2) o el metano (CH_4), que se pueden usar para producir energía.

Por todas las posibilidades de aprovechamiento que presentan los lodos, estos se están empezando a ver cada vez más como productos de las estaciones depuradoras en lugar de considerarse como un simple residuo.



Leyenda:
 Fuel: Combustible
 Power plant: Planta de energía
 Losses: Pérdidas
 Power: Energía
 Heat: Calor
 Useful energy: Energía útil

Figura 6: Diferencias entre un ciclo tradicional y uno de cogeneración.

Fuente: [17]

Gasificación del lodo

La gasificación es un proceso complejo que se lleva a cabo en tres fases: secado, pirolisis y gasificación. En la última etapa, la gasificación real toma lugar, donde los productos de pirolisis (productos quemados, hidrocarburos condensables, alquitranes y gases) dan como productos el gas combustible deseado (syngas o gas de síntesis – CO, CO₂ y H₂) y menor cantidad de hidrocarburos y olefinas.

La gasificación de carbón de pirolisis es una combinación interactiva de diversos gases (sólidos y gases de reacción) en el cuál los carbonos sólidos se oxidan en monóxido y

dióxido de carbono, y el hidrógeno es producido por la reacción de rompimiento de la molécula del agua. Las principales reacciones de la fase de gasificación son [18]:

- $C(s) + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ (Equilibrio al contorno)
- $C(s) + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ (Hydrogenación)
- $C(s) + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ (Reacción heterogénea agua - gas)
- $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ (Reacción de equilibrio agua – gas)
- $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ (Descomposición del metano)

Las condiciones operacionales pueden influir en el grado de avance de las reacciones, principalmente en los siguientes parámetros del proceso:

- Temperatura final de reacción.
- Velocidad de calentamiento de la biomasa.
- Presión
- Tiempo de residencia del material a la reacción de temperatura.
- Dimensiones y forma de la biomasa.
- Presencia de determinados catalizadores.
- Tipo de agente oxidante.
- Flujo volumétrico del agente oxidante.

El oxidante puede ser oxígeno, aire, vapor o una mezcla de aire y vapor. El vapor es preferible porque favorece las reacciones endotérmicas del proceso que causan el decrecimiento de la temperatura a lo largo del reactor. El gas de síntesis obtenido usando aire es fuertemente diluido por la presencia de elevada cantidad de nitrógeno que influye en el Poder Calorífico e incrementa la cantidad de syngas.

La temperatura del proceso varía entre 800 y 1100°C; la presión es usualmente atmosférica, pero hay aplicaciones donde se usa hasta 20 atm. Las condiciones operativas tienen una fuerte influencia en el tipo de reactor.

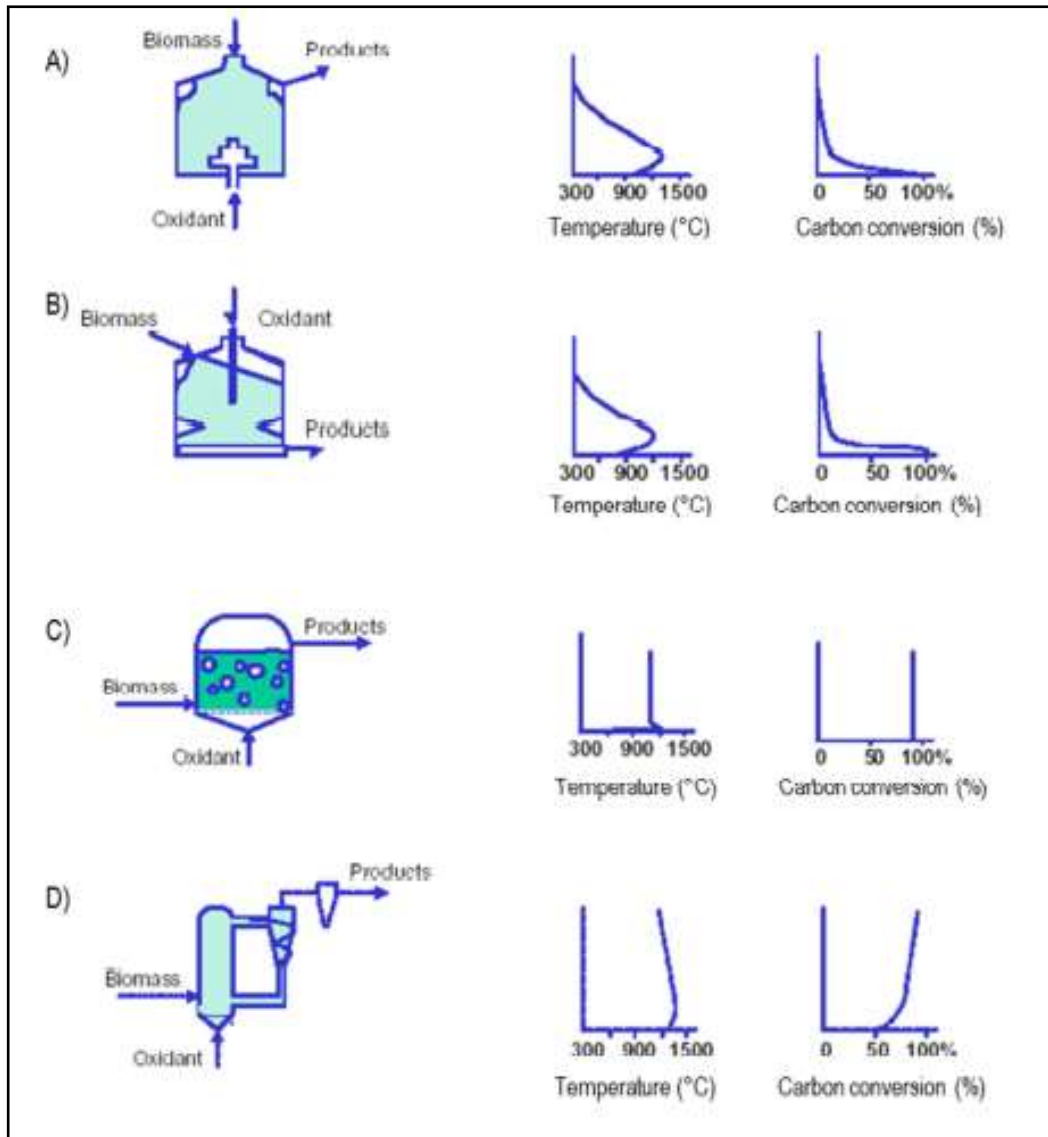
El syngas obtenido contiene CO, CO₂, H₂, CH₄, pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados como C₂H₆, C₂H₄, H₂O, N₂ y diversos contaminantes como partículas carbonosas, cenizas, alquitranes y aceites. El CO y H₂ incrementan el poder calorífico del syngas ya que reaccionan con el oxígeno. El CH₄ está presente en pequeñas cantidades y es el responsable en gran parte del Poder Calorífico del gas. El CO₂ y H₂O son productos indeseables pero inevitables. Luego de ser gasificados, el gas puede ser convertido en energía, como por ejemplo, electricidad.

Tipos de gasificadores

Hay muchas formas de clasificar los sistemas de gasificación. Una manera es considerando los sistemas de contacto entre el material combustible (biomasa) y el agente oxidante. Esencialmente, dos tipos de tecnologías de gasificación son los más comunes: a lecho fijo y a lecho fluidizado.

En los gasificadores a lecho fijo, la biomasa se introduce por la parte alta del gasificador y el aire se introduce mediante dos procesos: Updraft (Cuando el aire se introduce por la parte inferior del reactor y sale por la parte superior, la biomasa y el oxidante se mueven en contracorriente) y Downdraft (cuando la biomasa y el oxidante se mueven en la misma dirección, de arriba hacia abajo, el syngas sale del reactor por la parte inferior).

La tabla 4 muestra una comparación general entre los reactores a lecho fijo y a lecho fluidizado; en los gasificadores a lecho fluidizado, una mezcla de oxidante, biomasa y algún material inerte pueden tener movimiento burbujeante o circulante. Algunas ventajas de este sistema son su mayor capacidad, las posibilidades de utilizar una mayor variedad de tipos de biomasa, incluso la biomasa húmeda. Un perfil de temperaturas y porcentaje de conversión de carbono a lo largo del reactor se mostró en la figura 7.



Leyenda:

Biomass: Biomasa

Products: Productos

Oxidant: Oxidante

Temperature: Temperatura

Carbon conversión: Conversión del carbono

Figura 7: Esquema de diversos tipos de gasificadores con perfil de temperatura y porcentaje de conversión del carbón a lo largo del reactor. A) Reactor de lecho fijo tipo Updraft. B) Reactor de lecho fijo tipo Downdraft. C) Reactor de lecho fluidizado burbujeante. D) Reactor de lecho fluidizado circulante.

Fuente: [19]

Tabla 4: Comparación entre los reactores a lecho fijo y a lecho fluidizado.

Tipo de reactor / criterios	Lecho fijo	Lecho Fluidizado
Factibilidad técnica	<p>Construcción simple y robusta</p> <p>Mala distribución de la temperatura</p> <p>Problemas con la reacción exotérmica</p> <p>Pobre intercambio de calor</p> <p>Posibles canalizaciones</p> <p>Tiempo de residencia para sólidos: horas, días. Para gases: segundos.</p> <p>La caída de presión es baja</p>	<p>Tecnología menos compleja.</p> <p>No hay partes móviles.</p> <p>Buena distribución de la temperatura</p> <p>No puntos calientes</p> <p>Buen intercambio de calor.</p> <p>Buen contacto y mezcla gas - sólido.</p> <p>Tiempo de residencia para sólidos: segundos a minutos. Para gases: segundos.</p> <p>La caída de presión es alta.</p>
Experiencia	<p>Muchos procesos para diferentes aplicaciones.</p> <p>Simple, confiable y probado para ciertos combustibles.</p>	<p>Existen diseños comerciales aplicables.</p> <p>Probado con varios tipos de combustible, proporciona seguridad, confiabilidad y estabilidad.</p>
Escala	<p>Alto tiempo de residencia de los sólidos. Limitado potencial de ampliación</p>	<p>Altas tasas de reacción, bajo tiempo de residencia de los sólidos. Alto potencial de ampliación</p>
Arranque/parada	<p>Largos periodos de calentamiento.</p>	<p>Fácil arranque y detención.</p>
Cambio de carga alimentadora	<p>Limitación en el cambio rápido de combustibles con diferentes poderes caloríficos, alto contenido de combustible en el lecho.</p>	<p>Cambio rápido de diferentes combustibles, bajo contenido de combustible en el lecho. La cantidad de sólido se reduce por el alto contenido de material inerte en el lecho.</p>
Calidad de los principales productos	<p>Updraft: Syngas contiene alquitrán, aceite, fenoles y amoníaco (requieren separación y limpieza de vapor)</p> <p>Downdraft: la cantidad de alquitrán y fenoles en gas de síntesis es baja.</p>	<p>La cantidad de alquitrán y fenoles en gas de síntesis es baja. La composición del gas es estable debido a las condiciones uniformes en el lecho.</p>

	Syngas adecuados para la cocción directa. Updraft: Baja temperatura de salida de gas de síntesis. Downdraft: Alta temperatura de salida de gas de síntesis. Bajo contenido de ceniza	Syngas temperatura de salida similar a la temperatura del lecho. Partículas más altas en el gas producto que en lecho fijo.
Calidad de los co-productos	Updraft: Bajo contenido de polvo en gas de síntesis. Downdraft: Alto contenido de polvo en gas de síntesis.	Inevitable pérdida de carbono en las cenizas debido a la composición de sólidos no uniforme del lecho.
Requerimientos para el tratamiento posterior	Limpieza de gas extensa y necesaria para motores	Alto contenido de polvo en la fase gaseosa.
Eficiencia de la tasa de conversión	Alta eficiencia de conversión de carbono	Alta eficiencia de conversión de carbono.
Impacto Ambiental y económico	Posible escoria fundida. Elevada inversión económica para elevadas cargas.	No fundición de cenizas. Baja inversión.

Fuente: [19]

Impacto ambiental

El impacto ambiental es la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada, en términos simples el impacto ambiental es la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza [20].

Los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, que deberán someterse a Evaluación de los Impactos Ambientales.

La evaluación de impacto ambiental es el procedimiento que, en base a un Estudio de Impacto Ambiental o Declaración de Impacto Ambiental, determina si el impacto ambiental de una actividad o proyecto se ajusta a las normas vigentes.

La metodología para la evaluación de los Impactos ambientales se basa en los siguientes puntos:

- Análisis de alternativas técnicamente viables y justificación de la solución adoptada
- Descripción del Proyecto y sus acciones.
- Inventario ambiental y descripción de las interacciones ecológicas o ambientales claves.
- Identificación y valoración de impactos ambientales, tanto en la solución propuesta como en sus alternativas.
- Establecimiento de medidas correctoras y protectoras.
- Programa de Vigilancia Ambiental.
- Documento de Síntesis.

Algunos métodos para la evaluación de Impactos Ambientales que son usados con frecuencia en los proyectos son:

Listas de chequeo o verificación

Las listas de chequeo, check list o de verificación, son instrumentos que consisten en elaborar una lista ordenada de factores ambientales (elementos del medio) que pueden ser potencialmente afectados por una acción humana. De este modo, es posible identificar todas las posibles consecuencias relacionadas con la acción propuesta; dado su naturaleza exhaustiva, este método, asegura que durante el estudio de impacto ambiental ninguna alteración relevante sea omitida.

En una lista de chequeo, se prevén los impactos sobre: suelo (en cuanto a: usos del suelo, rasgos físicos únicos, etc.), agua (en cuanto a: calidad, alteración de caudales, etc.), atmósfera (en cuanto a: calidad del aire, variación de temperatura, etc.), flora (en cuanto a: especies en peligro, deforestación, etc.), fauna (en cuanto a: especies raras, especies en peligro, etc.), recursos (en cuanto a: paisajes naturales, pantanos, etc.), recreación (en cuanto a: pérdida de pesca, camping y picnics, etc.), culturales (en cuanto a: afectación

de comunidades indígenas, cambios de costumbres, etc.), y todos los elementos del ambiente que sean de interés especial.

Cuestionarios.

Este instrumento, permite, a través de preguntas sistemáticas sobre categorías genéricas de factores ambientales, estimar hasta qué punto se cuenta con información sobre los impactos. Se puede llegar a tener una idea cualitativa de la importancia relativa de un impacto, sea positivo o negativo.

Diagramas de flujo

Los diagramas de flujo se emplean para establecer relaciones lineales de causa entre la acción humana y el ambiente afectado. También permiten identificar impactos indirectos. Los diagramas, a medida que se elaboran, se vuelven más complejos porque se multiplican las acciones y los impactos ambientales relacionados con el proyecto. Es más útil cuando hay una mayor simplicidad en los impactos; se consideran mayormente instrumentos complementarios a las matrices.

Redes

En los diagramas de redes, los componentes ambientales están interconectados, formando tramas o redes, permite identificar impactos secundarios y terciarios. Para el desarrollo de un diagrama de red, se necesita indicar los impactos que resultan de cada actividad del proyecto. Se colocan en orden jerárquico: impactos primarios, impactos secundarios e impactos terciarios, y así sucesivamente hasta obtener las interacciones respectivas.

Al contrario que los diagramas de flujo, se usan para proyectos complejos o con muchos componentes ya que permite identificar las interacciones entre ellos. Además, proporcionan resúmenes útiles y concisos de los impactos globales de un proyecto.

Matriz de Leopold.

Fue desarrollada en los años 70 por el Dr. Luna Leopold y sus colaboradores, inicialmente para ser utilizada en proyectos de construcción; por su enfoque y contenido, permite la evaluación preliminar de los proyectos que prevén grandes impactos ambientales. Sin embargo, la matriz permite sólo identificar impactos y su origen. Para estimar la importancia y magnitud de los impactos, se necesita la ayuda de un grupo de expertos y de otros profesionales involucrados en el proyecto.

La Matriz de Leopold original consiste en un listado de 100 acciones que pueden causar impactos ambientales y 88 características ambientales, haciendo un total potencial de 17 600 números interpretar. Esta evidente dificultad; ha permitido también que la matriz pueda ser utilizada de forma parcial, limitando de este modo al análisis únicamente de los impactos significativos.

Cada casillero de la matriz distingue la magnitud e importancia del impacto, en una escala de uno a diez. La magnitud del impacto hace referencia a su cantidad física y puede ser de carácter positivo o negativo. La importancia puede recibir valores positivos, y puede ser muy diferente de la magnitud. Por ejemplo: si un contaminante degrada fuertemente un curso de agua en una región muy remota, sin fauna valiosa ni asentamientos humanos, la importancia puede ser reducida; es decir, una alta magnitud, pero baja importancia.

2.3. Marco conceptual

Impacto Ambiental

El impacto es una alteración significativa de parte o la totalidad del ambiente por causas humanas, está vinculado con la aceptabilidad respecto al deterioro ambiental y el grado de significancia positivo o negativo producido sobre la calidad ambiental [20].

Lodo residual

El lodo residual se origina de los procesos de tratamiento de agua residual. El lodo concentra en su composición metales pesados, componentes orgánicos pobremente biodegradables, así como potenciales organismos patógenos (virus, bacterias, etc.). Sin embargo, también es rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y materia orgánica [21] y [22].

Planta de tratamiento de agua residual

Las plantas de tratamiento de agua son un conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es que a través de los equipamientos elimina o reduce la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales [23]

Poder Calorífico Inferior

Es la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación entre un combustible y el comburente. Es el valor que interesa en los usos industriales, ya que es el calor realmente aprovechable, el producido sin tener en cuenta la energía de la condensación del agua y otros procesos de pequeña importancia [18]

Procesos termo-químicos

Son el conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad, presión, de los metales o las aleaciones en estado sólido, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la elasticidad [18].

Valorización energética

Consiste en explotar el potencial de los materiales como combustible para generar una forma de energía en plantas térmicas. En este proceso, se recupera la energía existente en los materiales, evitando su degradación contaminante en un vertedero. La valorización energética de residuos se realiza mediante procesos de combustión controlada o incineración. Empleando tecnología apropiada, este tipo de procesos son amigables con el medio ambiente [24].

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Nivel de investigación

Tipo de investigación: La investigación es tipo descriptiva, porque permite acercarse al problema para conocerlo y estudiarlo, a su vez plantear una situación concreta en modo de procesar la información y obtener teorías que demuestren la solución al problema [25].

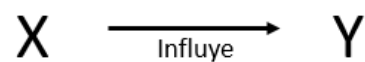
Nivel de investigación: El presente estudio reúne las características de una investigación, descriptiva, exploratorio y predictiva.

3.2. Diseño de Investigación

El diseño de investigación es Transeccional: Correlacional – causal. En este diseño se recolectan datos en un solo momento de tiempo, y su objetivo es describir relaciones entre dos o más variables en un momento determinado.

La Hipótesis se fundamenta en evaluar relaciones causales.

2.2.1 Diseño de contrastación de hipótesis



Dónde:

X: Modelo de valorización energética del lodo.

Y: Riesgo de Impacto Ambiental negativo

3.3. Población, muestra y muestreo

Población:

- A. Lodo residual procedente de plantas de tratamiento de agua residual en la Provincia de Chiclayo.
- B. La Población de la Provincia de Chiclayo.

Muestra y Muestreo

- Para la parte A: la muestra es igual a la población.
- Para la parte B: es de tipo probabilística.

3.4. Operacionalización de variables

Para la investigación se utilizarán los siguientes métodos, agrupados según las variables independientes y dependientes. Por cada uno de los indicadores se determina el método a utilizar. La Tabla 5 muestra la operacionalización de las variables:

Tabla 5: Operacionalización de variables.

Variables	Indicadores	Forma de cálculo	Descripción
<p><i>Variable Independiente:</i></p> <p>Modelo de Valorización energética del lodo</p>	<p><u>Indicador 1:</u> Características del lodo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis proximal. • Análisis elemental. 	<p>La biomasa se caracteriza a través del análisis próximo y el análisis último. El análisis próximo cuantifica la fracción sólida seca (componentes orgánicos e inorgánicos) y la humedad. El análisis elemental proporciona el porcentaje de los principales elementos en base seca.</p>
	<p><u>Indicador 2:</u> Poder Calorífico Inferior</p>	<p>Poder Calorífico Inferior de un combustible seco: $PCI = 8.140 \times C + 29.000 \times (H - O/8) + 2.220 \times S O/8$ </p>	<p>Es la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación entre un combustible y el comburente.</p>
	<p><u>Indicador 3:</u> Calidad del producto</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad del producto en relación con otros gases provenientes de diversos procesos de combustión de biomasa residual con fines energéticos. 	<p>Se mide la calidad del producto a través del conjunto de características que este posee respecto a los de otros gases (PCI, Cantidad de oxidante, cantidad de gas obtenido, temperatura del gas).</p>

	<u>Indicador 4:</u> Análisis costo - beneficio	<ul style="list-style-type: none"> • Costos Totales de Operación. • Beneficios sociales y ambientales. 	Se evalúan no sólo los aspectos financieros, sino también los aspectos sociales y medioambientales que son de mayor interés para este proyecto.
<i>Variable Dependiente:</i> Riesgo de Impacto Ambiental negativo	<u>Indicador 1.</u> Impacto sobre los RRNN	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz de Leopold 	Efectos que produce la actividad humana sobre el agua, suelo, aire, flora y fauna.
	<u>Indicador 2:</u> Impacto sobre la salud humana	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz de Leopold 	Efectos que produce la actividad humana sobre la salud humana.
	<u>Indicador 3:</u> Impacto sobre el ambiente socio – económico cultural.	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz de Leopold 	Efectos que produce la actividad humana sobre la ambiente socio-económico cultural.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

- Observación
- Muestreo
- Análisis físico – Químico.
- Búsqueda de información técnica documental de los procesos de conversión.
- Encuesta
- Entrevista
- Diagrama de flujo

3.6. Técnicas de Procesamiento de Datos

- Análisis de contenido
- Desarrollo del Modelo de valorización
- Simulaciones con Aspen Plus
- Matriz de Leopold
- Análisis Costo - beneficio

3.7. Matriz de metodologías, técnicas y herramientas

CUADRO RESUMEN DE METODOLOGÍAS, TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS DE INGENIERÍA INDUSTRIAL																					
Alto riesgo de Impacto Ambiental negativo por inadecuada valoración del lodo procedente de plantas de tratamiento de agua residual en la Provincia de Chiclayo																					
ÁREA	RESPONSABLE	PROBLEMA	CAUSAS		METODOLOGÍA	TÉCNICAS/HERRAMIENTAS/NORMAS / LEYES	LOGROS	INDICADORES													
								DESCRIPCIÓN	FÓRMULA												
x MEDIO AMBIENTE	Chávez Romero, Zaida Brenilda	Alto riesgo de Impacto Ambiental negativo por inadecuada valoración del lodo procedente de plantas de tratamiento de agua	Método	1. Métodos ineficientes de tratamiento.	Modelo de Valorización energética del lodo	Caracterización del lodo	Obtener la caracterización del lodo residual.	Análisis elemental	Composición típica del lodo residual en base <i>Análisis Elemental</i>												
				2. No se aplican métodos de				Obtención del PCI del lodo		Análisis próximo	<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Análisis Elemental</td> </tr> <tr> <td>C (%)</td> <td>53</td> </tr> <tr> <td>H (%)</td> <td>7,2</td> </tr> <tr> <td>N (%)</td> <td>4,53</td> </tr> <tr> <td>O (%)</td> <td>35,5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Análisis próximo</td> </tr> <tr> <td>H₂O/sludge</td> <td>0,25</td> </tr> <tr> <td>CHNO/dry residual</td> <td>0,52</td> </tr> <tr> <td>Ash/dry residual</td> <td>0,37</td> </tr> </table>	Análisis Elemental		C (%)	53	H (%)	7,2	N (%)	4,53	O (%)	35,5
Análisis Elemental																					
C (%)	53																				
H (%)	7,2																				
N (%)	4,53																				
O (%)	35,5																				
Análisis próximo																					
H ₂ O/sludge	0,25																				
CHNO/dry residual	0,52																				
Ash/dry residual	0,37																				
							Obtener el poder calorífico inferior del	Poder Calorífico Inferior	$PCI = 8,140 \times C + 29,000 \times (H - O/8) + 2,220 \times S - 600 \times H_2O$												

		residual en la Provincia de Chiclayo		valorización del lodo			lodo residual no menor a 6 MJ/Nm ³ (base seca).		
			Tecnología	1. No uso de tecnología sofisticada en el tratamiento de efluentes	Propuesta de mejora del tratamiento de efluentes	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento del agua residual • Proceso de secado de lodo 	Determinar la tecnología a utilizar para mejorar la eficiencia del tratamiento de efluentes mayor al 90%.	Eficiencia del tratamiento.	$E_{BOD}=100.(1-0,70.HRT^{-0,50})$ $E_{COD}=100.(1-0,68.HRT^{-0,35})$ $E_{FC} \rightarrow \ln \left[\frac{N_{FC-UASB(o)}}{N_{FC-UASB}} \right] = \sigma \cdot HRT$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • E_{COD}, E_{BOD} and E_{FC} son eficiencias de remoción de COD, BOD y Coliformes Fecales (%). • HRT: Tiempo de retención hidráulico (Horas). • $N_{FC-UASB(o)}$: Cantidad de Coliformes Fecales en efluente del reactor.

								<ul style="list-style-type: none"> • $N_{FC-UASB}$: Cantidad de Coliformes Fecales en efluente del reactor • $\sigma = \sigma(20^{\circ}\text{C}) \cdot (1,19^{(T-20)})$ - Constante cinética. 	
			Medio Ambiente e Tecnología	1. Usos inadecuados del lodo que deterioran el medio	Valorización energética del lodo	Gasificación del lodo residual	<p>Determinar la tecnología para valorizar el lodo</p> <p>Evaluar la cantidad de energía producida</p>	<p>Método de factores Ponderados.</p> <p>Cantidad de energía obtenida</p>	<p>Matriz de enfrentamiento Calificación de la Matriz.</p> <p>Simulaciones con ASPEN PLUS.</p>
				2. Eliminación inadecuada a medio ambiente	Evaluación del Riesgo de Impacto Ambiental	<p>Matriz de Leopold:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elementos ambientales • Actividades propuestas 	<p>Cumplir al 100% con los criterios establecidos para la Matriz.</p> <p>Reducir el riesgo de Impacto ambiental</p>	<p>Cantidad de elementos ambientales que intervienen en el Impacto ambiental.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto sobre los RRNN • Impacto sobre la salud humana • Impacto sobre el ambiente socio – económico cultural. • Impacto sobre el paisaje

							negativo al medio ambiente en un 20%.		
--	--	--	--	--	--	--	---------------------------------------	--	--

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Diagnóstico

En la Región Lambayeque, las aguas residuales son tratadas a partir de sistemas con Lagunas de estabilización, las cuales son eficientes para la reducción de los índices de Coliformes Fecales, pero no para la remoción de metales pesados, y contaminantes como DBO y DQO, producto de las actividades industriales, hospitalarias y comerciales que vienen siendo mezcladas con las aguas residuales domiciliarias, ocasionando contaminación del agua, del aire y del suelo, y por consecuencia afectando la salud de los pobladores en las zonas aledañas.

Actualmente, los efluentes de las plantas de estabilización (con alto contenido de contaminantes) son descargados en el mar y usados para irrigación agrícola. Un subproducto de este tipo de tratamiento es el lodo sedimentado, también llamado lodo residual o lodo de depuradora, que contiene microorganismos patógenos y su inadecuada disposición final representa un problema sanitario. El siguiente diagrama de Ishikawa, resume la problemática presentada:

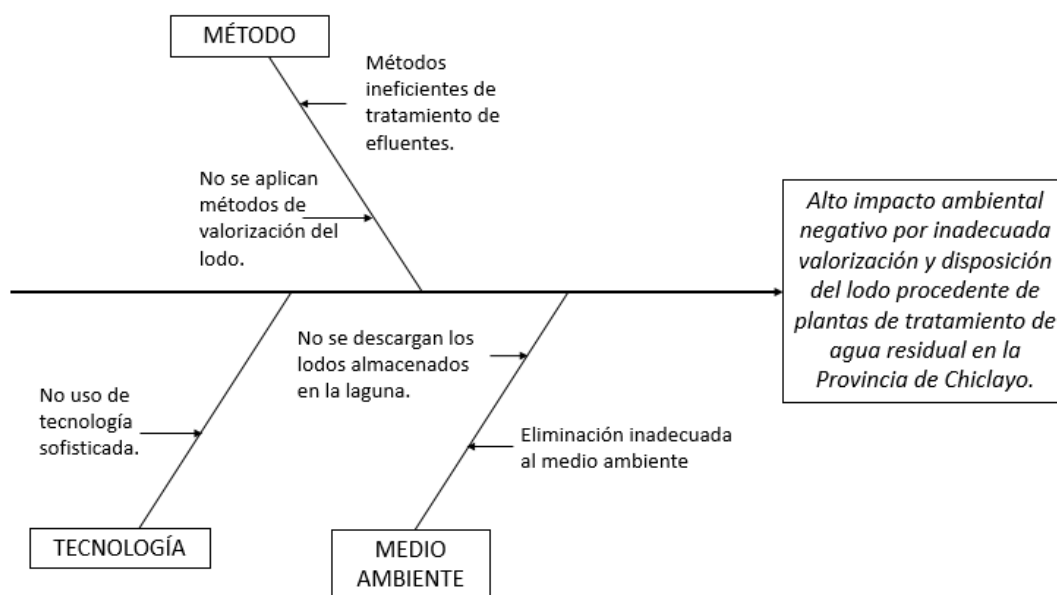


Figura 8: Diagrama de Ishikawa para el problema de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1. CAUSA 1: Métodos ineficientes de tratamiento de efluentes.

La región Lambayeque cuenta 23 plantas de tratamiento de agua residual en las diferentes provincias; todas bajo la administración de EPSEL S.A y con lagunas de estabilización. Los efluentes residuales de la provincia de Chiclayo (distritos de Chiclayo, José Leonardo Ortiz y La Victoria) se tratan en dos plantas de tratamiento. La de mayor capacidad es la Planta de Tratamiento de San José, en la cual se realiza la estabilización de la materia orgánica mediante la descomposición aeróbica generándose gases como CO_2 , H_2S y el CH_4 , y por sedimentación se acumulan al fondo de la laguna los sólidos sedimentables [26] y [27]. La Planta está localizada al noroeste del C.P. Ciudad de Dios (Distrito de San José) hacia la margen izquierda de la carretera San José – Chiclayo; a aproximadamente 15 min de Chiclayo.

El sistema de tratamiento de aguas residuales en Chiclayo, específicamente la Planta ubicada en el distrito de San José, consta de las siguientes etapas:

En la primera etapa 1, el agua residual es transportada hacia la planta por gravedad a través de un **Canal de Ingreso**, que tiene una sección rectangular y adecuada inclinación o pendientes para circular un caudal de agua máximo de 1600 L/s. En la siguiente etapa, el tratamiento preliminar está compuesto por un par de **Cámaras de Rejilla Gruesa** que permiten detener materiales de gran tamaño como palos, bolsas, trozos de madera, latas, botellas, etc. Cuenta además con dos unidades electromagnéticas automáticas para detectar materiales metálicos. La distancia entre barras es de 6,35 cm y el diámetro de barra es 2,5 cm [26]. Los sólidos retenidos son dispuestos en un relleno sanitario en zonas cercanas a la planta. Durante la siguiente etapa, a través de una **Medidor de Caudales Parshall**, se mide el flujo de agua que ingresa a las lagunas de estabilización.

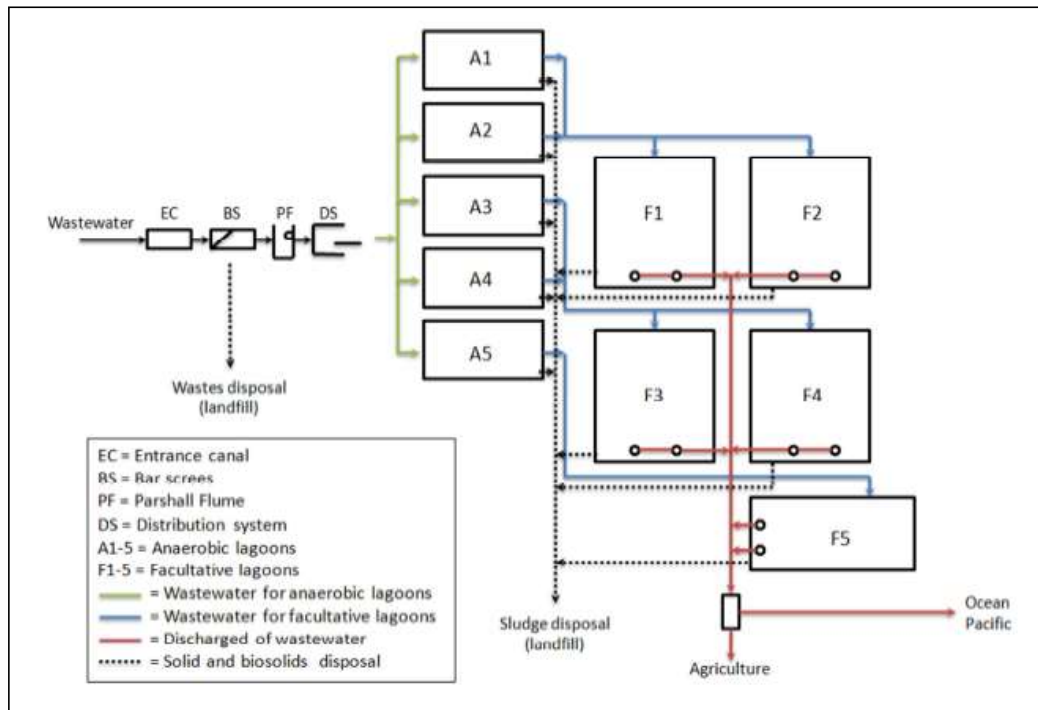
En la etapa 4, el **Sistema de Distribución** divide el caudal en dos flujos y posteriormente en cinco para su ingreso a cada una de las **5 Lagunas de Estabilización Primaria (Etapa 5)**. El proceso genera gases como CH_4 , CO_2 , y H_2S principalmente, mediante la descomposición por acción de bacterias anaeróbicas. Los olores nauseabundos propios de los gases son característica particular de esta etapa. Las lagunas tienen una dimensión de

165 x 122 m, con una profundidad de 3,5 m. Cada laguna dispone sus efluentes en una laguna facultativa. **Las Lagunas Facultativas** o secundarias (Etapa 6) completan el tratamiento a través de la oxigenación natural debido a la presencia de algas, ya que no son tan profundas como las primeras. Las dimensiones de estas lagunas son 245 x 242 m y 1,80 m de profundidad. El color característico del agua en esta etapa es verde, mientras que en las lagunas primarias es rojizo.

Durante la última etapa, un **Canal de Salida**, de 6 kilómetros lineales desde el punto de descarga hasta la orilla de playa de San José [26], a través de un bypass, permite controlar la salida de los efluentes de la planta, cuya disposición final es el mar de San José a través de un canal a tajo abierto. Adicionalmente un **Canal de Regadío** permite desviar parte del flujo (50%) a campos de cultivo para riego de plantas de tallo alto que beneficia a más de 17 hectáreas de terreno agrícola de los sectores Gallito y Baldera del distrito de San José [28]

La figura 9 muestra la distribución de las etapas del proceso de tratamiento en la PTAR¹ San José, mientras que la figura 10, muestra el esquema transversal de las lagunas de estabilización en serie.

¹ PTAR: Planta de tratamiento de agua residual



Leyenda:

EC: Canal de entrada

BS: Rejilla

PF: Medidor Parshall

DS: Sistema de distribución

A1-5: Lagunas anaeróbicas

F1-5: Lagunas facultativas

Wastewater for anaerobic lagoons: Agua residual para lagunas anaeróbicas

Wastewater for facultative lagoons: Agua residual para lagunas facultativas

Discharge of wastewater: Descarga del agua residual tratada

Solid and biosolid disposal: Disposición de sólidos y biosólidos

Figura 9: Sistema de tratamiento de aguas residuales de Chiclayo. Planta de estabilización de San José.



Figura 10: Esquema transversal de las lagunas de estabilización de San José.

Fuente: [8]

Con respecto a la calidad del efluente, la tabla 6 muestra la composición del agua residual cruda durante los últimos años. Según el análisis de los datos proporcionados por EPSEL y otras investigaciones se ha determinado que el índice de contaminación del agua proveniente de las ciudades es cada vez mayor. Es de esperar también que la eficiencia del sistema haya disminuido puesto que a la actualidad no se realizan trabajos de mantenimiento. El afluente crudo presente valores de Ph 7,8 y 24°C de temperatura; además, 270,5 mg/L DBO₅; 2,7ml/l de SST; y 3,6E+07 NMP/100ml de Coliformes termotolerantes.

Tabla 6: Composición del agua residual cruda en las lagunas de Estabilización de San José.

AÑO	PH	T°	DBO ₅ (mg/L)	Col.Total (NMP/100ml)	SST (ml/l/hr)
2008	7,81	22,23	210,30	3,54E+07	2,47
2009	7,94	22,36	202,73	4,48E+07	3,25
2010	7,94	23,70	228,06	4,13E+07	2,25
2013	7,80	24,67	223,38	3,16E+07	1,75
2014	7,96	25,55	307,58	3,85E+07	2,16
2015	7,99	25,00	294,36	3,83E+07	2,66
2016	7,77	25,00	343,18	3,44E+07	2,51
2017	7,70	25,30	311,27	3,35E+07	1,60
2018	7,84	25,00	274,36	2,58E+07	1,46

Fuente: [27] .

En los últimos años se han determinado valores del efluente de salida del sistema en un rango de 87,86 – 180,00 mg/L para DBO₅ (es decir, un promedio de: 133,93 mg/L DBO₅) y 3,9E+06 NMP/100ml para Coliformes fecales; por tanto, actualmente la PTAR San José, presenta una eficiencia de remoción de BOD₅ del 50%, y 91% para Coliformes Fecales; lo cual no es adecuado para cumplir las normativas vigentes, que sobre guardan la salud de las personas y el medio ambiente. Como lo muestran los valores de las tablas 7 y 8.

Tabla 7: Porcentaje de remoción de DBO y Coliformes Totales en las Lagunas de Estabilización de San José, 2008 – 2010.

AÑO	DBO5 (mg/L)	DBO5 (mg/L)	% de Remoción de DBO	Col.Total (NMP/100ml)	Col.Total (NMP/100ml)	% de Remoción de Col.
	Desagüe crudo	Efluente		Desagüe Crudo	Efluente	
2008	210,30	56,54	73,11	3,54E+07	1,24E+06	96,48
2009	202,73	55,00	72,87	4,48E+07	5,48E+05	98,78
2010	228,06	71,31	68,73	4,13E+07	4,92E+05	98,81
2013	223,38	70,38	68,49	3,16E+07	1,72E+05	99,45
2014	307,58	120,03	60,98	3,85E+07	2,35E+05	99,39
2015	294,36	122,03	58,55	3,83E+07	5,97E+05	98,44
2016	343,18	193,18	43,71	3,44E+07	2,38E+05	99,31
2017	311,27	149,59	51,94	3,35E+07	4,79E+05	98,57
2018	274,36	118,18	56,93	2,58E+07	7,08E+05	97,25

Fuente: Adaptado de [27]

Con la finalidad de controlar los excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en los efluentes de aguas residuales de una PTAR (para evitar daños a la salud y al ambiente) el Ministerio del Ambiente publicó el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM [29], en el cual se aprueban los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda.

La tabla 8 muestra la relación de cumplimiento del nivel de concentración de los contaminantes y el LMP establecido por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

Tabla 8: Relación del LMP del nivel de concentración de los contaminantes presentes en el agua residual de la PTAR San José según el Decreto Supremo N° 003 – 2010.

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpos de agua	Nivel de concentración del efluente de la PTAR San José	Cumple / No cumple
Aceites y grasas	mg/l	20	-	No se mide
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	10 000	3,90E+06	No cumple
Demanda Biológica de Oxígeno (5)	mg/l	100	130	No cumple
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	200	-	No se mide
pH	unidad	6,5 - 8,5	7,48	Si Cumple
Sólidos totales en suspensión	mL/l	150	-	No se mide
Temperatura	°C	< 35	-	No se mide

Fuente: Adaptado de [29].

Como se observa, para el índice de contaminación fecal, las características del efluente no cumplen lo establecido por el reglamento, lo cual significa que existe un nivel de contaminación potencial de causar daño a la salud y al medio ambiente. Tampoco se cumplen las exigencias para DBO, y por tanto, se puede concluir que el efluente tratado de la PTAR San José, cuyas aguas desembocan en las costas de la región y en campos de cultivo de productos alimenticios, representa un grave riesgo para la salud humano y todo el ecosistema marino de la región Lambayeque

El uso directo o indirecto de estas aguas, dada la presencia de la contaminación fecal (principalmente bacterias como Escherichia Coli, Enterococos Fecales o Coliformes Totales) pueden ocasionar una serie de enfermedades desde gastroenteritis leves hasta diarreas fatales, considerando también casos de disentería, hepatitis o fiebre tifoidea. En las playas por ejemplo, se observa en los bañistas un mayor índice de presencia fundamentalmente de gastroenteritis y otitis, afecciones en las vías respiratorias, mal de cuello, y picores en el ojo. También se pueden dar algunas infecciones a la piel debido a la aparición de determinados hongos en el agua y en la arena. Los animales domésticos y

aves costeras también pueden verse afectados, transmitiendo posteriormente enfermedades a las personas que están en contacto con ellos.

Según SUNASS, 2015, el Decreto Supremo N°003 – 2010 establece que la relación entre la DQO y la DBO₅ es 2 a 1; sin embargo, en la práctica, la relación se encuentra normalmente entre 3 y 4. Por lo tanto, las directrices internacionales establecen que no deben diseñarse PTAR para límites permisibles de DBO₅ de 100 mg/L, sino para concentraciones menores de 50 mg/L, a fin de cumplir el LMP de DQO de 200 mg/L. Esto significa que si se verifica el cumplimiento del LMP de la DBO₅, es muy probable que también cumpla el LMP de la DQO.

Es aún necesario, comparar este valor con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua residual tratada con estos usos establecidos por el Ministerio del Ambiente. Estos valores establecen que la concentración de parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua en su condición de cuerpo receptor no represente ningún riesgo significativo para la salud humana ni daños al ecosistema receptor. Cuando se vierte el efluente de la PTAR al cuerpo receptor de agua, se origina una zona de mezcla, luego de la cual, el cuerpo receptor debe cumplir los valores del ECA del Agua, que dependen de la categoría de uso del cuerpo receptor.

La Tabla 9 muestra la comparación entre los LMP para efluentes de una PTAR y el ECA del agua.

.

Tabla 9: Comparación entre los LMP para efluentes de PTAR y ECA del agua.

PARÁMETRO	UNIDAD DE MEDIDA	LMP	ECA Y FACTOR DE DILUCIÓN (FD) DEL LMP NECESARIO EN UN CUERPO NATURAL LIBRE DE CONTAMINACION PARA EL CUMPLIMIENTO DEL ECA									
			CATEGORÍA 1A2 ²		CATEGORÍA 1A3 ²		CATEGORÍA 1B1 ²		CATEGORÍA 2C3 ²		CATEGORÍA 3 ²	
			ECA	FD ¹	ECA	FD ¹	ECA	FD ¹	ECA	FD ¹	ECA	FD ¹
DBO5	mg/L	100	5	20	10	10	5	20	10	10	15	7
DQO	mg/L	200	20	10	30	7	30	7	-	-	40	5
SST	mg/L	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COLIFORMES TERMOTOLERANTES	NMP/100 ml	10 000	2 000	5	20000	1	200	50	1 000	10	2 000	5
ACEITES Y GRASAS	mg/L	1	20	20	1	20	-	4	2	10	2	12
NITRÓGENO AMONIACAL	mg/L	453	2,0	23	3,7	12	-	-	0,21	-	-	-
FÓSFORO (FOSFATO TOTAL)	mg/L	0,15	143	93	0,15	93	-	-	0,1	-	1	-

- 1) FD = Factor de dilución; calculado para que el efluente de la PTAR que cumple los LMP pueda cumplir también los ECA-Agua. Ejemplo: para poder verter el efluente de una PTAR con DBO5 = 100 mg/L (cumple el LMP) en un río de categoría 1, subcategoría A2, con concentración inicial de DBO5 = 0 mg/L se necesita que el caudal del río sea por lo menos 20 veces el caudal del efluente de la PTAR.
- 2) Categoría 1 = Poblacional y recreacional:
- Subcategoría A2 = aguas superficiales que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.
 - Subcategoría A3 = aguas superficiales que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado.
 - Subcategoría B1 = aguas superficiales destinadas para recreación por contacto primario.
- Categoría 2 = Actividades marino-costeras.
- Subcategoría C3 = otras actividades
- Categoría 3 = Riego de vegetales y bebida de animales; riego de vegetales de tallo alto.
- 3) Calidad del efluente de una PTAR de lagunas facultativas considerando una concentración en el afluente según la norma OS.090 y una remoción de nitrógeno total de 40% y del fósforo de 30%

Fuente: [30]

Como se observa, los ECA para las diferentes categorías están muy por debajo de los LMP. En el caso de la PTAR San José, los efluentes finales se vierten en el mar de San José, del que se hacen usos poblacionales, recreativo y actividades marino costeras como la pesca artesanal; así como para el riego de vegetales y bebidas de animales.

Según el Artículo 82° de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos [31], la Autoridad Nacional del Agua (ANA) autoriza el reúso del agua residual tratada siempre que se trate de los mismos fines para los cuales fue otorgada la licencia. Para actividades distintas se requiere autorización Según el reglamento de la misma Ley, “Reglamento para el otorgamiento de autorizaciones de vertimiento y reúso de aguas residuales tratadas, dada según Resolución Jefatural N°224 – 2013 – ANA [32], la autorización puede darse siempre que se cumplan con las siguientes condiciones:

- Sean sometidos a los tratamientos previos y que cumplan con los parámetros de calidad establecidos para los usos sectoriales, cuando corresponda; es decir LMP y ECA del agua en el cuerpo receptor.
- Cuenten con la certificación ambiental otorgada por la autoridad ambiental sectorial competente, que considere específicamente la evaluación ambiental de reúso de las aguas.
- En ningún caso se autorizará cuando ponga en peligro la salud humana y el normal desarrollo de la flora y fauna o afecte otros usos.
- Se cuente con el instrumento ambiental aprobado por la autoridad ambiental competente, que contemple la evaluación del sistema de tratamiento y sus efectos en el cuerpo receptor.

Es necesario mencionar, que ninguna de las PTAR de EPSEL S.A., cuenta con Autorización del ANA para el vertimiento y reúso de las aguas residuales tratadas. A nivel nacional, más de 90% carece de autorización de vertimiento y reúso [33].

La Contraloría General de la República de Lambayeque, ha detectado que las aguas residuales son utilizadas para irrigar más de 618 Ha de sembríos en Chiclayo [34], siendo los principales cultivos son arroz, camote, betarraga, alfalfa y hortalizas de tallo bajo que

comúnmente se consumen en los hogares. A lo largo del canal, los campesinos colocan mangueras y bombas para extraer el agua y utilizarla en sus sembríos, éstos no solo se venden en los mercados sino también en los principales supermercados privados [35]. Por lo cual la Contraloría ha indicado que estos hechos contribuyen a la contaminación y pone en grave peligro la salud de la población.

Las principales entidades competentes, como Gerencia Regional de Agricultura, EPSEL S.A., Gerencia Regional de Salud, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) y a la Fiscalía Especializada en Delitos Ambientales han constatado “el deficiente funcionamiento del sistema de emisores de la ciudad de Chiclayo y la falta de acciones adecuadas por parte de los responsables con respecto al tratamiento de aguas residuales” generando de este modo un “riesgo de contaminación hídrica y ambiental, debido a la emisión de aguas servidas no tratadas y a las condiciones en que éstas se están vertiendo a drenes que desembocan al mar y que en su trayecto son utilizados en la producción de terrenos de cultivo para insumos de consumo de la población” [35].

A nivel internacional las principales guías que regulan el uso de las aguas residuales tratadas proceden de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Recientemente, se han publicado nuevas guías que permiten el uso de aguas residuales, excretas y aguas grises para determinadas actividades especialmente en agricultura, con el fin de maximizar la seguridad para la salud pública. Así también, la Agencia estadounidense de Protección Ambiental (EPA) clasificó su uso en ocho categorías, según la calidad del agua: urbano, áreas de acceso restringido, agrícola para cultivos consumidos crudos y para cultivos no consumidos crudos, recreacional, industrial, recarga de acuíferos y reúso indirecto potable [36] y [37].

La FAO publicó en 1999 la guía sugerida para aguas tratadas en el reúso agrícola y sus requerimientos de tratamiento. La tabla 10 muestra los parámetros sugeridos por la FAO.

Tabla 10: Guías sugeridas por la FAO para reúso agrícola de aguas residuales tratadas y sus requerimientos de tratamiento.

<i>Tipo de reúso agrícola</i>	<i>Calidad del agua residual</i>	<i>Requerimiento de tratamiento</i>
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente.	pH 6,5 - 8,4	
	DBO < 10mg/l	Secundario
	< 2 UNT	Filtración
	< 14 NMP/100 ml	Desinfección
	< 1 huevo/l (nematodos intestinales)	
Reúso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente.	pH 6,5 - 8,4	
	DBO < 30mg/l	Secundario
	< 2 UNT	Desinfección
	< 200 NMP/100 ml	
	< 30 mg/l SS	
Reúso agrícola en cultivos que no se consumen	pH 6,5 - 8,4	
	DBO < 30mg/l	Secundario
	< 200 NMP/100 ml	Desinfección
	< 30 mg/l SS	

Fuente: [38]

Considerando estos requerimientos, y según la tabla 7, los efluentes residuales tratados en la PTAR San José no cumple las exigencias de calidad, ni el requerimiento de tratamiento para su uso con fines agrícolas. Su utilización conlleva también un grave daño sobre la salud humana.

Podemos concluir que las características del efluente final de las lagunas de estabilización de San José no garantizan un bajo riesgo de impacto ambiental en el ambiente y en la salud humana, sino que representan un riesgo sanitario por el consumo de aguas y alimentos contaminados.

4.1.2. CAUSA 2: No uso de Tecnología sofisticada.

Como ya mencionado en el apartado 3.1.1 la planta de tratamiento de San José fue construida en 1990 y comenzó a operar en Marzo 1996. Fue proyectada para el tratamiento de las aguas residuales drenadas por los colectores Norte, Sur, Norte Norte de la ciudad de Chiclayo para una capacidad de 76 850 m³ al día, es decir 890 l/s.

Aproximadamente 915 km de redes de alcantarillado se han instalados en la sectores de la ciudad de Chiclayo cuyas aguas residuales tienen como disposición final la planta de tratamiento de San José, sin embargo, muchas de ellas no han sido renovadas ni se hacen trabajos de mantenimiento. Adicionalmente, la planta de tratamiento no cuenta con autorización de Sanitaria de Funcionamiento emitido por DIGESA. Según el gerente de EPSEL S.A., las lagunas no reciben mantenimiento hace 20 años, cuando “deberían limpiarse cada 3 a 4 años como máximo”. Cada laguna tiene aprox. 140 mil metros cúbicos de lodo sedimentado.

El actual complejo cuenta con pre-tratamiento de cámara de rejas (Ver figura 11), dos unidades colocadas en paralelo en el canal de ingreso de las aguas, a través de ellas, se recogen grandes cantidades de elementos sólidos como bolsas de plásticos, restos de tela, pedazos de madera o troncos de plantas, botellas, inclusive cuerpos de animales muertos. Los sólidos retenidos en las rejillas son colocados en un relleno sanitario.

Un sistema de medición de caudales Parshall (Ver figura 12), y posteriormente un sistema de distribución dividen el flujo de agua hacia las lagunas de estabilización primaria anaeróbicas (Ver figura 13).

5 lagunas de estabilización anaeróbicas en serie son conectadas a otras 5 lagunas secundarias facultativas (Ver figura 14 y 15). El efluente de salida es dirigido a través de un canal (Ver figura 16) hacia su disposición final en el mar de Santa Rosa y a los campos de cultivo.



Figura 11: Cámara de Rejas

Fuente: Elaboración propia



Figura 12: Medidor de Caudales Parshall
Fuente: Elaboración propia



Figura 13: Caja de distribución de Caudales.
Fuente: Elaboración propia



Figura 14: Lagunas Anaeróbicas.

Fuente: Elaboración propia



Figura 15: Lagunas Aeróbicas.

Fuente: Elaboración propia



Figura 16: Estructura del efluente de salida.

Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia ante el uso de tecnología básica en el tratamiento de aguas residuales, este no garantiza un adecuado vertimiento en cuerpos de agua y/o reutilización. Además, es evidente el deterioro de la infraestructura, lo que demuestra una falta total de mantenimiento, únicamente se realizan labores de limpieza en los taludes de las lagunas, y los residuos sólidos gruesos retenidos en las cámaras de rejillas son enterrados en áreas cercanas a la planta.

Se pueden mencionar algunos ejemplos alrededor del mundo que demuestran la obtención de un efluente apto para posteriores usos sin perjudicar la salud humana y el medio ambiente.

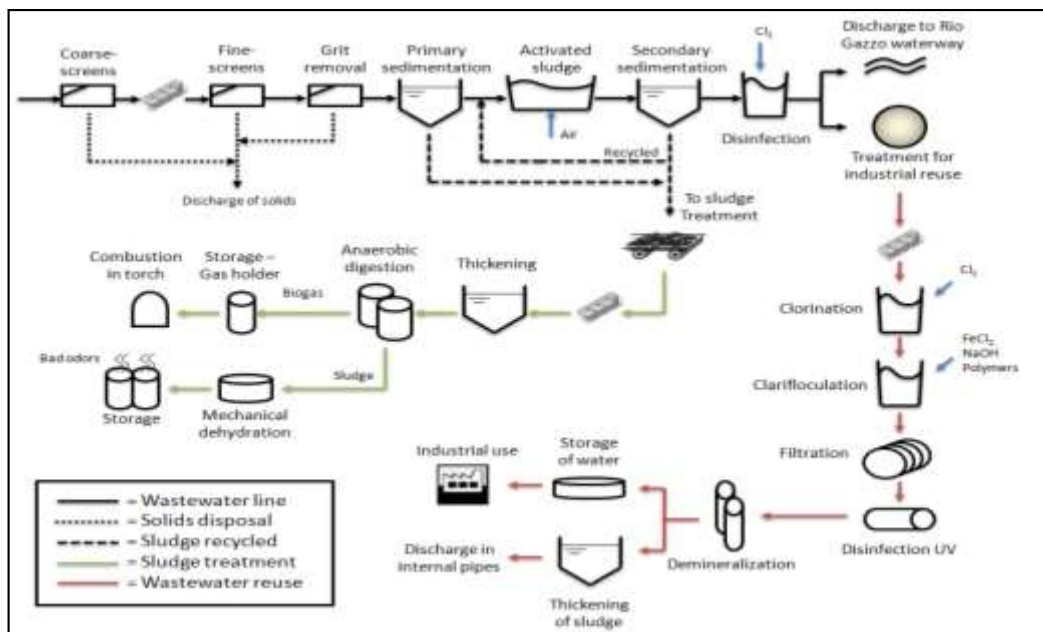
Novi Ligure (Al), Italia.

Esta investigación, aunque lejana geográficamente, muestra una realidad que hace posible el tratamiento de agua residual de origen doméstico e industrial en una pequeña comunidad, permitiendo su reutilización en otras industrias de la localidad, y demostrando así los beneficios y viabilidad técnica, económica, ambiental y social del tratamiento de aguas residuales.

La localidad de Novi Ligure, está ubicada en la provincia de Alessandria, región Piamonte con alrededor de 29 000 habitantes. Es una ciudad principalmente agrícola y comercial; a su sistema de tratamiento de agua residuales está conectado también los efluentes de la comunidad de Pozzolo Formigano con una población de 5 000 habitantes. La planta está diseñada para una capacidad de 70 000 habitantes aproximadamente. El sistema de drenaje tiene una cobertura de 100% industrial y 98% de la población civil, por lo que el 64% del flujo de agua es de origen industrial y el 36 % es de origen doméstico [39].

El sistema de depuración está constituido por tratamiento preliminar compuesto por rejillas de separación de sólidos gruesos y finos, y desarenador; un sistema de sedimentación primaria, y tratamiento biológico con lodos activados, a continuación, un proceso de sedimentación secundaria y desinfección con cloro. El efluente final es descargado en el Río Gazzo a 600 metros de la planta. El efluente también puede ser tratado con objetivos de reutilización industrial.

El lodo obtenido es tratado mediante digestión anaeróbica, luego a través de deshidratación mecánica, para finalmente ser destinado a plantas de compostaje. El sistema tiene altos niveles de eficiencia de remoción, alrededor de 75,8% de DQO, 89% de DBO5, 81% de SST, 60 % para NH_4 y 51% para P_{tot} . La figura 17 muestra el esquema del proceso de tratamiento de Novi Ligure:



Leyenda:

Coarse screens: Rejas gruesas
Fine screens: Rejas finas
Grit removal: Desarenador
Primary sedimentation: Sedimentación primaria
Activated sludge: Lodos activados
Secondary sedimentation: Sedimentación secundaria
Disinfection: Desinfección
Discharge to Rio Gazzo waterway: Descarga de agua al Rio Gazzo
Treatment for industrial reuse: Tratamiento para reuso industrial
Chlorination: Clorinación
Clariflocculation: Clarifloculación
Filtration: Filtración
Disinfection UV: Desinfección UV
Demineralization: Desmineralización
Storage of water: almacenamiento de agua
Thickening of sludge: Espesamiento del lodo
Discharge in internal pipes: Descarga en redes internas
Anaerobic digestion: Digestión anaeróbica
Storage gas holder: Almacenamiento del gas
Combustion in torch: Combustión del gas
Mechanical dehydration: Deshidratación mecánica
Wastewater line: Línea de agua residual
Solid disposal: Disposición de sólidos
Sludge recycle: Recirculación del lodo
Sludge treatment: Tratamiento del lodo
Wastewater reuse: Reutilización del agua

Figura 17: Esquema de tratamiento de aguas residuales de la Comunidad de Novi

Ligure (Al), Italia.

Fuente: [39].

Bucaramanga, Colombia.

Bucaramanga, es la capital del departamento de Santander, en Colombia, con una población total de 523 000 habitantes. La ciudad de Bucaramanga tiene la primera planta a escala real para tratamiento de aguas residuales con reactores UASB, llamada Planta de Tratamiento de Río Frío. Con esta planta se ha demostrado la factibilidad y eficiencia de funcionamiento de este tipo de tecnología en regiones con clima tropical; además, es la primera aplicación exitosa del uso de Reactores UASB para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

La planta atiende actualmente a una población 320 000 habitantes de la localidad de Floridablanca y la zona sur de la ciudad de Bucaramanga. La instalación de los reactores

fue gradual en la PTAR Río Frío, en noviembre de 1990 comenzó a operar el primer reactor, en Enero de 1991, el segundo; el tercero en 1995, y para el 2005 estaba funcionando un cuarto reactor. Cada reactor necesitó de un tiempo de arranque de aproximadamente 6 meses [40].

El proceso está compuesto por tratamiento preliminar, primario y secundario, adicionalmente el tratamiento de lodos y la disposición del biogás. El tratamiento preliminar está constituido por estructuras de cribado y desarenado; el tratamiento primario por 5 baterías modulares de reactores UASB (actualmente sólo 4 están en funcionamiento) y dos lagunas facultativas como post-tratamiento (una de las lagunas está siendo reemplazada por un tanque de aireación) [41].

Cada reactor tiene un volumen de 3 360 m³, con una profundidad de 4 metros y un TRH de 6 horas. El sistema tiene una eficiencia de remoción cerca de 60-65% para DQO, 72-76% para DBO₅, y 67-70% para SST. El efluente final presenta una concentración de DBO₅ de 20 g/m³; y es descargado en el Río del mismo nombre, Río Frío.

Los lodos descargados de los reactores son sometidos a secado a través de Lecho de Secado de lodos. El sistema de recolección de gas está compuesto por conductos en PVC y polietileno que termina en una chimenea que hace las veces de quemador [41]

Tabla 11: Características de los reactores UASB en la PTAR Río Frío.

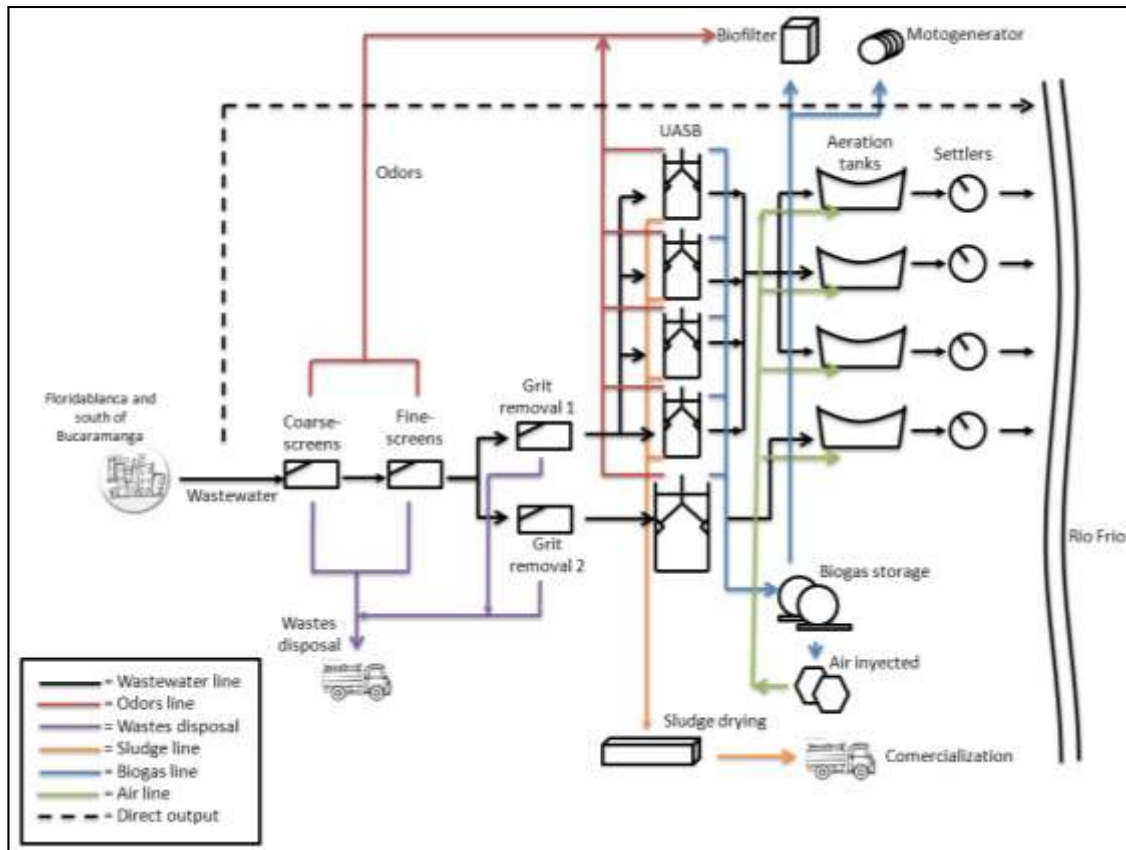
Parámetro	Valor
Profundidad	4.0 m
Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)	5 h
Ángulo de inclinación del separador trifásico.	52°26'
Profundidad del lodo	1,4 m
Módulos por reactor	18 modules
Dimensiones de cada módulo	4,8 m x 2,4 m
Ancho total del reactor	19,20 m
Largo total del reactor	43,20 m
Altura total del reactor	4,6 m
Volumen útil del reactor	3 335 m ³

Fuente: [41].

La Tabla 11 muestra las particularidades de los reactores instalados en la PTAR Río Frío y la figura 18 muestra una representación de este sistema de tratamiento Bucaramanga, Colombia. Con la puesta en marcha de esta exitosa planta se han podido identificar los beneficios en la población aledaña como:

- Eficiencias Superiores al 90% en remoción de carga contaminante.
- Mejor Índice de calidad del agua en la fuente receptora.
- Disminución de olores ofensivos en el área de influencia directa.
- Valorización de los terrenos circundantes y mejora en el entorno urbanístico de Floridablanca y Girón.
- Reducción de Emisión de Gases de Efecto Invernadero.
- Disminución de la presión ambiental y contaminación sobre el Río Frío y otras cuencas.
- Mejora paisajística del entorno sobre la rivera del río.
- Recuperación de la Fauna acuática.

La tabla 12 muestra las principales diferencias entre los tres tipos de sistemas mostrados:



Legenda:

- Wastewater: Agua residual
 Coarse screens: Rejilla gruesa
 Fine screens: Rejilla fina
 Odors: Olores
 Grit removal: Desarenador
 Wastes disposal: Disposición de residuos
 UASB: Reactor de lecho fluidizado de flujo ascendente
 Biofilter: Biofiltro
 Sludge drying: Secado de lodos
 Aeration tanks: Tanques de aereación
 Morogenerator: Motogenerador
 Settlers: Sedimentadores
 Biogas storage: Almacenamiento de gas
 Air injected: Inyectores de aire
 Comercialization: Comercialización.

Figura 18: Esquema de tratamiento de aguas residuales de la PTAR Río Frío, Bucaramanga Colombia.

Fuente: Adaptado de [40]

Se puede concluir que existen notables diferencias entre los 3 tipos de tratamiento para aguas residuales provenientes de origen doméstico mostrado, lo que nos lleva a señalar que en la Planta de tratamiento de San José de Chiclayo no se hace uso de tecnología sofisticada.

Tabla 12: Principales diferencias entre PTAR San José, Rio Frio y Novi Ligure.

Tipo de tratamiento	Chiclayo, Perú	Bucaramanga, Colombia	Novi Ligure (AL), Italia
Preliminar	Cribado grueso	Cribado grueso Cribado fino Desarenador	Cribado grueso Cribado fino Desarenador
Primario	Ninguno	Reactores UASB	Sedimentación primaria
Secundario	Lagunas anaeróbicas y facultativas	Lagunas facultativas Tanque de aireación	Lodos activados Sedimentación secundaria.
Terciario	Sin tratamiento	Sin tratamiento	Desinfección
Reutilización	Agricultura	Agricultura e irrigación	Aplicaciones Industriales.
Descarga del efluente final	En el mar	En el Rio Frio	En el Río Gazzo
Tratamiento de lodos	Sin tratamiento	Lecho de secado de Lodos	Digestión anaeróbica Deshidratación mecánica
Disposición final del lodo	Enterrado	Relleno sanitario Compostaje	Compostaje
Tratamiento de gases	Sin tratamiento	Combustión	Combustión

Cabe mencionar que el entorno económico y cultural en muchos países en vías de desarrollo es una barrera para alcanzar los objetivos básicos en el tratamiento de aguas residuales, la falta de apoyo e inversión de los gobiernos locales y regionales son detalles importantes en el contexto peruano. A menudo, las plantas de tratamiento de aguas residuales no tienen instrumentos adecuados y los equipos para un eficiente trabajo. Por otra parte, hay políticas y problemas de gestión que impiden el acceso a la información.

La aplicación de procesos alternativos de tratamiento es lentos debido a que, a pesar de la existencia de regulaciones para el control y prevención de la contaminación del agua, no hay una regulación al 100% por parte de las autoridades; hay poca difusión a cerca de las ventajas del uso de procesos anaeróbicos, y hay bajo interés por el uso de alternativas tecnológicas debido a la influencia internacional sobre las aplicaciones de los procesos convencionales.

4.1.3. CAUSA 3: No se descargan los lodos almacenados en las Lagunas.

La Planta de tratamiento de San José, tiene su administración en La Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento de Lambayeque (EPSEL S.A.). En recientes monitoreo, los funcionarios han confirmado que en las lagunas se requieren trabajos de mantenimiento y sobre todo de descolmatación de los lodos, en razón que desde hace diecisiete años no se limpian.

Las lagunas de San José tienen aproximadamente 130 mil metros cúbicos de sedimento de materia orgánica en su interior. Esto hace que el objetivo principal no se cumpla ya que, debido a la altura del lodo, no se ejerce la función anaeróbica de la laguna, lo cual hace predecir también que sus condiciones empeorarán. Según los funcionarios se requiere una inversión de ocho millones de soles para dar mantenimiento y descolmatar a la PTAR San José [42].

Considerando una tasa de acumulación de lodo de 0.03 ml/L/hr, en una ambiente de temperaturas comprendidas entre los 21°C y 25°C; para un de 20,130 m² y una población servida de 65 942 hab, en un año se acumularían 1 978,25 m³/año; lo cual se traduce que el lodo sedimentado incrementa su espesor 0,10 m por año; en 12 años el lodo habrá alcanzado 1/3 de la profundidad de la laguna. Así y según la normativa vigente, las lagunas deberían descolmatarse cada 12 años. Considerando los más de 20 años de operación de las lagunas sin descolmatación el lodo ha alcanzado aproximadamente 2 mt de espesor. Según la Norma OS090 [43], el volumen de lodos acumulado no puede superar el 50% del tirante de la laguna, equivalente a una profundidad de 1,17 m. Según

esta hipótesis, la laguna no es eficiente y la reducción en la remoción de los contaminantes es cada vez mayor.

Sin embargo, es oportuno mencionar que la producción de lodo y su posterior disposición no están siendo documentados.

Las lagunas de estabilización ocupan un espacio de 45 Ha; empero, el terreno es de 125 ha, lo que significa que hay un área disponible para tratamiento y disposición final del lodo.

4.1.4. CAUSA 4: No se aplican métodos de valorización del lodo.

Según la Autoridad Nacional del Agua [44] y Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento [30], la tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas deben prever 5 fases: pre-tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento avanzado y tratamiento de lodos.

- El tratamiento preliminar o pre-tratamiento son las operaciones que preparan a las aguas residuales para el posterior tratamiento, es decir, la remoción de sólidos de mayor tamaño, flotantes y arenas.
- El tratamiento primario prevé la reducción de una importante cantidad de materia en suspensión, pero no reduce la materia coloidal disuelta, es decir permite remover sólidos sedimentables.
- Con el tratamiento secundario, se logra la remoción de materia orgánica biodegradable y sólidos en suspensión, es decir se pueden reducir DBO_5 y sólidos suspendidos solubles.
- El tratamiento físico-químico, biológico o avanzado es el tratamiento que permite alcanzar un nivel superior de reducción de materia orgánica e inorgánica compleja, así como sólidos disueltos, pero también nutrientes.
- Tratamiento de lodos: El lodo puede ser estabilizado por diversos métodos como: estabilización, deshidratación, entre otros, para su posterior disposición final.

Según la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones para el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales y disposiciones de la SUNASS, la tecnología adecuada a implementar para el caso de lagunas de estabilización y tratamientos biológicos se muestran en las figuras 19 y 20:

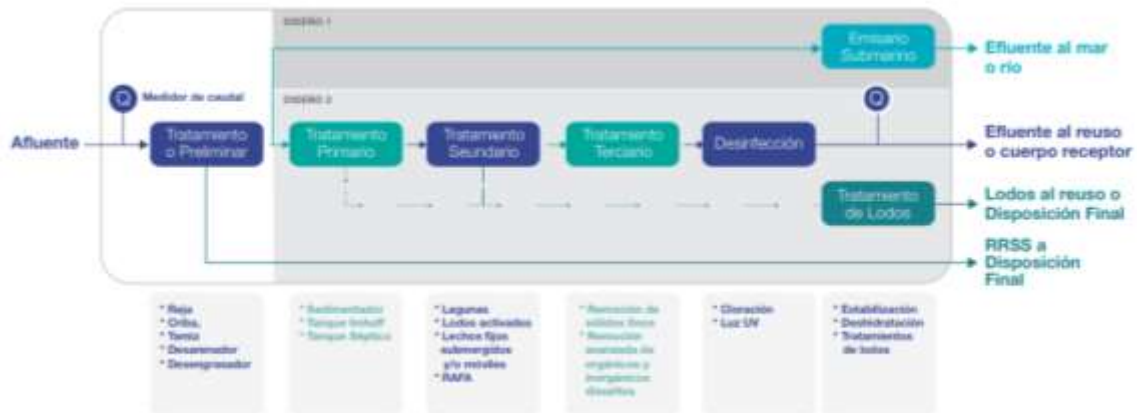


Figura 19: Esquema de una PTAR de aguas residuales domésticas.

Fuente: [30]

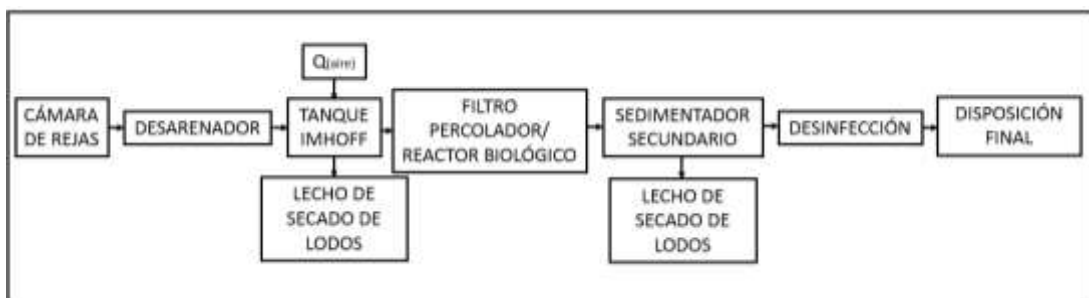


Figura 20: Tecnología de tratamiento de aguas residuales domésticas con filtros percoladores o reactores biológicos.

Fuente: [45]

Según el último Diagnóstico de las PTAR en el Perú realizado por la Superintendencia Nacional de Servicios y Saneamiento - SUNASS, la planta de tratamiento de San José, cuenta únicamente con tratamiento preliminar de rejas y tratamiento secundario con lagunas anaeróbicas y facultativas, los lodos son estabilizados dentro de la laguna [33]. Sin embargo, y en razón que en la PTAR San José, las lagunas de estabilización no han

sido descolmatadas en 17 años, los lodos residuales permanecen en el fondo de la laguna reduciendo la eficiencia de operación en el tratamiento eficaz de las aguas residuales.

El lodo producido y extraído en las lagunas de estabilización presenta una consistencia líquida o líquida semisólida con elevado contenido en sólidos entre el 0,25 - 12% en peso. Esta fracción sólida, que se debe evacuar, está compuesta principalmente de materia orgánica [8]. Para facilitar el manejo de los lodos y su disposición final, es necesario aplicar previamente algún proceso de deshidratación.

La disposición final más adecuada debe ser en un relleno de seguridad; en el Perú, existen únicamente dos rellenos de seguridad uno en Lima y otro en Chincha. Otras formas de disposición puede ser su entierro en botaderos, incineración, acumulación en los terrenos de la PTAR, o entrega directa a los campesinos.

Así como para los efluentes residuales, los procesos para el tratamiento de lodos tienen como objetivo principal reducir la presencia de patógenos, los olores desagradables, y su potencial de putrefacción hasta valores que no provoquen problemas sanitarios en su posterior reutilización. Los métodos más eficaces para lograr estos objetivos son la reducción biológica del contenido de materia volátil, la oxidación química de la materia volátil, la adición de agentes químicos para obtener un lodo inocuo y la aplicación de calor con el objetivo de desinfectar el lodo. Las técnicas típicas son: la digestión anaerobia, aerobia, y el compostaje.

Considerando la aplicación de calor al lodo, existen otras técnicas más avanzadas que tienen por objetivo, no sólo la desinfección, sino también su valorización energética, esto significa obtener una fuente renovable de energía para aplicaciones energéticas con reducción de gases efecto invernadero. Las técnicas más usadas para lograr estos objetivos son: la combustión, pirolisis o gasificación [46].

Aun así, y debido al elevado contenido de agua, para una efectiva aplicación, es necesario un exhaustivo proceso de deshidratación y secado como pre-tratamiento [47].

Estudios previos han demostrado que, aunque, el PCI del lodo puede ser bajo en comparación con otras materias primas: entre 2 - 7 MJ/Nm³ [48], [49], [50]; el gas presenta capacidad para obtener una cantidad de energía considerable y atractiva a potenciales consumidores [46], de allí que surge la necesidad de investigar su uso con agregados de otra biomasa residual y su impacto en el desarrollo de la Provincia de Chiclayo.

La figura 21 muestra una propuesta para la valorización de lodos con fines energéticos, a través de deshidratación y posterior incineración para la generación de energía.

4.1.5. CAUSA 5: Eliminación inadecuada al medio ambiente.

El vertimiento de aguas contaminadas está provocando un impacto negativo al ecosistema. Sobre todo, siendo una localidad marino costera, el litoral lambayecano está siendo destruido por el vertimiento incontrolado y no sancionado de estas aguas residuales y de otros drenes de la región.

Las autoridades regionales han constatado el alto riesgo sanitario al que se expone a la población debido al vertimiento de las aguas no tratadas o que siguen un tratamiento deficiente y desembocan en el mar.

El litoral marino costero Lambayecano, viene siendo afectado no sólo por la desembocadura de los efluentes de la PTAR de San José en el mar, sino también por otras fuentes de contaminación como: el vertimiento de las aguas residuales de la laguna de oxidación del distrito de Santa Rosa al Dren 4000, el mismo que desemboca en el mar del mismo distrito; las aguas contaminantes que se desechan del terminal pesquero ECOMPHISA van de manera directa a la zona marino costera, afectando el hábitat de los peces; al Dren 1000, ubicado en la provincia de Lambayeque, se vierten sin consideración alguna aguas servidas de los camiones cisterna.

Con el mar contaminado, las especies marinas son capturadas por pescadores artesanales, y se ponen a la venta para el consumo humano afectando la salud de la población.

Son seis los drenes que desembocan en el mar, provocando daños irreversibles en el ecosistema. El mar lambayecano es afectado por la desembocadura de los drenes del distrito de San José, Santa Rosa, Monsefú, Pimentel, Mórrope y Lambayeque [34].

Un resumen de los impactos negativos al litoral lambayecano, por la eliminación inadecuada de efluentes al medio ambiente se muestra en la Tabla 13. Mientras que la Tabla 14 muestra un resumen de la etapa de diagnóstico.

Tabla 13: Impactos ambientales de la ineficiente operatividad de la PTAR San José.

Variable Ambiental	Impacto
Biológica	Transformación de hábitats. Amenaza a especies marinas y otras de fauna local.
Agua	Efluente no apto para irrigación y uso en agricultura. Contaminación del agua de mar. Contaminación de aguas subterráneas.
Aire, atmósfera y clima	Emisión de gases efecto invernadero Incremento del nivel del mar y temperatura atmosférica. Emisión de olores nauseabundos
Suelo	Filtración de aguas residuales en el suelo Contaminación del suelo.
Social	Enfermedades diarreicas agudas. Enfermedades pulmonares y dermatológicas. Alergias Perturbación de las actividades humanas
Económico	No representa una fuente de generación de empleo No hay financiamiento para nuevos proyectos La población aledaña no cuenta con servicios básicos No existen programas de desarrollo No hay planes de contingencia en caso de desastres naturales o incremento del flujo de agua a tratar.
Cultural	Débil política ambiental Débil cultura ambiental Falta de monitoreo y control por parte de las autoridades.

Tabla 14: Impactos ambientales de la ineficiente operatividad de la PTAR San José.

Causa	Descripción	Evidencia
1. Métodos ineficientes de tratamiento de efluentes.	Actual sistema de tratamiento de aguas residuales en PTAR San José es deficiente	El efluente final no cumple los LMP, y no es apto para su reutilización según los ECA del agua.
2. No uso de Tecnología sofisticada.	El tratamiento comprende sólo tratamiento preliminar y primario.	Cribado, lagunas facultativas, descarga para agricultura y al mar.
3. Usos inadecuados del lodo que deterioran el medio.	Las lagunas no son descolmatadas y tienen sedimento acumulado de hace 17 años.	No se documenta la producción y calidad del lodo.
4. No se aplican métodos de valorización del lodo.	La acumulación de lodos reduce la eficiencia de operación del sistema.	Los lodos tienen potencial de valorización energética.
5. Eliminación inadecuada al medio ambiente.	El mar Lambayecano es afectado por la desembocadura de 6 drenes.	El vertimiento de aguas contaminadas está provocando un impacto negativo al ecosistema.

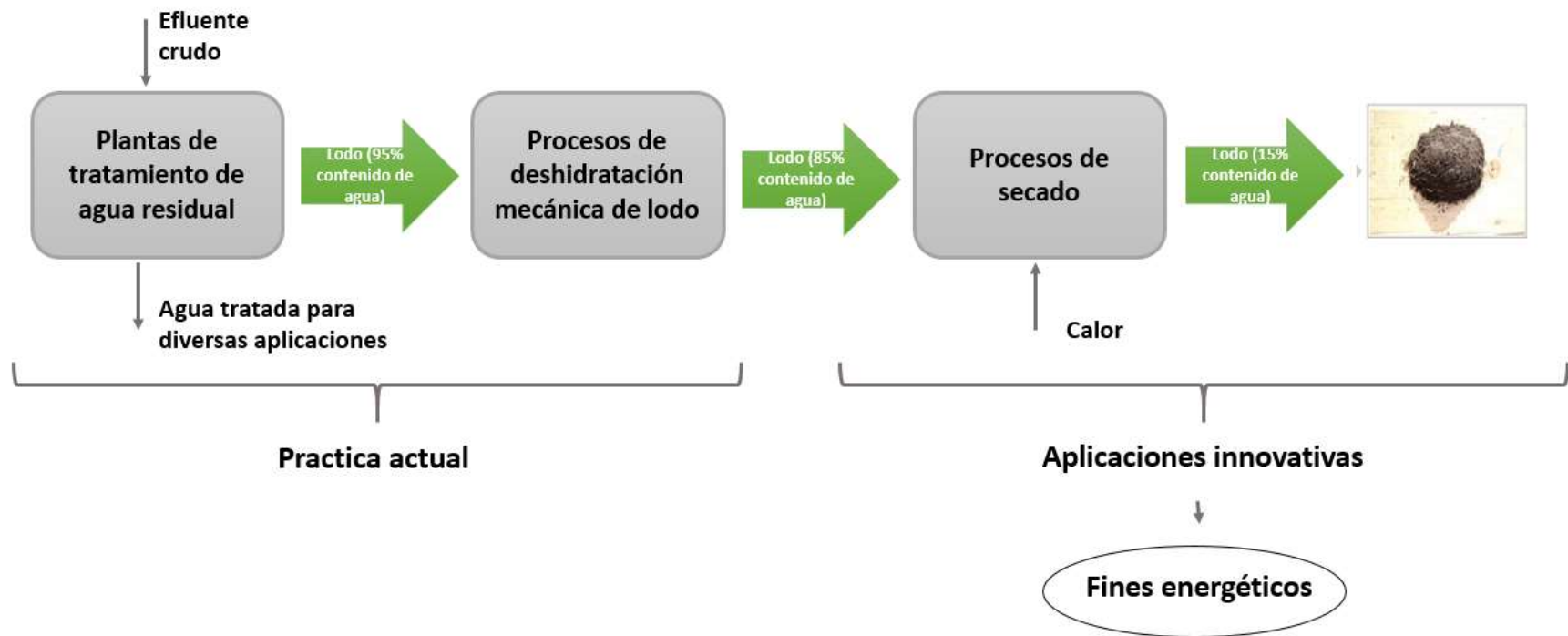


Figura 21: Propuesta de valorización de lodo proveniente de plantas de tratamiento de agua residual.

Fuente: [49]

4.2. Desarrollo

4.2.1. Causa 1: ÁREA – Tecnología – No uso de tecnología sofisticada.

Fase de la metodología: Tratamiento del agua residual

Desarrollo:

En [51] se analizó la problemática del deficiente tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Chiclayo, y se determinó que el actual ciclo de tratamiento puede ser modificado para incluir una sección de tratamiento biológico, con reactores de tipo UASB en lugar de lagunas anaeróbicas, los resultados mostraron que con esta nueva configuración de la planta se lograrán mejores eficiencias de remoción de Coliformes Fecales y DBO en modo de alcanzar los Estándares de Calidad Ambiental del Agua.

A continuación, se describen las etapas del tratamiento propuesto para los efluentes de la Planta de Tratamiento de aguas residuales de San José.

A) Tratamiento del agua:

- Canal de ingreso: Se propone un canal a tajo abierto de sección rectangular y adecuada pendiente (0,002 m/m) que permite el flujo de un caudal de agua de aproximadamente 0,79 m³/s. Normalmente el color característico del agua es gris, pero cuando el caudal es menor al esperado puede tornarse rosácea y cuando el caudal es mayor puede presentar manchas blancas. Lo primero se debe a las condiciones aeróbicas que desarrollo al tener poca profundidad, y lo segundo a la alta concentración de DBO₅.
- Rejilla gruesa: Dos unidades de barras gruesas pueden ser dispuestas en paralelo en el canal de ingreso del agua, que permiten la retención de sólidos con un tamaño mayor a 6,35 cm. El diámetro de cada barra es de 2,54 cm. Estas unidades se activan

automáticamente al detectar un cierto volumen de sólidos retenidos. Adicionalmente, se mantienen las dos unidades electromagnéticas.

- **Rejilla fina:** El tratamiento preliminar será completado por dos unidades de barras finas que garantizan una considerable reducción de la cantidad de sólidos presentes en el agua cruda. Estas dispuestas en serie una luego de cada unidad de barra gruesa. La distancia entre las barras es de 12mm y el diámetro de la barra es de 6mm.
- **Desarenador y removedor de grasas:** Para finalizar el tratamiento preliminar se debe instalar un desarenador y removedor de grasas de sección rectangular y diseño simple para reducir los costos y las pérdidas de carga, así como evitar la demanda de inyección de aire y reducir el consumo energético. La arena removida de esta etapa con los sólidos obtenidos en las barras será dispuesta en un relleno sanitario en cercanía a la planta.
- **Medidor de Caudales Parshall:** A través de esta sección más estrecha del canal se podrá medir el flujo de agua que llega a los reactores UASB.
- **Sistema de distribución del afluente:** El afluente será introducido en los reactores a través de un adecuado sistema de distribución en el fondo del reactor. El contacto inicial con el inóculo de lodo en el reactor UASB es esencial [52]. Se debe evitar la formación de zonas muertas en el interior del reactor, en modo de garantizar una adecuada digestión de la materia orgánica y formación del gas.
- **Reactores UASB,** 5 reactores UASB de 18 módulos cada uno dispuestos en dos columnas, serán instalados en lugar de las lagunas anaeróbicas. El agua ingresa por el fondo del reactor y se descarga por la parte superior a través de un separador trifásico (Gas, sólido, y líquido). El gas es recuperado por una campana colectora de gas, el agua es llevado a las lagunas facultativas y los sólidos tienden a sedimentar al fondo del reactor, formando una cama de lodos que vendrá descargada en un tiempo no mayor a 48 horas.

- **Lagunas de estabilización:** Se requiere un post-tratamiento a los efluentes del reactor, ya que este diseño es eficiente para la remoción de DBO y DQO, pero tiene un bajo efecto en la concentración de macronutrientes como nitrógeno y fósforo y en la remoción de Coliformes fecales. Esto implica una remoción adicional de DBO y Coliformes Fecales, para ello la mejor alternativa la representan las lagunas facultativas aeróbicas. Lográndose de este modo eficiencias de remoción mayores al 90% para DBO y 99% para Coliformes Fecales.
- **Canal de salida:** La calidad del agua obtenida con esta propuesta permite su posterior utilización en usos como agricultura, riego y descarga a los cuerpos de agua (mar). Una compuerta de salida controla el flujo de agua.

B) Tratamiento del gas:

Estudios han demostrado que el gas obtenido puede tener un elevado Poder Calorífico alrededor de 18-27 MJ/m³ [52]. El gas debe ser tratado antes de uso en motores de combustión para evitar la corrosión debido a la presencia de H₂S. La energía generada puede ser utilizada para el abastecimiento energético de la planta y el exceso en la red eléctrica interconectada nacional.

El gas obtenido de los reactores UASB, también llamado Biogás, tiene generalmente la siguiente composición:

Tabla 15: Composición del Biogás.

Parámetro	Porcentaje de composición
CH ₄	50 – 75%
CO ₂	25 – 40%
H ₂	1,0 – 3,0 %
N ₂	0,25 – 2,5%
O ₂	0,1 – 1,0%
H ₂ S	0,1 – 0,5 %
NH ₃	0,1 – 0,2%
CO	0,1 – 0,2 %
H ₂ O (Vapor de agua)	0,1 – 0,2%

Fuente: [53]

Las etapas para el tratamiento del gas comprenden: almacenamiento, desulfuración y combustión.

C) Tratamiento del lodo:

Como anteriormente mencionado, el lodo representa una fuente importante para futuras aplicaciones con fines energéticos. El lodo residual proveniente de la aplicación de este tipo de tecnologías presenta un elevado contenido de materia orgánica y nutrientes, esto lo hace atractivo en su aplicación como biofertilizante para incrementar la productividad de los campos agrícolas. Otros usos son en aplicaciones energéticas debido a su moderado - alto contenido energético [47].

Para poder recuperar el lodo de los reactores UASB y aplicarlos posteriormente con fines energéticos, se deben seguir las siguientes etapas de tratamiento:

- Descarga del lodo: El diseño del reactor comprende un grupo de válvulas y tuberías que permiten la descarga de los lodos presentes en el reactor. Estas tuberías están instaladas según la altura de la cama de lodos que se proyecta tendrá cada módulo del reactor, esto permite también el monitoreo constante del crecimiento y la calidad de la biomasa (lodo sedimentado presente en el reactor). La descarga es periódica según los tiempos establecidos de operatividad [54].
- Lecho de secado de lodos: El lodo puede ser secado por deshidratación natural y evaporación. Con este proceso se pueden alcanzar altos niveles de sequedad con cero consumos energéticos, sin embargo, es importante controlar los olores desprendidos del lodo porque son una fuente de proliferación de insectos, especialmente por las poblaciones cercanas a la planta y por estar cerca de una carretera de mediano tránsito. Adicionalmente, el periodo de secado puede tardar muchos días.
- Utilización del lodo: se ha comprobado que el lodo seco tiene múltiples aplicaciones. En los países industrializados el lodo viene siendo empleado principalmente en agricultura. Económicamente, el lodo representa un ahorro

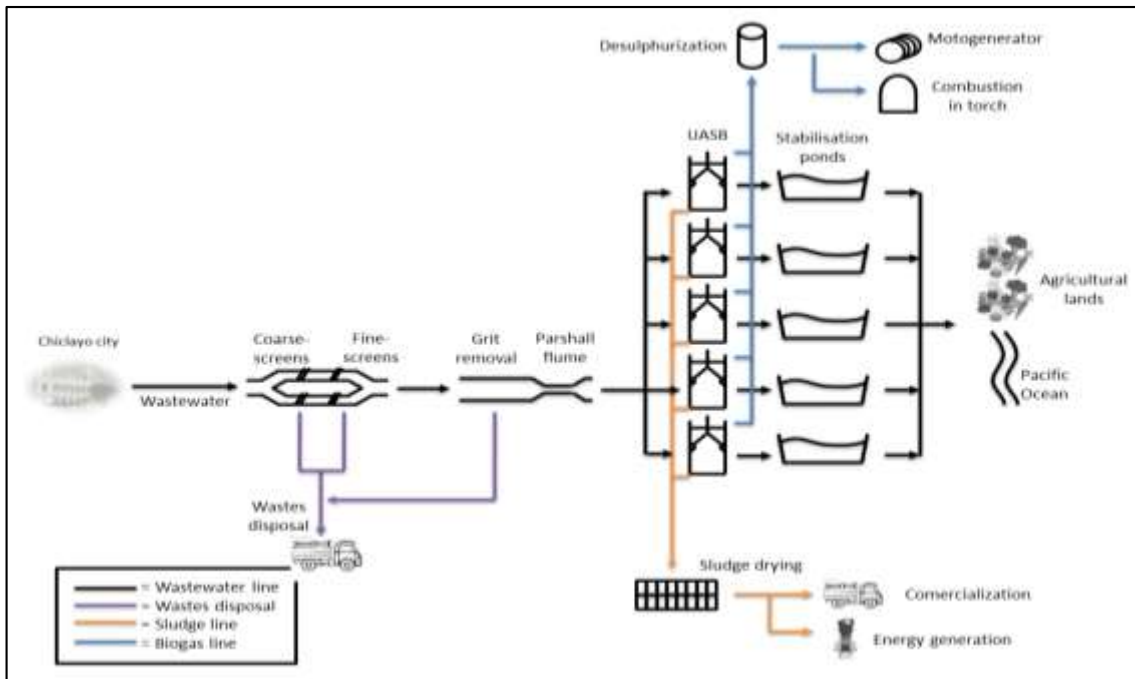
porque reduce la utilización de fertilizantes convencionales sin afectar la calidad y la productividad de los sembríos. La conversión energética del lodo seco puede darse a través de procesos como la gasificación, además de otras ventajas representativas como la completa esterilización del lodo y una reducción significativa del volumen para su disposición final.

La figura 22 muestra el esquema de tratamiento de aguas residuales con recuperación de biogás y lodo propuesto en [51]. La figura 23 muestra las secciones del reactor UASB.

La eficiencia del sistema viene dada por las eficiencias de remoción de los contaminantes (DBO, DQO y Coliformes fecales) en el reactor, así como en las lagunas facultativas. Debido a la falta de información, resulta complicado medir la eficiencia de remoción de SST. Según la International Water Association (IWA), la remoción de DBO, DQO y Coliformes Fecales es fuertemente afectada por el tiempo de retención hidráulico del sistema, se pueden alcanzar rangos de 40 a 75% para DQO y de 35 a 80% para DBO₅ [54].

Para la nueva PTAR San José, se pueden obtener eficiencias de remoción de 63,7% para DBO, 71,4% para DQO y 89,7% para Coliformes Fecales con un HRT de 6 h. Las concentraciones de estos contaminantes en el efluente del reactor fueron de 64,87 mg/l de DBO, 123,68 mg/l de DQO y $6,25 \times 10^6$ de Coliformes fecales. (El anexo 1 muestra las fórmulas empleadas para el cálculo de las eficiencias de remoción).

Sin embargo, la eficiencia total del sistema viene dada por una remoción adicional de los contaminantes en las lagunas de estabilización. Las diversas experiencias latinoamericanas han demostrado que las lagunas de estabilización con una buena opción de post-tratamiento a reactor anaeróbicos, pues contribuyen a reducir sustancialmente los componentes patógenos, controlar los olores y baja acumulación del lodo.

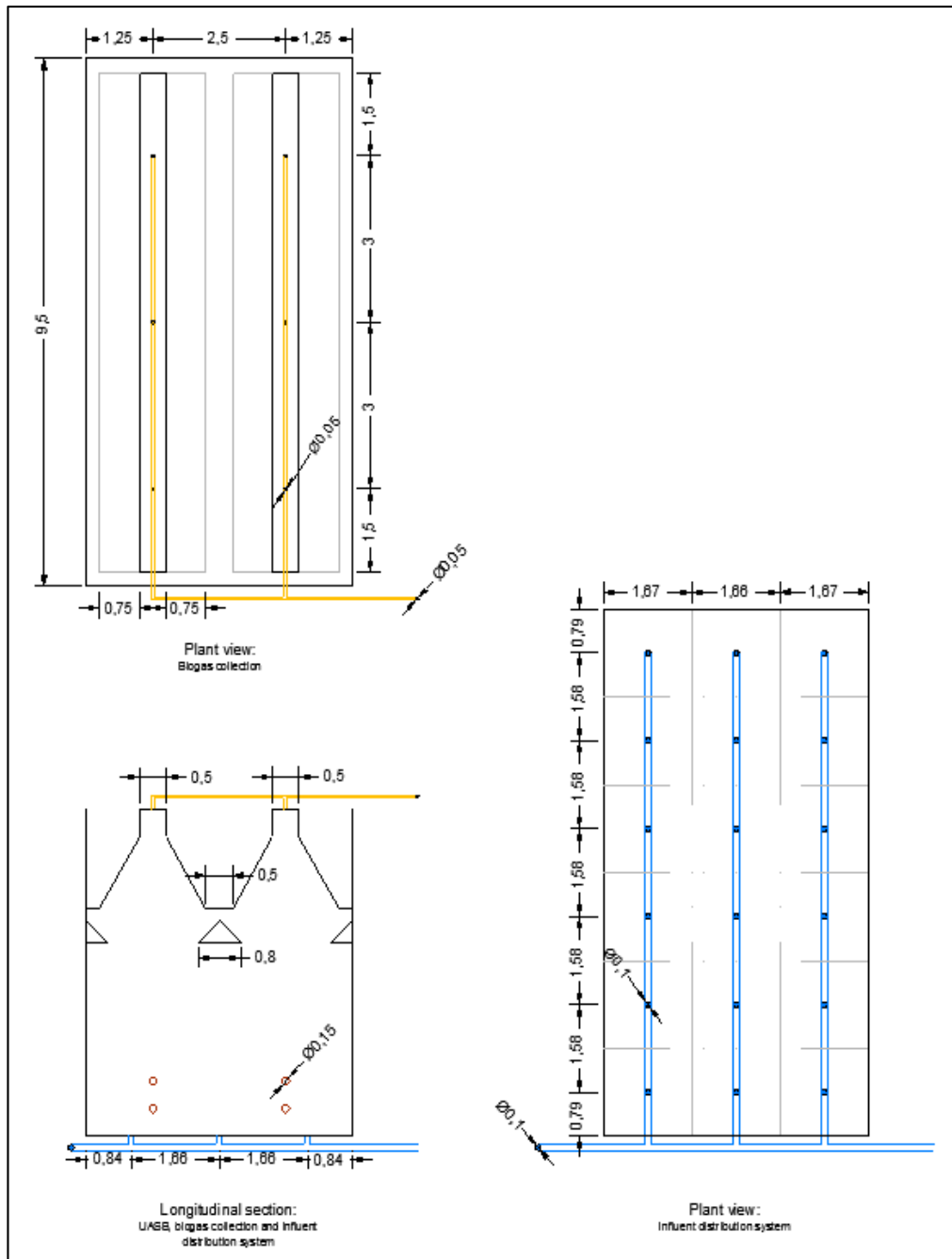


Leyenda:

- Wastewater: Agua residual
- Coarse screens: Rejilla gruesa
- Fine screens: Rejilla fina
- Grit removal: Desarenador
- Wastes disposal: Disposición de residuos
- Parshall Flume: Medidor Parshall
- UASB: Reactor de lecho fluidizado de flujo ascendente
- Stabilization ponds: Lagunas de estabilización
- Sludge drying: Secado de lodos
- Desulphurization: Desulfurización
- Motogenerator: Motogenerador
- Combustion in torch: Combustión del gas
- Comercialization: Comercialización.
- Energy generation: Generación de energía
- Agricultural land: Aplicaciones agrícolas
- Pacific Ocean: Descarga al océano pacífico.
- Wastewater line: Línea de agua residual
- Waste disposal: Disposición de residuos.
- Sludge line: Línea de lodo
- Biogas line: Línea de biogás

Figura 22: Esquema de tratamiento propuesto para el tratamiento de aguas residuales de la PTAR San José de Chiclayo.

Fuente: [51]



Leyenda:

Plant view, biogás collection: Vista de planta, recolección del gas

Longitudinal section, UASB, biogás collection and influent distribution system:

Sección longitudinal: RAFA, recolección de gas y sistema de distribución del agua.

Plant view: Influent distribution system: Vista de planta, sistema de distribución del agua.

Figura 23: Sistema de distribución del afluente, campana colectora de gas y descarga de lodos del reactor UASB.

Fuente: [51]

Según [51] en las lagunas de estabilización, se logran concentraciones finales de 20,14 mg/l de DBO y 4,9E+04 NMP/100ml de Coliformes fecales; esto significa una remoción adicional de 69% and 99% respectivamente. Así, es posible alcanzar eficiencias de remoción de 91% para DBO₅ y 99,9% para Coliformes fecales (el anexo 2 muestra los criterios utilizados para el dimensionamiento del sistema).

Comparando con las eficiencias de remoción actuales, podemos deducir que se ha conseguido el objetivo planteado en punto 3.2.1.

Las figuras 24 y 25 muestran la efectividad de remoción de los principales contaminantes con la puesta en marcha de esta propuesta:

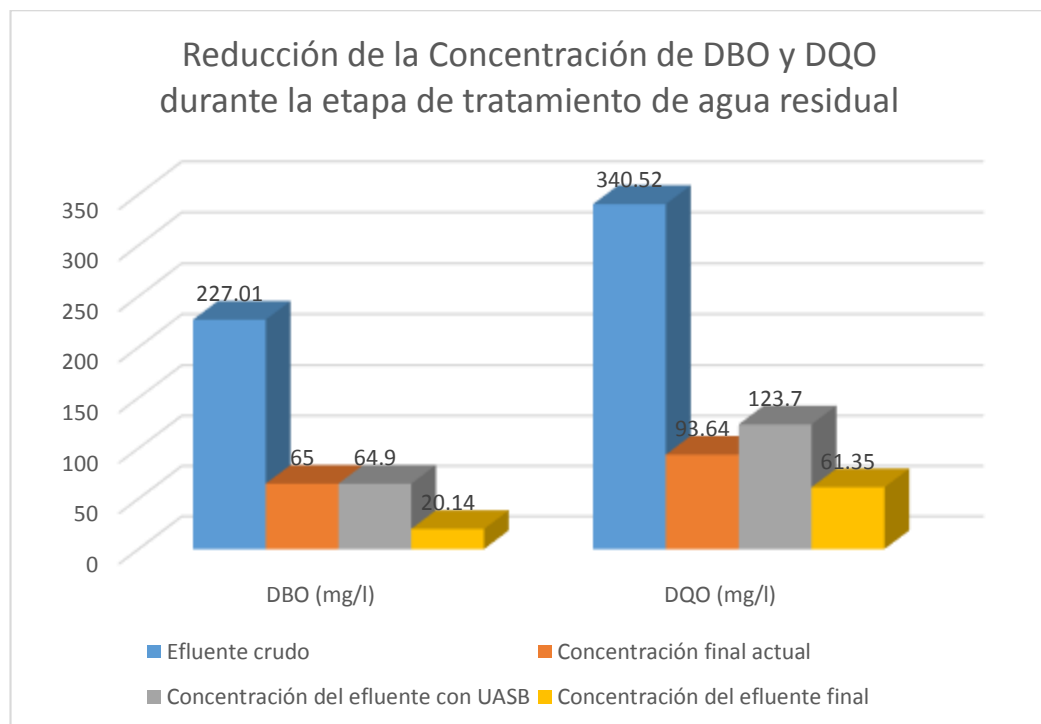


Figura 24: Comparación de la concentración de DBO y DQO en el efluente tratado por cada una de etapas del sistema de tratamiento propuesto y el actual proceso.

Se ha demostrado a través de esta propuesta que los efluentes finales tienen características apropiadas para su reutilización en fines como disposición en el mar, agricultura, y

tratamientos posteriores para usos no domésticos; ya que cumplen las exigencias de las leyes peruanas en cuanto a LMP y ECA del agua.

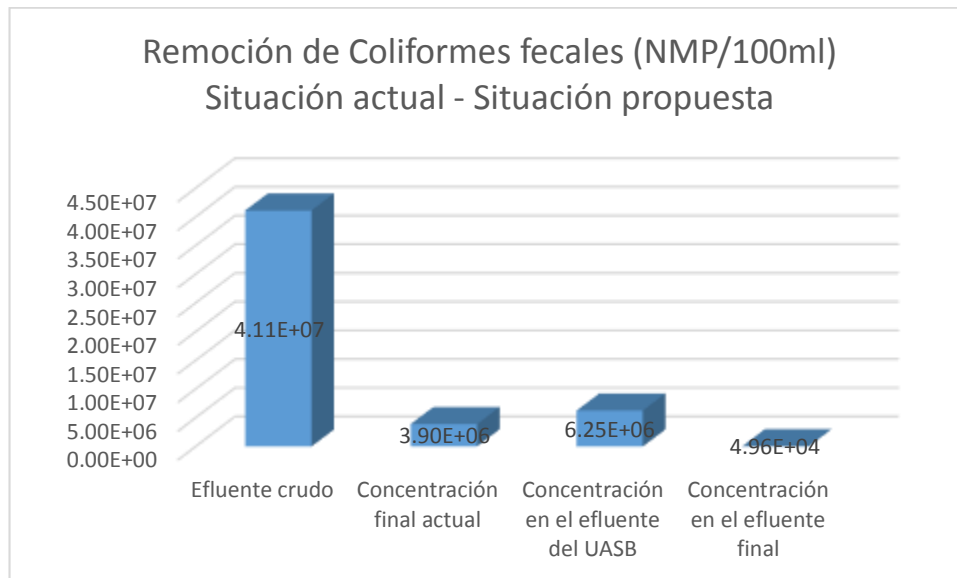


Figura 25: Comparación de la concentración de Coliformes Fecales en el efluente tratado por cada una de etapas del sistema de tratamiento propuesto y el actual proceso.

Fase de la metodología: Obtención y secado de lodo

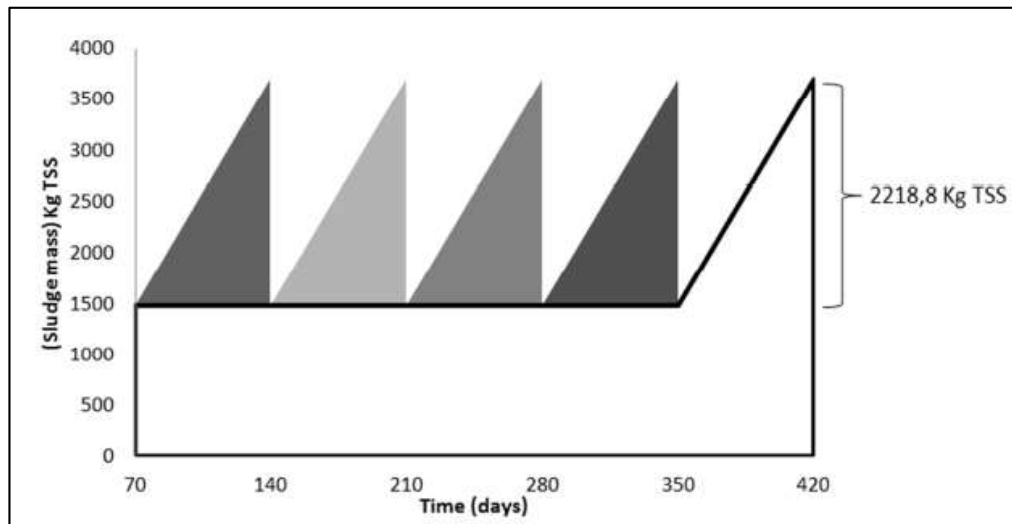
Desarrollo:

La producción del lodo se lleva a cabo en el primer tercio de sección del reactor, es decir 1/3 de la zona de digestión del reactor corresponde al llamado manto o cama de lodos [37]. Si el volumen total de un módulo del reactor es de $158,5 \text{ m}^3$, entonces el volumen de lodo es de $52,8 \text{ m}^3$, lo que equivale a que por cada módulo del reactor se producen $38,86 \text{ kgTSS/d}$, en todo el sistema de reactores se alcanza entonces una producción de $3697,9 \text{ kgTSS/d}$.

Se ha estimado un periodo de descarga del lodo cada 70 días. Se sabe que no debe ser descargado la cantidad del lodo en su totalidad, sino únicamente el 60%, puesto que el 40% restante en el interior asegura un correcto performance para la digestión anaeróbica

del reactor. Por tanto, la descarga total del lodo cada 70 días es equivalente a 155 274 kg SST.

La figura 26 muestra un esquema de la producción de lodos.



Leyenda:

Sludge mass (Kg TSS): Masa de lodo (kg SST)

Time (days): Tiempo (días)

Figura 26: Esquema representativo de la producción de lodo y la fracción diaria a descargar.

Fuente: [51]

La extracción del lodo se lleva a cabo por las válvulas de desfogue de lodo instaladas a lo largo del manto de lodos del reactor que posee una altura de 1,11 m.

Para la descarga del lodo se debe utilizar una retroexcavadora para trasladar el lodo del punto de desfogue al lecho de secado de lodos. Una vez secos, nuevamente haciendo uso de maquinaria se traslada al punto de valorización para su posterior uso.

Deshidratación del lodo

El lodo obtenido de los reactores UASB tal cual sólo contiene alrededor del 3 al 5% de materia seca. Su disposición final bajo cualquier óptica debe considerar la mayor reducción de su contenido de agua. Para [55] “las técnicas de deshidratación mecánica, filtros - prensa, filtros - banda o centrífugas, permiten alcanzar contenidos en materia seca (o sequedad) del 15 al 35%”, pero así el lodo aún tiene apariencia de barro pastoso y no permite una valorización final adecuada y beneficiosa.

Para la Comunidad Europea, la disposición final del lodo solo debe ser como: Valorización agrícola, valorización energética, vertedero o relleno sanitario, para los tipos de lodos que no se puedan tratar con las dos primeras soluciones [55] y [56].

Para conseguir un secado de lodos eficiente, se deben utilizar técnicas de deshidratación mecánica. El secado de lodos utilizando la energía solar es una alternativa viable sólo si se dispone de la superficie de terreno necesaria. El manto de secado de lodos es altamente utilizado en países de clima cálido, como alternativa de bajo costo y bajo consumo energético para el secado de los mismos, además de no requerir químicos adicionales, por otro, sin embargo, se debe controlar los problemas de olores nauseabundos e insectos además de una intensa labor de remoción de los lodos [57].

Un manto de secado de lodos convencional está hecho en capas de arena, grava y ladrillo en el fondo y concreto en las paredes laterales. Tienen forma rectangular como un tanque poco profundo, con una altura no mayor a 50 cm. Consta de un sistema de drenaje de líquido compuesto por tubos perforados en la parte inferior. Los ladrillos son colocados, en forma horizontal y vertical con un espacio de 20 – 30 cm entre ellos, según la figura 27.

El ratio de evaporación depende de muchos factores, sobre todo de las condiciones climáticas, temperatura, humedad, viento, etc.; así como de la concentración de agua en el lodo al momento de su expulsión del reactor. Las condiciones climáticas de Chiclayo son favorables para acelerar el proceso de secado.

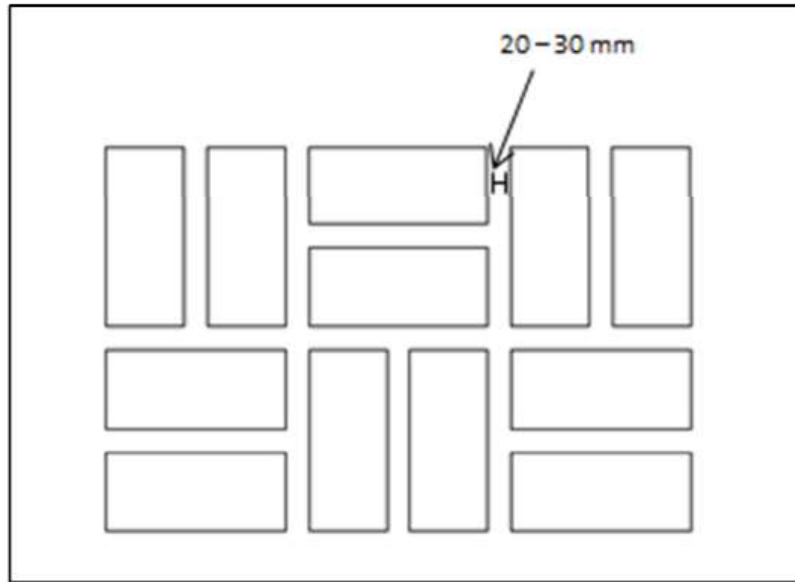


Figura 27: Detalle de la disposición de los ladrillos en el lecho de secado de lodos.

Para el secado con lecho de lodos, la cantidad de lodo obtenido se requiere un área total disponible de 3 108,4 m² y la altura del lodo puede alcanzar los 0,25m.

Los lechos de lodos pueden estar abiertos a la atmósfera o cubiertos para protegerlos de la lluvia. En un lecho abierto, el periodo de secado puede ser hasta de 15 días; mientras que en un lecho cerrado acondicionado para incrementar la temperatura hasta en 50°C el periodo de secado se puede reducir a la mitad.

En esta investigación se propone el deshidratado de lodos en lecho bajo forma de invernadero con techos de plásticos traslúcidos, dado su principio de secado consiguiendo bajas temperaturas, simplicidad del proceso y poco costosas en relación a otras técnicas convencionales.

Este tipo de secado es un procedimiento natural y ecológico que permite la optimización del proceso de secado solar aumentando la superficie de intercambio con la atmósfera por volteo y remoción del producto pastoso utilizando la retroexcavadora. El volteo permite que todo el lodo pueda tomar el sol varias veces a lo largo del día, además de su aireación, manteniéndolo en fase aerobia evitando que crezcan las bacterias anaerobias responsables

de la putrefacción y de los malos olores, además de la homogeneización del producto final.

La evaporación del agua es favorecida por el calentamiento del medio gracias a la captura de la radiación térmica por los materiales empleados en la cubierta. Y la ventilación natural permite el intercambio del aire húmedo con el aire seco permitiendo que el agua se siga evaporando.

La figura 28 muestra el principio de funcionamiento del secado.

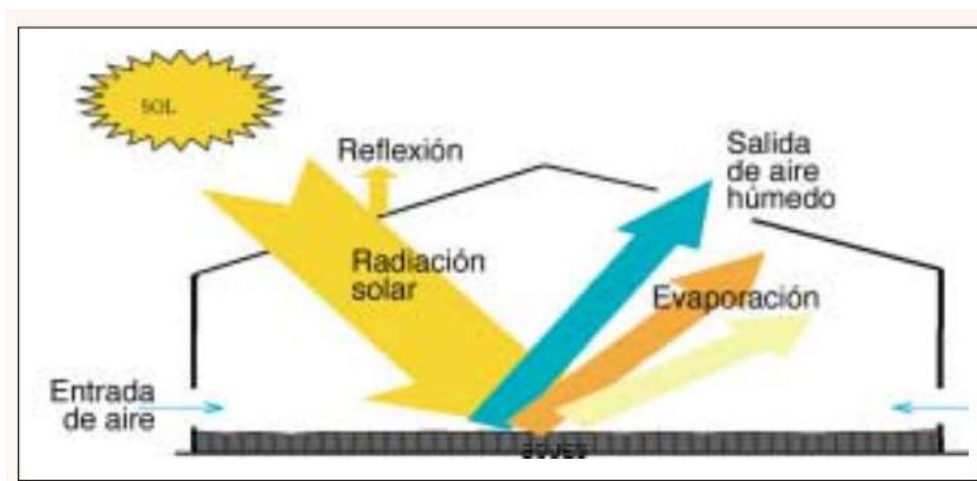


Figura 28: Principio de funcionamiento del sistema de secado solar propuesto.

Fuente: [58].

El producto final es un lodo seco en forma de gránulos de 1 a 4 cm de diámetro, con una sequedad mayor al 75%, es decir un contenido de agua alrededor del 25%. (La figura 30 muestra el aspecto del producto final). Bajo estas condiciones el producto podría ser utilizado como combustible en incineración ya que el poder calorífico inferior (PCI) es similar al de la basura urbana.

Cuando el lodo alcance una sequedad alrededor del 40% es decir 60% de agua, este podría utilizarse en la fabricación del compost para su utilización en agricultura.

Con respecto a la reducción de Coliformes Fecales, según Cota et al, 2008 este tipo de secado es eficiente también para la reducción de las bacterias, según se demostró en una investigación realizada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Ciudad Juárez que en un 95% son de origen domésticas, y que genera un volumen de 135 ton de lodos por día, se verificó la reducción de Coliformes Fecales desde $3,8 \times 10^6$ hasta 1,6 NMP por gramo de lodo seco.

Las imágenes a continuación muestran un modelo de secador solar que se podría instalar, este modelo es desarrollado por la empresa Huber Technology y garantiza un secado continuo y óptimo del lodo durante todo el año, además es económico y el aspecto del producto final.



Figura 29: Modelo de secador solar de lodos SRT.

Fuente: [58].

El secado solar entonces se presenta como una opción técnicamente y económicamente factible para la reducción del volumen del lodo y eliminación de alto contenido de

microorganismos patógenos, lo cual aumenta la posibilidad de su aprovechamiento en usos benéficos como producción agrícola e incineración [58].

Las ventajas de estas instalaciones son:

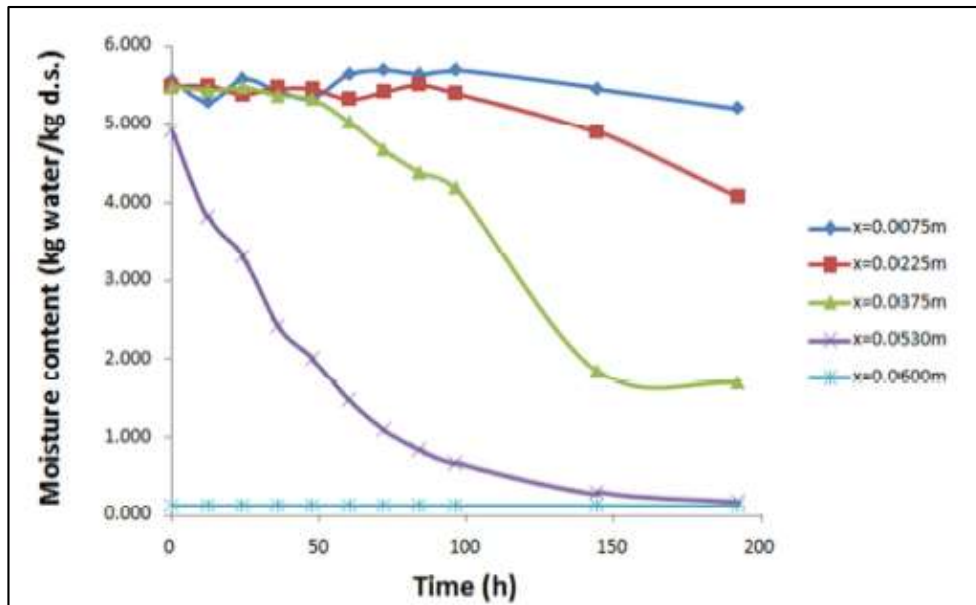
- Tratar los lodos durante todo el año y durante todo el día.
- Crear las condiciones óptimas de secado en todo momento (superficie de intercambio, temperatura y contenido de humedad del aire)
- Si el sistema de volteo del lodo se automatiza, se limita la intervención del personal en la manipulación del lodo (como en el caso de la retroexcavadora). Sólo se usaría la maquinaria para el transporte del lodo el punto de desfogue hasta la entrada del invernadero y desde la salida del invernadero hacia el uso final.
- No necesita adición de reactivos.
- Facilidad de integración paisajística debido al efecto transparente del invernadero y no hay problema de olores olfativos.
- Se pueden alcanzar hasta 90% de sequedad.



Figura 30: Aspecto del lodo seco

Fuente: [58].

En [59], se comprueba experimentalmente la reducción del contenido de humedad del lodo en situaciones similares, observándose que se pueden alcanzar altos porcentajes de sequedad (75%) en cortos tiempos.



Leyenda:

Moisture content (kg water/kg d.s.): Contenido de humedad (Kg agua/Kg materia seca)

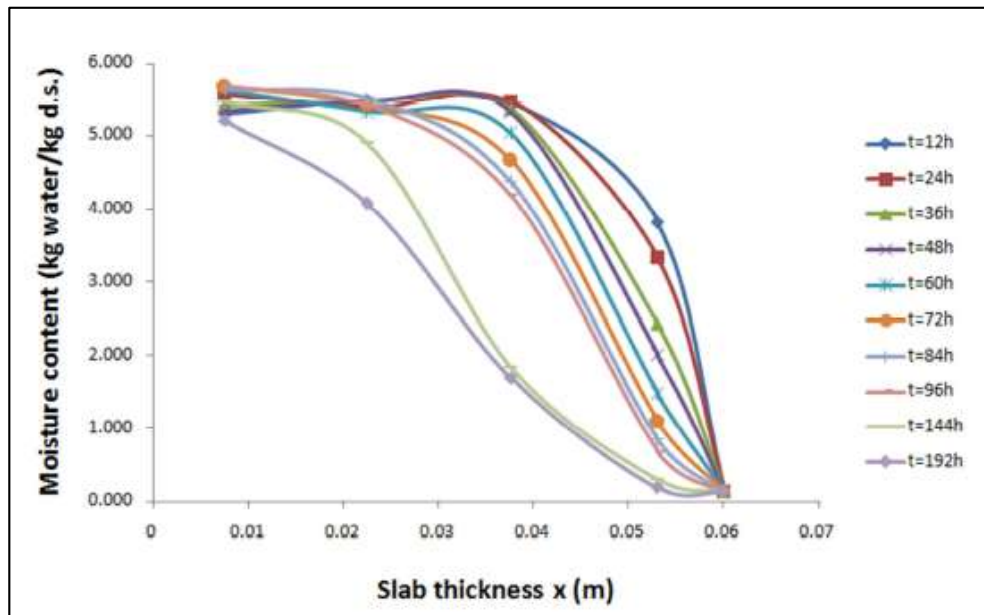
Time (h): Tiempo (horas)

Figura 31: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) para un tiempo de permanencia de 200 horas.

Fuente: [59].

La figura 31 muestra la reducción del contenido de humedad del lodo, para un tiempo de permanencia de 200 horas (8 días), a 50°C y 11,8% de humedad relativa, en una altura de lodo de 6 cm. Así mismo, la figura 32 muestra la reducción del contenido de humedad del lodo medido con una frecuencia de 12 horas. Además, se cumplen las condiciones termodinámicas del Contenido de Humedad al Equilibrio en la superficie de la capa del lodo; con un coeficiente de difusión constante. El contenido de humedad en equilibrio, es el estado en el cual la humedad del lodo logra un equilibrio con las condiciones ambientales; es decir la humedad relativa y temperatura del aire circundante. Como las condiciones ambientales reales cambian, el contenido de humedad sigue las fluctuaciones que se condicionan en el lugar; de allí la importancia del volteo del lodo y la ventilación natural, para lograr la condición del equilibrio en forma homogénea en toda la capa de lodo.

El coeficiente de difusión es el gradiente de evaporación del agua en el lodo, en otras palabras, la facilidad con la que el agua “deja” el lodo. Se espera que el gradiente sea muy lento, para que alcance la condición de cuasi estacionario y las condiciones de sequedad sean homogéneas.



Leyenda:

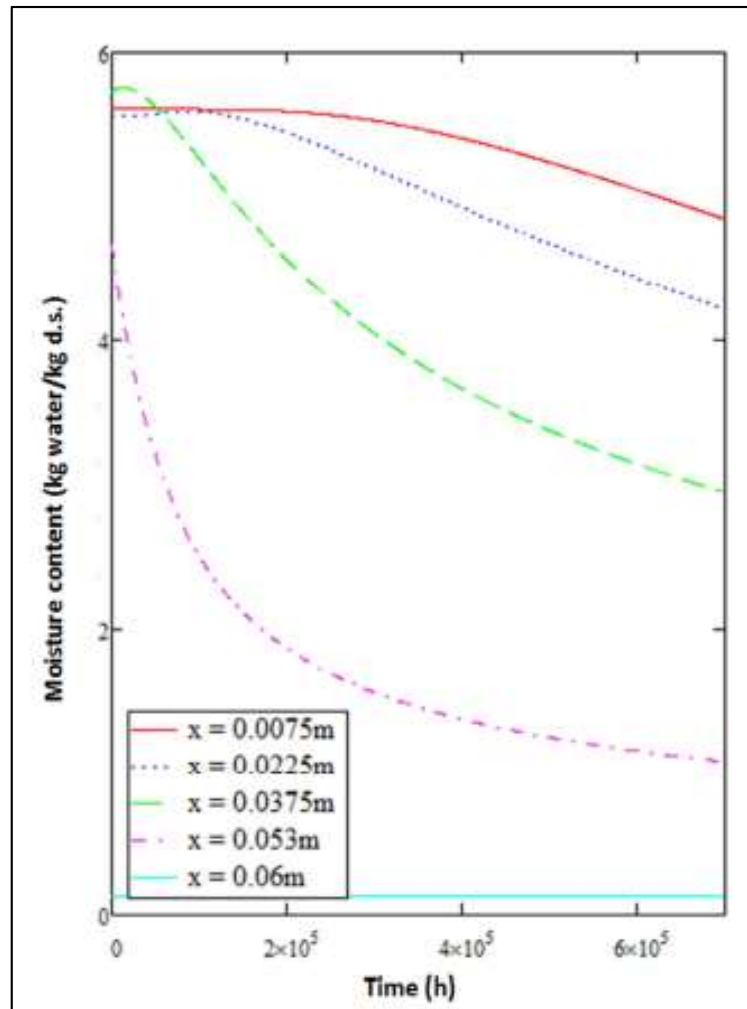
Moisture content (kg water/kg d.s.): Contenido de humedad (Kg agua/Kg materia seca)

Slab Thickness (m): Espesor del lodo (metros)

Figura 32: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) en una muestra de 6cm de altura

Fuente: [59].

Los resultados experimentales son similares a los simulados con un modelo en MathCad bajo las mismas condiciones.



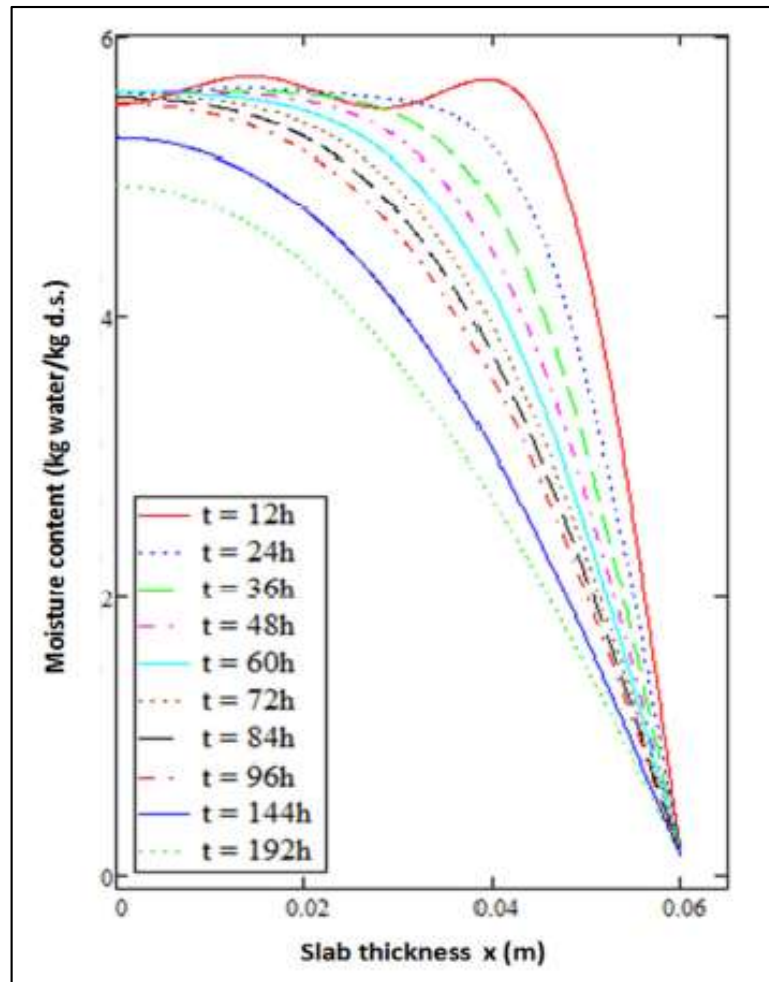
Leyenda:

Moisture content (kg water/kg d.s.): Contenido de humedad (Kg agua/Kg materia seca)

Time (h): Tiempo (horas)

Figura 33: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) según la altura de la capa de lodo.

Fuente: [59].



Leyenda:

Moisture content (kg water/kg d.s.): Contenido de humedad
(Kg agua/Kg materia seca)

Slab Thickness (m): Espesor del lodo (metros)

Figura 34: Variación del contenido de humedad del lodo (kg agua/kg sólidos seco) para una frecuencia de 12 horas.

Fuente: [59].

En conclusión, el lodo proveniente de los procesos de tratamiento de aguas residuales es un material heterogéneo debido a sus componentes químicos y biológicos, por lo que existen varios tipos de lodos según su composición. Para cualquier caso, y para enfrentar el problema sanitario que estos representan, las opciones de secado con posteriores fines benéficos son alternativas viables.

Con el objetivo de determinar la valorización energética de este material, se estudiarán las alternativas más representativas.

4.2.2. Causa 2 y 3: ÁREA – Método:

- **Métodos ineficientes de tratamiento**
- **No se aplican métodos de valorización del lodo**

Fase de la metodología: Modelo de valorización energética del lodo.

Desarrollo:

Caracterización del lodo residual

Una vez que los lodos han alcanzado una reducción significativa del contenido de humedad (25% en el caso de los estudiados en la presente investigación), la caracterización del lodo es muy importante para los fines requeridos.

En términos de valorización energética del lodo y con la finalidad de conocer el Poder Calorífico Inferior de este residuo; es necesario determinar su composición a través de un análisis elemental y proximal.

De acuerdo con [18] la composición típica del lodo digerido procedente de una planta de tratamiento de agua residual en base seca es 53,0% C; 7,2% H; 35,5% O; 4,53% N; 0,8% S. El contenido de material inerte está en el orden del 37% y el Poder Calorífico Inferior en base seca es de 5 100 kcal/kg o el equivalente a 21,3 MJ/kg.

Considerando los resultados del análisis elemental y proximal de lodo seco procedente de diversas plantas estudiadas en investigaciones anteriores, se ha empleado la siguiente caracterización:

Tabla 16: Análisis elemental y proximal del lodo seco.

Análisis elemental y proximal del lodo			
C (%)	23	S (%)	0,68
H (%)	6	H ₂ O/lodo	0,25
N (%)	8	CHNO/material seca	0,52
O (%)	39	Cenizas/residuos secos	0,45

Fuente: [19], [8], [59], [60].

Diversas experiencias muestran resultados similares, los que se resumen en la Tabla 17:

Tabla 17: Resultados de análisis elemental obtenido en otras experiencias con lodos de depuradora.

Tipo de Lodo	H₂O (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Ceniza (%)	PCI (MJ/kg)
Lodo 1	-	11,20	-	39,00	0,87	-	-	-
Lodo 2	10%	26,62	4,18	17,05	3,33	1,55	-	11,02
Lodo 3	10%	32,64	3,62	20,85	3,91	0,35	-	10,27
Lodo 4	55%	21	-	-	5,3	-	3,66	12,40

Lodo 1: Lodo procedente de lagunas de estabilización de Chiclayo.

Lodo 2: Lodo procedente de estación de depuradora Urbana, España.

Lodo 3: Lodo procedente de estación de depuradora Urbana, España

Lodo 4: Lodo procedente de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales de la EPMAPS - Agua de Quito

Fuente: [8], [4], [60].

Otras fuentes bibliográficas presentan los siguientes datos:

Tabla 18: Datos de análisis elemental de lodo seco en fuentes bibliográficas.

Fuente	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
Hartman et al. 2003	14,40	2,07	1,63	12,60	0,26
Cui et al. 2006	54,8	7,8	28,6	8,7	0,1
Houillon y Jolliet 2005	33,86	4,47	22,43	3,39	0,31
Murakami et al 2009	43,7	6,84	26,1	7,5	0,96

Según el reporte de estas fuentes consultadas, los datos encontrados para las concentraciones de C, H, O y N están dentro de los rangos establecidos.

Cálculo del Poder Calorífico del lodo (PCI)

Existen dos formas para el cálculo del PCI, el método analítico y el método práctico. El analítico consiste en sumar los poderes calóricos de los elementos principales que forman el residuo (C, H, S), ponderados por su fracción en peso, descontando la cantidad de hidrógeno total que se encuentra ya combinada con el oxígeno (H₂O). Para ello se utilizan los datos del análisis experimental realizado al lodo.

Se emplea la fórmula de Dulong para el cálculo del Poder Calorífico Inferior de un combustible:

$$PCI \left[\frac{kcal}{kg} \right] = 8\,140 \cdot C + 29\,000 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2\,220 \cdot S - 600 \cdot H_2O$$

Se obtiene como resultado, el valor para el PCI del lodo es: 9,20 MJ/kg.

Según la revisión bibliográfica, otras fuentes presentan los siguientes datos:

Tabla 19: Datos de Poder Calorífico Inferior de lodo seco en fuentes bibliográficas.

Fuente	PCI (MJ/kg) (lodo seco)
Hartman et al. 2003	6,73 – 10,24
Tchobanoglous, G. 1991	9 – 13
Thipkhunthod et al. 2005	3,5 – 13,9
Murakami et al 2009	20,1

De este modo, los lodos residuales de la Planta de Tratamiento de San José de Chiclayo presentan valores óptimos de PCI que permitirán que su energía liberada sea aprovechada en procesos de valorización energética.

4.2.3. Causa 4: ÁREA – Medio Ambiente y Tecnología:

- **Usos inadecuados del lodo que deterioran el medio.**

Fase de la metodología: Valorización energética del lodo.

Desarrollo:

Determinación de la tecnología a utilizar para la valorización energética del lodo.

En modo de aprovechar el potencial energético de estos residuos, es necesario considerar aplicar la tecnología de “cogeneración”, donde una parte de la energía liberada (50% de la energía química) se aprovecha como energía térmica (generación de vapor para uso industrial o doméstico) y otra parte (30%) se convierte en energía eléctrica [16]. A diferencia de los sistemas convencionales de generación de electricidad donde se desperdician grandes cantidades de calor. Este tipo de tecnologías pueden ser de Conversión bioquímica y conversión térmica.

La conversión bioquímica es un proceso de digestión anaerobia efectuado por bacterias, donde la fracción orgánica de los residuos se descompone en ausencia de aire. Este proceso se lleva a cabo en rellenos sanitarios (algunos controlados y otros no), la mezcla de gases que se genera es conocida como biogás, y contiene dos componentes principales: metano (CH_4) y Dióxido de carbono (CO_2) [18]. La conversión bioquímica es usualmente preferida cuando la biomasa tiene un alto contenido de agua.

La conversión térmica es un proceso mediante el cual, los residuos se convierten en productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas inorgánicas; es decir por combustión, gasificación o pirolisis. Aunque la elección de un proceso depende de factores como: la cantidad de biomasa disponible, la cantidad de energía utilizable a obtener, los estándares ambientales, las condiciones económicas y otros factores.

A través del método de factores ponderados se evaluará la tecnología idónea para maximizar la obtención de energía producida entre las alternativas como Digestión, Combustión, Gasificación y Pirolisis.

Las principales diferencias entre estos tipos de tecnologías se muestran en la Tabla 20:

Tabla 20: Diferencias entre los principales tipos de tecnología para la generación de energía a partir de residuos

Criterio	Combustión	Gasificación	Pirolisis	Digestión anaeróbica
Descripción	Conversión de biomasa en combustibles gaseosos en presencia de oxígeno.	Conversión termoquímica de biomasa en combustibles gaseosos mediante la oxidación parcial	Descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno	Conversión bioquímica de material orgánico a biogás en ausencia de oxígeno
T. de Operación	300 – 1 200°C	Superior a 900°C	Inferior a 900°C	35 - 50°C
Inyección de aire	Si requiere	Poco / no requiere	No requiere	No requiere
Humedad	La humedad de la biomasa afecta los requerimientos de energía	El proceso no se ve afectado por el contenido de humedad del residuo.	El proceso no se ve afectado por el contenido de humedad del residuo.	Se usa para biomasas con alto contenido de agua
Producto final	Los productos finales son gases de combustión. H ₂ , CH ₄ , CO.	Syngas con elevado poder Calorífico. (H ₂ , CO, CH ₄ , CO ₂ , C ₂ H ₄ H ₂ O, N ₂).	Syngas rico en hidrocarburos (CO, CO ₂ , CH ₄ and H ₂).	Biogás, gas con elevado contenido de CH ₄ .
Residuo	Escorias y cenizas, que son consideradas residuos peligrosos.	Material inerte. Útiles en la construcción.	Carbón utilizado para la producción de carbón vegetal y carbón activado.	Compost estabilizado.
Emisiones	Se vierten gases de combustión a la atmósfera.	No genera emisiones a la atmósfera.	No genera emisiones a la atmósfera.	No genera emisiones a la atmósfera
Material de construcción	Aceros y cerámicos	Aceros y cerámicos	Aceros y cerámicos	Cemento y PVC
Costos estimado	\$7 000 y \$10 000 dólares por kW	\$7 500 y \$11 000 dólares por kW	\$8 000 y \$11 500 dólares por kW	-

Aceptación social	Mala	Ha vuelto a ser de interés para la producción de vapor y electricidad.	Poco utilizado para residuos.	Se usa para la producción de compost.
Aceptación ambiental	Mala	Forma de Energía Limpia	Requiere control de los residuos	Requiere control de los residuos.

Los criterios a evaluar para la selección de la tecnología para la valorización energética del lodo son los siguientes:

- A: Área requerida
- B: Temperatura de Operación
- C: Poco requerimiento de aire
- D: Baja humedad del residuo
- E: Valorización energética del producto final
- F: Utilidad de los residuos
- G: Control de emisiones gaseosas
- H: Aceptabilidad social
- I: Aceptabilidad ambiental

Estos criterios se evaluaron en una matriz de enfrentamiento, donde se le asignó un valor de (1) al criterio “más importante” con el cual es comparado; el valor de (0) si el criterio es “menos importante” con el comparado. En casos de “importancia es equivalente”, ambos criterios tendrán el valor “1”. En el extremo derecho se contabilizarán los puntos para cada criterio y se evaluará el porcentaje correspondiente, el cual representará la ponderación del cada criterio. La Tabla 21, muestra los resultados de la Matriz de Enfrentamiento:

Tabla 21: Matriz de enfrentamiento para ponderación de los criterios.

CRI TER IOS	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total	Ponderac ión (%)
A	X	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2
B	1	X	1	1	0	0	0	0	0	3	7
C	1	0	X	0	0	0	0	0	0	1	2
D	1	1	1	X	0	1	1	1	1	7	16
E	1	1	1	1	X	1	1	1	1	8	18
F	1	0	1	1	1	X	1	1	1	7	16
G	1	0	1	1	1	1	X	1	1	7	16
H	0	0	0	1	0	1	1	X	0	3	7
I	1	1	1	1	1	1	1	1	X	8	18

Fuente: Elaboración propia.

La calificación se evaluará según la siguiente escala:

ESCALA	Nivel
Excelente	10
Muy bueno	8
Bueno	6
Regular	4
Deficiente	2

La Tabla 22 muestra la calificación de las tecnologías analizadas. Se observa que los criterios más importantes para la elección de la tecnología es la empleabilidad de los todos los productos obtenidos en los procesos de conversión de la biomasa, así como su aceptabilidad social y ambiental.

Tabla 22: Calificación de las tecnologías para la generación de energía a partir del lodo.

CRITERIOS	Importancia	Combustión		Gasificación		Pirolisis		Digestión Anaeróbica	
		Escala	Puntaje	Escala	Puntaje	Escala	Puntaje	Escala	Puntaje
A	2	8	18	6	13	6	13	4	9
B	7	4	27	4	27	6	40	8	53
C	2	2	4	6	13	6	13	8	18
D	16	4	62	8	124	8	124	2	31
E	18	2	36	10	178	6	107	6	107
F	16	2	31	8	124	4	62	4	62
G	16	2	31	8	124	8	124	4	62
H	7	2	13	8	53	6	40	4	27
I	18	2	36	8	142	6	107	4	71
Calificación obtenida			258		800		631		440

Según esta evaluación, *la gasificación es el proceso más idóneo para los fines que se desea conseguir.*

Evaluar la cantidad de energía producida

Para el tratamiento de grandes cantidades de agua residual, se requiere sistemas eficientes, pero con mínimo consumo de energía y costos de operación. Tratar grandes cantidades de agua residual municipal implica también obtener grandes cantidades de lodo residual primario y secundario, pero que deben seguir las mismas condiciones de operación y altas exigencias en los procesos de secado.

En esta línea, los procesos de tratamiento ya mencionados como la digestión anaeróbica del agua a través de reactores UASB y el secado solar de lodos permiten obtener un agua tratada con una reducción de contaminantes de hasta 99% y lodo seco al 25% de contenido de agua respectivamente.

El lodo proveniente de estaciones depuradoras es, generalmente, una combinación de lodo primario y secundario, es decir con un contenido substancia de material inerte y componentes patógenos. Los componentes del lodo residual pueden caracterizarse hasta en 6 grupos:

- Componentes orgánicos no tóxicos.
- Nitrógeno y fósforo
- Metales pesados como Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd, Hg y As con concentraciones que varían desde 1 ppm hasta los 1000 ppm, bifenilos policlorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas, pesticidas, alquibencenos lineales, nonilfenoles, retardantes de fuego brominado, etc.
- Patógenos y otros micro contaminantes.
- Componentes inorgánicos como silicatos, aluminio, calcio y Magnesio.
- Agua, cuyo porcentaje en peso puede variar, generalmente es de 85%.

La composición típica del lodo proveniente de PTAR en base seca es 53% C, 7,2% H, 35,5% O, 4,53% N, 0,8% S, 37% cenizas [18]. El carbono orgánico, fósforo y nitrógeno pueden ser considerados componentes valiosos, pues representan una posible

reutilización del lodo con mínimo impacto ambiental sobre el medio ambiente y las personas.

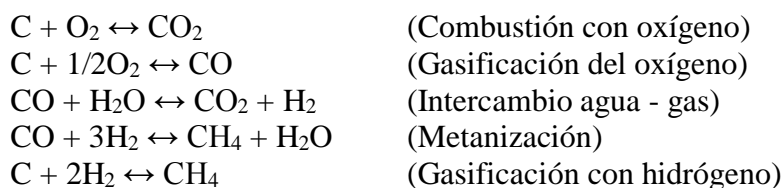
Para determinar la cantidad de energía a producir a partir de la reutilización del lodo residual “seco”, se empleará la técnica de gasificación.

La gasificación tiene lugar con un “agente oxidante” como vapor, oxígeno o aire, pudiéndose modificar las características del gas producido. La conversión de lodo seco en cenizas y gas se da en tres fases: secado, pirolisis y gasificación, durante la última fase los productos de la pirolisis combustionan a una temperatura usualmente mayor a 1 000°C y presión atmosférica, el gas resultante llamado “Syngas” (gas de síntesis) puede alcanzar un PCI de hasta 10 MJ/Nm³ y contiene principalmente CO₂, CO, H₂, CH₄, H₂O, además de trazas de hidrocarburos, y otros compuestos.

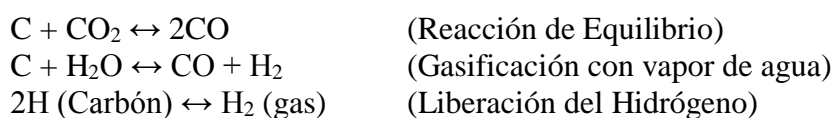
Para obtener óptimos rendimientos es necesario temperaturas mínimas de 700° – 800°C, siendo la temperatura promedio entre 800°C y 1 400°C, por encima de los 1 500°C se pueden presentar problemas técnicos. La presión puede oscilar entre 1 y 30 atm.

Las principales reacciones que ocurren en el proceso de gasificación son:

Reacciones exotérmicas:



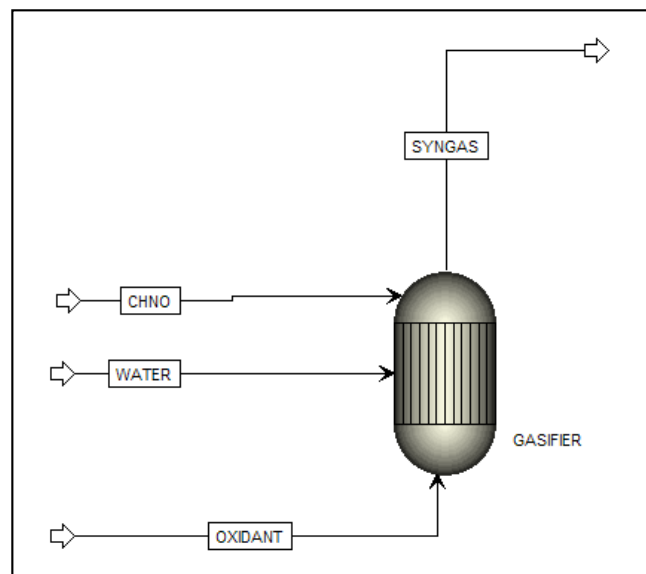
Reacciones endotérmicas:



La cantidad de energía producida se ha evaluado a partir de simulaciones obtenidas utilizando el software Aspen Plus, a través de un modelo a Parámetros concentrados, semi-empírico, con formación de compuestos no estequiométrico y considerando algunos factores cinéticos. También se asumen las siguientes condiciones:

- Estado estacionario.
- Se conoce la composición de los elementos de entrada.
- Es conocida la temperatura de la biomasa y el aire (agente oxidante).
- Es uniforme la temperatura del reactor.
- No se consideran las pérdidas de calor.

El modelo utilizado en el software se muestra en la figura 35:



Leyenda:

Syngas: Gas de síntesis
 CHNO: Biomasa
 Water: Agua
 Oxidant: Oxidante (aire)
 Gasifier: Gasificador

Figura 35: Esquema para la simulación del proceso de gasificación del lodo seco de depuradora.

El Software Aspen Plus no reconoce partículas complejas, por lo que la biomasa se expresa como la mezcla de los componentes C, H, O, N en fracción sólida, y la fracción líquida como cantidad de “Water” (agua) al ingreso del reactor. Dando como resultado la

formación de un gas con diferentes composiciones de los gases principales como: CH₄, CO, CO₂, H₂, H₂O, N₂, y otros como O₂, NH₃, NO₂, C₂H₂, otros e inertes (ceniza)

Para simplificar el proceso, se desarrollaron simulaciones en un reactor isotérmico, considerando la temperatura de operación en 1 000°C y asumiendo una relación agente oxidante (aire)/biomasa = 0,5 (500 kg/h) y para un caudal de ingreso de biomasa de 1 000 kg/h. La composición del lodo y las características de operación para el gasificador se muestran en las tablas 23 y 24 respectivamente:

Tabla 23: Características de la biomasa.

Análisis elemental y proximal del lodo seco			
C (kg/h)	241	O (kg/h)	96
H (kg/h)	46	H ₂ O (kg/h)	258
N (kg/h)	33	Inertes (kg/h)	360

Tabla 24: Condiciones de operación para la gasificación del lodo

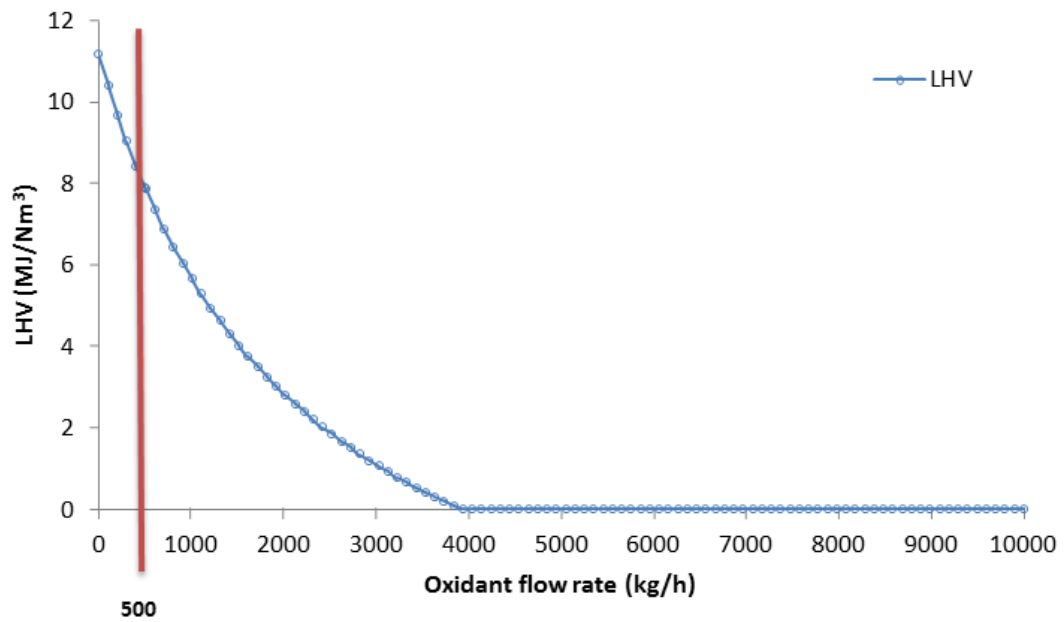
Condiciones operacionales:			
PCI lodo	9,2MJ/kg	N (%)	8
T biomassa	23 °C	O (%)	23
Presión	1 atm	Humedad	0,25
C (%)	58	CHNO/biomasa	0,52
H (%)	11	Inertes/biomasa	0,45

Luego de las simulaciones, el syngas obtenido presenta un Poder Calorífico de: 7,89 MJ/Nm³ con la siguiente composición de los gases de salida:

Tabla 25: Composición de los gases de salida, resultado de la gasificación del lodo en un reactor isotérmico.

Composición del gas de síntesis (fracción molar)			
Flujo del gas (Nm ³ /h)	1615.17	Oxidante	aire
CH ₄	31 PPM	O ₂	Trazas
CO	0,252	NH ₃	19 PPM
CO ₂	0,026	NO ₂	Trazas
H ₂	0,437	C ₂ H ₂	Trazas
H ₂ O	0,079	C ₂ H ₄ ,	Trazas
N ₂	0,206	C ₂ H ₆	Trazas

Los análisis paramétricos muestran que el gas tiene un elevado Poder Calorífico, rico en H_2 y N_2 , con un caudal de aire ingreso de 0,5 respecto a la cantidad de biomasa que se alimenta al reactor.

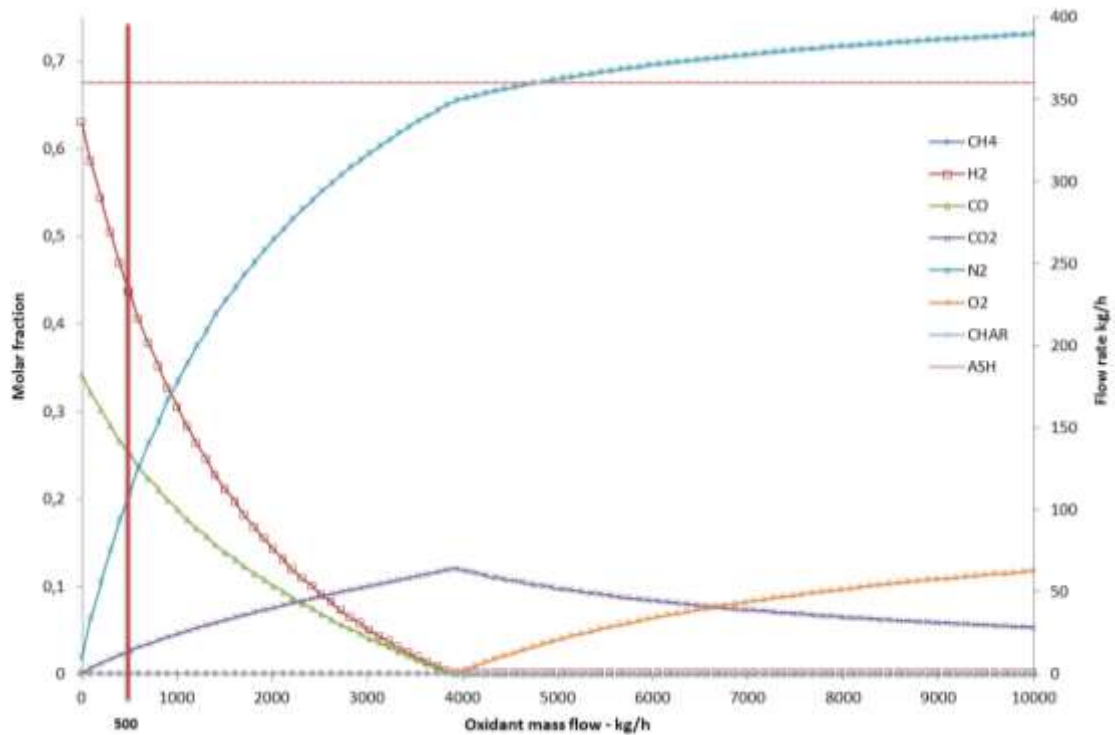


Leyenda:

LHV: Poder Calorífico (PCI)

Oxidant Flow rate: Flujo del aire

Figura 36: Análisis paramétrico del Poder Calorífico (LHV) Vs Flujo de aire.



Leyenda:

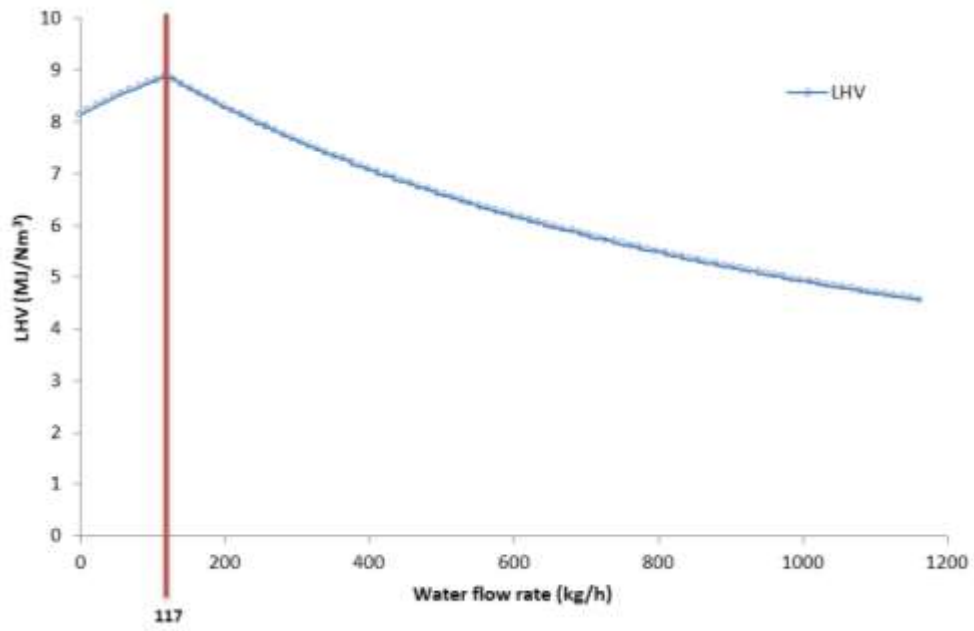
Molar fraction: Fracción molar

Oxidant mass flow: Flujo de masa del oxidante

Figura 37: Análisis paramétrico de los componentes del syngas vs Flujo de aire.

El Poder Calorífico es mayor cuando mayor es la concentración de H y CO, según se reduce la concentración de estos dos componentes en el gas, también se reduce en PCI, mientras que aumenta la concentración de N₂ y CO₂. Las cenizas son elementos que no reaccionan, pues se ha fijado de esta forma en el modelo, aunque técnicamente son producto de la combustión del carbono, es importante considerar la cantidad de energía que posee para su propio calentamiento y es un elemento clave en la evaluación de la viabilidad de la tecnología.

La gasificación, recibe una alta influencia en la cantidad de agua que contiene la biomasa que se va a gasificar, en este contexto, se muestran los siguientes resultados:

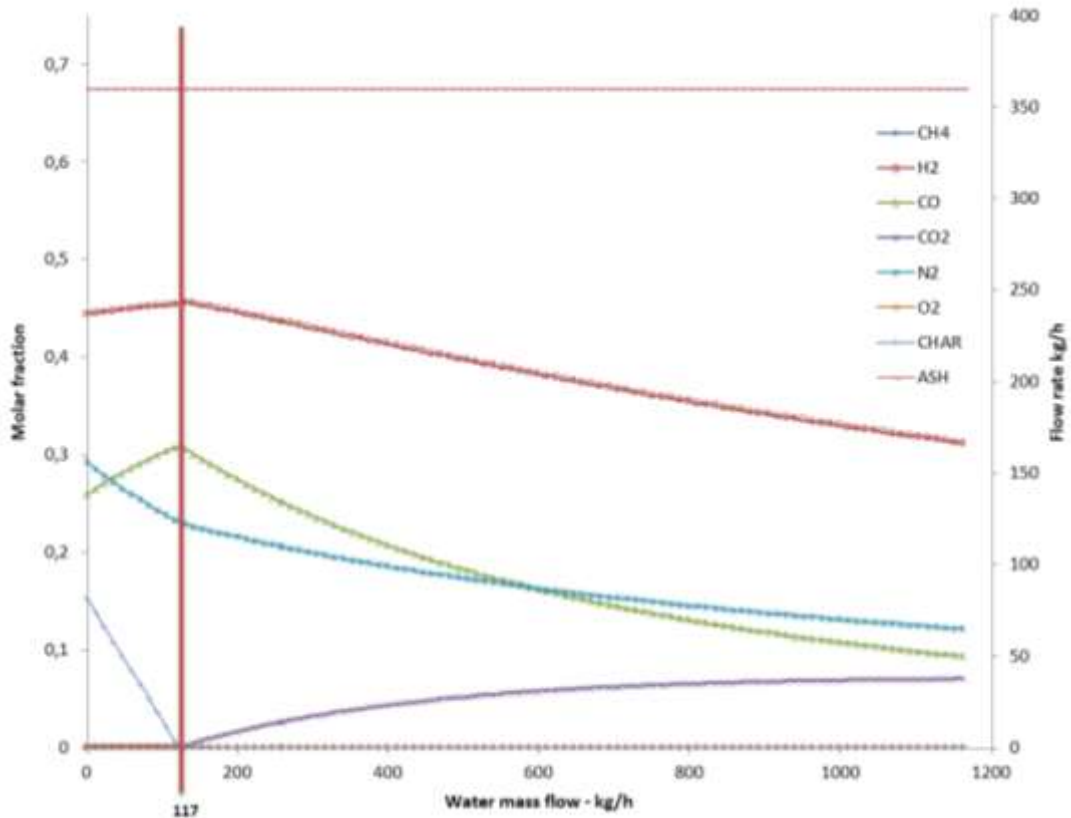


Leyenda:

LHV: Poder Calórico (PCI)

Water flow rate: Flujo del agua

Figura 38: Análisis paramétrico del Poder Calórico (LHV) vs cantidad de humedad del lodo.



Leyenda:

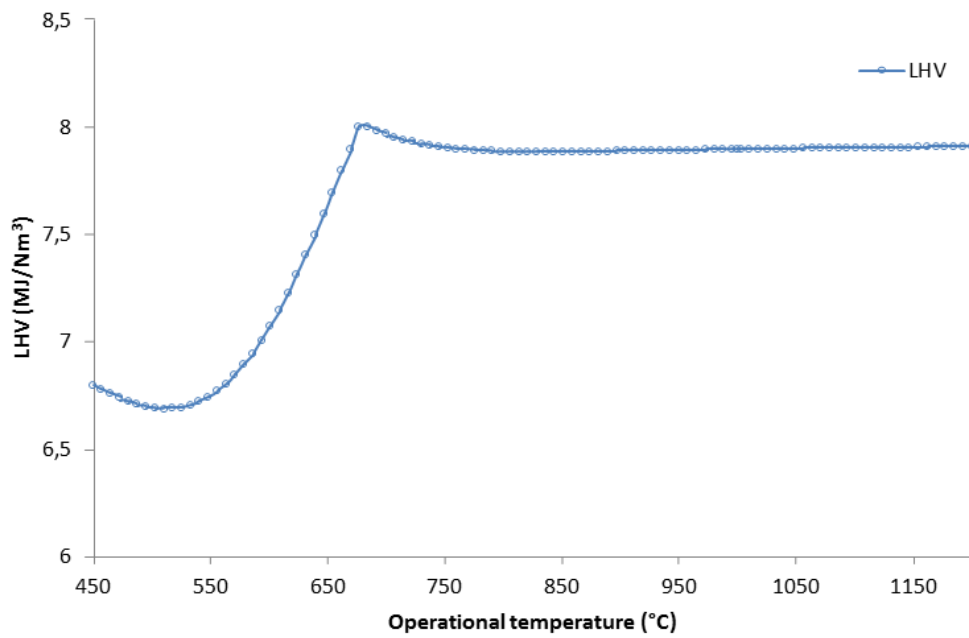
Molar fraction: Fracción molar

Water mass flow: Flujo de masa del agua

Figura 39: Análisis paramétrico de los componentes del syngas vs cantidad de humedad del lodo

Se demuestra que la cantidad de humedad señalada al inicio del proceso 25% (250 kg/h de agua) no permite obtener un valor óptimo de PCI, como se muestra en la figura 39; se alcanzan valores de $8,86 \text{ MJ/Nm}^3$ cuando la cantidad de humedad es de 13,5%, es decir 117 kg/h de agua. Con una humedad mayor al 50% la gasificación ya no es una tecnología atractiva para los objetivos que se desean conseguir.

De igual forma se determinó que el PCI del syngas alcanza un valor constante ($7,88 \text{ MJ/Nm}^3$) cuando las temperaturas de operación de la gasificación son mayores a 800°C , así como también la concentración de los componentes del syngas, tal y como se muestran en las figuras 40 y 41 respectivamente.

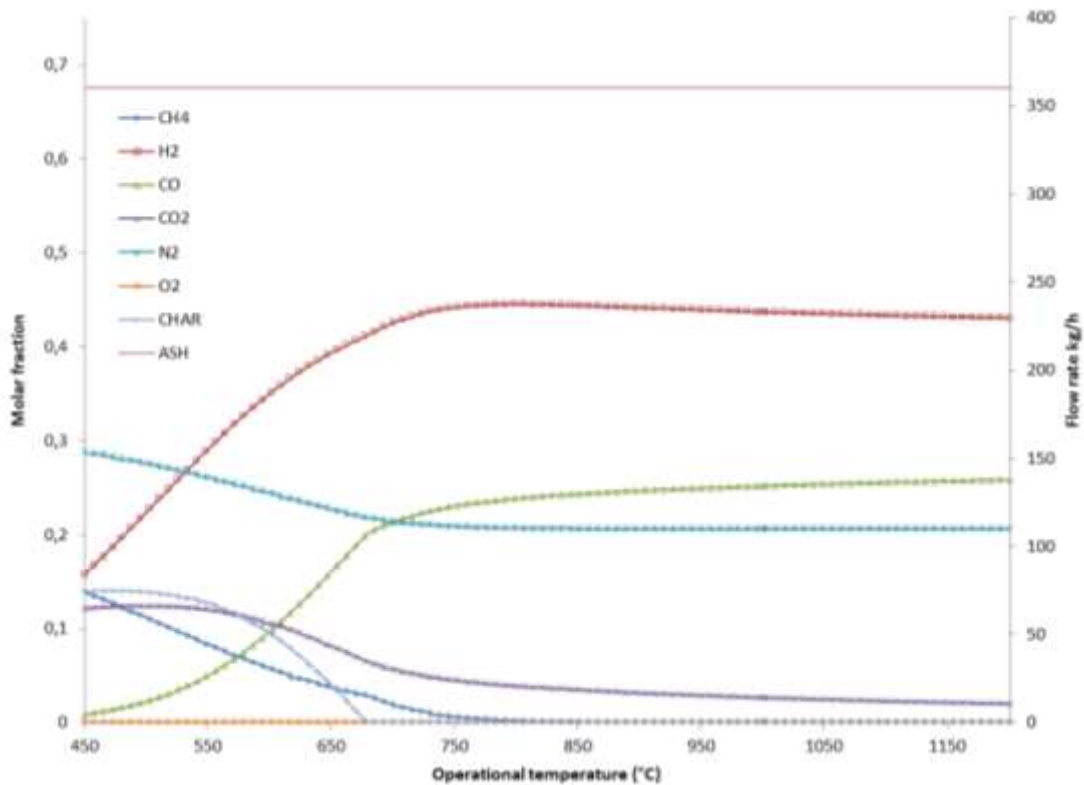


Leyenda:

LHV: Poder Calórico (PCI)

Operational temperature: Temperatura operacional

Figura 40: Análisis paramétrico del Poder Calórico (LHV) Vs temperatura de operación del reactor.



Leyenda:

Molar fraction: Fracción molar

Operational temperature: Temperatura operacional

Figura 41: Análisis paramétrico de los componentes del syngas vs temperatura de operación del reactor.

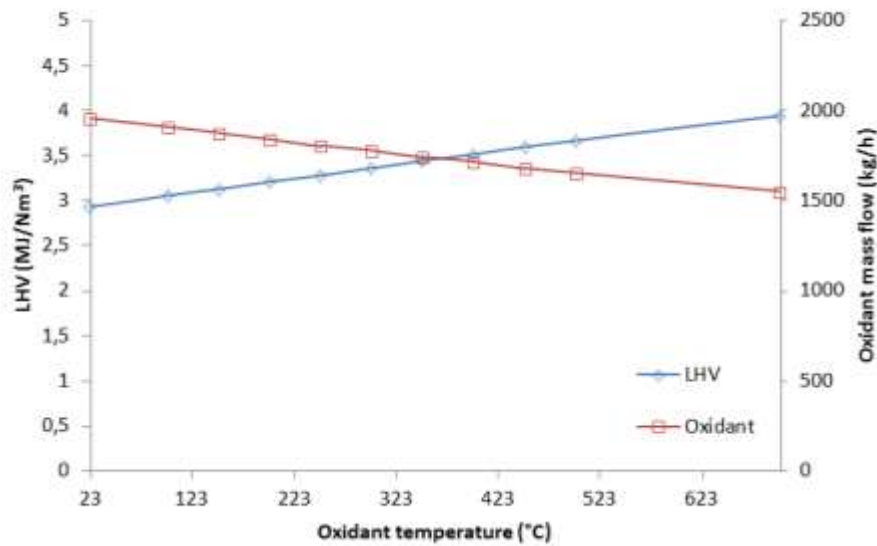
Como ya mencionado, las temperaturas óptimas para el proceso de gasificación deben ser mayores a 800°C y menores a 1 500°C; el Poder Calorífico es altamente influenciado por la presencia de H₂ y CO en el gas.

Como resultado de la gasificación es un reactor isotérmico, se determina que la cantidad de humedad del lodo debe ser de alrededor de 13,5% y la relación entre el agente oxidante (aire) y la cantidad de biomasa que se alimenta al reactor de ser en una relación de 0,5, lo cual significa un consumo de energía de una fuente externa, además, con temperaturas de operación mayores a 800°C, se consiguen valor aceptables de energía presente en el gas (7,88 MJ/Nm³).

Sin embargo, Considerar que la temperatura del reactor fija a 1 000°C (proceso isotérmico), supone un intercambio de energía con el externo cuando la temperatura de reacción aumenta. Cuando el intercambio de calor es hacia el externo, predominan las reacciones de combustión y por ende se requiere nuevamente calor para que se puedan dar las reacciones de pirolisis y gasificación (endotérmicas). Si el agente oxidante se alimenta en exceso, entonces es un exceso de masa dentro del reactor que requiere ser calentado y por ende se necesitará cada vez mayor energía del externo. Si, en cambio, el agente oxidante ingresará calentado al sistema, entonces las reacciones endotérmicas sucederían más rápido y la cantidad de agente oxidante a alimentar se reduce, suponiendo de este modo un ahorro energético para el sistema.

Es así, que se puede mejorar el sistema, a través de la simulación del proceso de gasificación en un reactor adiabático (sin intercambio de calor con el externo), donde prevalecerán fuertemente las reacciones endotérmicas, este modelo se acerca al funcionamiento real que puede tener un reactor de gasificación de biomasa. El modelo adiabático permite garantizar el funcionamiento auto térmico del reactor, además, considera la entalpía de formación de la biomasa equivalente a 1 290,0 MJ/h. La contribución de calor del externo puede provenir de la inyección del agente oxidante con una temperatura mayor a la del ambiente.

Aspen Plus permite calcular la cantidad de aire necesario para garantizar una temperatura de operación constante, la figura 43 muestra, que un aumento en la Temperatura del oxidante implica también un aumento del PCI del gas, a su vez desciende el flujo de masa del oxidante necesario para darse las reacciones endotérmicas.



Leyenda:

LHV: Poder Calórico (PCI)

Oxidant temperature: Temperatura del oxidante

Oxidante mass flow: Flujo de masa del oxidante.

Figura 42: Variación del PCI del lodo (eje principal) y caudal de aire (eje secundario) según la temperatura del oxidante.

Así, el agente oxidante (aire) puede lograr al ingreso del gasificador una temperatura de 450°C y un flujo másico de 1 500,0 kg/h; para obtener valores de PCI del syngas e hasta 4,47 MJ/Nm³, con una composición cada vez menor en H y CO, pero mantenida para el N₂:

Tabla 26: Composición de los gases de salida, resultado de la gasificación del lodo en un reactor adiabático.

Composición del syngas (Fracción molar)			
Flujo del syngas (Nm ³ /h)	2 012,66	Oxidante	aire
CH ₄	2 PPM	O ₂	Trazas
CO	0,170	NH ₃	10 PPM
CO ₂	0,049	NO ₂	Trazas
H ₂	0,214	C ₂ H ₂	Trazas
H ₂ O	0,106	C ₂ H ₄ ,	Trazas
N ₂ ,	0,460	C ₂ H ₆	Trazas

Finalmente, es posible acercarse aún más al proceso real, pues las variables cinéticas deberían ser consideradas. Considerando los fundamentos teóricos, se puede asumir que el 15% de C no es gasificado y resulta en un elemento de salida como la ceniza. Las nuevas condiciones de operación se resumen entonces en las siguientes tablas:

Tabla 27: Condiciones operacionales considerando variables cinéticas y composición del lodo.

Condiciones de operación del reactor			
PCI lodo	9,2 MJ/kg	N (%)	8
T biomasa	23 °C	O (%)	23
T oxidante	450°C	Inertes	0,15
Presión	1 atm	H ₂ O/lodo	0,14
C (%)	58	CHNO/biomasa	0,52
H (%)	11	Ceniza/biomasa	0,45

Tabla 28: Composición del lodo

Composición del lodo			
C (kg/h)	241	O (kg/h)	96
H (kg/h)	46	H ₂ O (kg/h)	117
N (kg/h)	33	Cenizas (kg/h)	360

Para estos cálculos fueron necesarios también, evaluar la cantidad de aire caliente al ingreso del reactor (gasificador), la energía previa que se necesita para el calentamiento de los materiales inertes y la entalpía de formación de la biomasa (lodo).

Los resultados muestran que el PCI alcanza un valor de 4,24 MJ/Nm³, mientras que la nueva composición del gas no presente variaciones considerables.

Tabla 29: Composición del syngas

Composición del gas (fracción molar)			
Flow rate (Nm ³ /h)	1890.9	Oxydant	air
CH ₄	1 PPM	O ₂	Trace
CO	0,150	NH ₃	10 PPM
CO ₂	0,051	NO ₂	Trace
H ₂	0,217	C ₂ H ₂	Trace
H ₂ O	0,128	C ₂ H ₄	Trace
N ₂ ,	0,453	C ₂ H ₆	Trace

Para [61] el Poder Calorífico de un gas proveniente de la gasificación del lodo residual de depuradora según información experimental y/o plantas piloto está en los valores de 2 a 7 MJ/Nm³. De esta manera, se puede afirmar que el valor encontrado es aceptable.

Valorización del lodo con residuos de biomasa agroindustrial

Se ha demostrado que el lodo residual proveniente de una planta de tratamiento de agua residual es un elemento potencialmente energético, su adecuada recuperación es un proceso clave para su posterior aplicación en los fines mencionados.

El lodo residual, dado su alto contenido de humedad, requiere tratamientos de deshidratación y desinfección por los agentes patógenos presentes en él. Los resultados de las simulaciones con Aspen Plus, orientadas únicamente a conocer el potencial energético de este recurso, muestran que la cantidad de energía recuperada es aún poco atractiva para futuras aplicaciones a escala industrial, dado la alta inversión que se requerirá.

Otro de los objetivos de esta investigación, es también estudiar una forma de incrementar el PCI para hacer de este un recurso susceptible de ser aprovechado energéticamente y sobre todo a escala industrial.

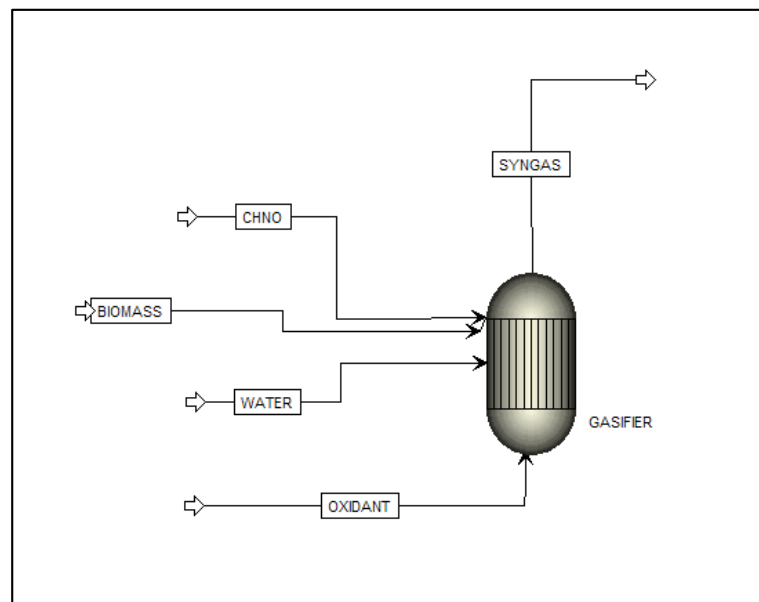
En este sentido, la biomasa residual procedente de actividades de recolección y agroindustriales como hojas, cogollos y ramas, o pepas, cáscara y otros, se presentan como una alternativa para incrementar la cantidad de energía a obtener. Según el Centro de Investigación y Desarrollo de la Biomasa de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CIDB – PUCP), estos recursos son poco explotados en el campo energético, con un fin únicamente comercial para su reproceso y obtención de nuevos productos o subproductos. Por el potencial energético que presentan se requiere incrementar su conocimiento para estos fines, y no solamente al uso actual que tienen.

La herramienta interactiva Biomap, permite conocer los residuos agrícolas y agroindustriales de la Región Lambayeque y su potencial equivalente de energía. Una de las regionales de mayor potencial energético de biomasa residual en el Perú.

Tabla 30: Residuos agrícolas y agroindustriales de la Región Lambayeque.

Cultivo	Residuo	Energía equivalente
Caña de azúcar	Residuos agrícolas de cosecha (RAC)	157 354 TEP / año
Caña de azúcar	Bagazo	133 143 TEP / año
Arroz	Residuo de pajilla	51 053 TEP / año
Arroz	Cascarilla	54 000 TEP / año
Algodón	Broza	22 372 TEP / año
Espárrago	Broza	33 TEP / año

Fuente: [62]



Leyenda:

Syngas: Gas de síntesis

CHNO: Biomasa

Water: Agua

Oxidant: Oxidante (aire)

Gasifier: Gasificador

Figura 43: Esquema de simulación para una mezcla de lodo con biomasa agrícola.

Las simulaciones en Aspen permitirán determinar el comportamiento del PCI del syngas obtenido de la gasificación de una biomasa resultante de la mezcla de uno de estos productos con lodo residual, según el siguiente esquema:

Las condiciones de operación para la biomasa agrícola se muestran en la Tabla 31:

Tabla 31: Condiciones de operación de biomasa agrícola.

Condiciones operacionales para biomasa agrícola			
PCI	18 MJ/kg	N (%)	0,2
T biomasa	23 °C	O (%)	44,4
Presión	1 atm	H ₂ O/biomasa	0,12
C (%)	49.4	CHNO/biomasa	0,96
H (%)	6	Cenizas/biomasa	0,01

Se ha determinado el comportamiento del PCI, al variar la relación de porcentaje de mezcla entre el lodo residual y la biomasa agrícola alimentada al reactor. La Tabla 32 muestra las características de alimentación de lodo y biomasa.

Tabla 32: Características de alimentación de lodo considerando diversos porcentajes de biomasa en la mezcla.

Porcentaje de variación de biomasa agrícola	Sludge		
	Mezcla (kg/h)	Sólido (kg/h)	Agua (kg/h)
0%	174,6	601,4	117,1
10%	157,1	541,3	106,2
30%	122,2	420,9	82,61
50%	87,3	300,7	59,0
70%	52,38	180,42	35,4
90%	17,46	60,1	11,8
100%	0,0	0,0	0,0

La Tabla 33 muestra la variación del agente oxidante, el flujo de salida del syngas y la variación del PCI al variar el porcentaje de biomasa alimentada al reactor. Los resultados muestran que se logra un ligero incremento en el PCI del syngas, sin embargo, la cantidad del gas obtenido es menor, puesto que la cantidad de oxidante alimentado se reduce a

medida que incrementa se incrementa el porcentaje de biomasa. En cada caso se mantiene la temperatura de operación del reactor en alrededor de 1 000°C.

Tabla 33: Características de salida del syngas al variar el porcentaje de biomasa en la mezcla alimentada al reactor.

Porcentaje de biomasa agrícola en la mezcla	Flujo de aire (kg/h)	Flujo de syngas obtenido (Nm ³ /h)	Entalpía de formación (MJ/h)	PCI (MJ/Nm ³)	Fracción molar de H ₂
0%	1 359,0	1 898,9	-1 290,1	4,24	0,217
10%	1 301,5	1 883,7	-1 367,2	4,46	0,224
30%	1 178,9	1 848,2	-1 521,6	4,95	0,238
50%	1 056,8	1 812,9	-1 676,0	5,45	0,252
70%	934,8	1 777,2	-1 830,4	5,98	0,266
90%	814,7	1 743,7	-1 984,8	6,52	0,276
100%	789,0	1 751,7	-2 061,9	6,74	0,280

Siendo el objetivo general del estudio valorizar energéticamente el lodo residual, es posible asumir que son rangos aceptables de porcentaje de biomasa en la mezcla de 30 – 70%, pues con menos biomasa, no se consiguen incrementos significativos en la cantidad de energía a obtener, mientras que para más del 70% de la biomasa en el lodo, se pierde el valor de la investigación.

Modelo de valorización energética del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual.

Resumiendo, el modelo de valorización energética del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua residual comprende lo siguiente: el agua residual cruda proveniente de la ciudad e Chiclayo ingresa a un proceso de tratamiento con reactores anaeróbicos de tipo UASB de los cuales se desprende biogás que puede ser aprovechado energéticamente, el lodo generado una vez extraído del reactor es deshidratado a través de un proceso de deshidratación solar (bajo techo, tipo invernadero) que reduce en gran medida la concentración de agua, obteniendo un lodo apto (14% de humedad) para ser gasificado con una inmisión de aire a elevada T (450°C), utilizando aire como agente oxidante en flujo másico de 1 500 kg/h para una tonelada de lodo, obteniendo así un gas con un PCI de alrededor de 4,5 MJ/Nm³. Estos valores pueden ser mejorados si se

aprovecha la biomasa residual de la región Lambayeque, consiguiendo hasta 6 MJ/Nm^3 . Valores aceptados de energía según la comunidad científica internacional.

La Figura 44 muestra el esquema propuesto:

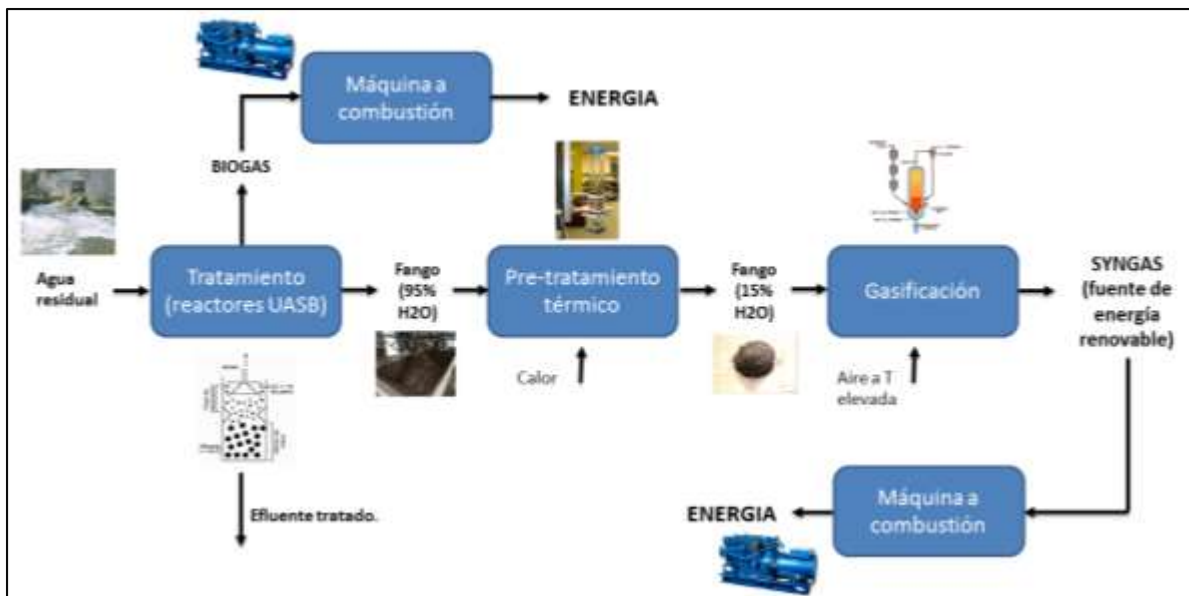


Figura 44: Propuesta de modelo de valorización energética para lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales doméstica.

Para calcular el total de energía producida en este sistema propuesto de valorización energética de biomasa residual, se debe incluir la energía obtenida gracias al biogás procedente de la digestión anaeróbica en los reactores UASB así como el syngas obtenido por la gasificación del lodo. Para el caso del biogás, se obtuvo un PCI de 21 MJ/m^3 , equivalente a $0,34 \text{ MW}$ de potencia obtenida a través de un motor de combustión convencional. Mientras que, para el caso del Syngas se logra obtener hasta PCI de $4,24 \text{ MJ/Nm}^3$, equivalente a $0,21 \text{ MW}$ (de potencia obtenida a través de un motor de combustión convencional). Considerando la puesta en marcha de esta PTAR sostenible; el total de energía a producir puede ser alrededor de $0,55 \text{ MW}$.

4.2.4. Causa 5: ÁREA – Medio Ambiente y Tecnología:

- **Eliminación inadecuada al medio ambiente.**

Fase de la metodología: Evaluación del Riesgo de Impacto Ambiental

Desarrollo:

Con el objetivo de evaluar el riesgo de impacto ambiental negativo de la presente propuesta, es necesario estudiar los elementos ambientales en la zona de influencia del proyecto, como son las características físicas y biológicas; así como las características sociales, culturales y económicas de la población aledaña, para determinar aquellos más vulnerables con riesgo de impactos ambientales ocasionados por el proyecto e identificar las posibles medidas de mitigación de los mismos.

En ese sentido, el gobierno peruano ha realizado importantes avances en aspectos de protección ambiental, todos los organismos adscritos al MINAM trabajan coordinadamente para brindar información acerca de investigaciones ambientales (IIAP-Instituto de investigaciones de la Amazonía Peruana; INAIGEM-Instituto Nacional de Investigaciones en Glaciares y Ecosistemas de Montaña; SUNASS – Superintendencia nacional de Agua y Saneamiento), mediciones (IGP – Instituto Geofísico del Perú; SENAMHI – Servicio nacional de Meteorología e Hidrología del Perú), y de evaluación y monitoreo (OEFA – Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, OSINFOR – Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre); así como el SEIA (Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental) y el SENACE (Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles), revisan y aprueban los Estudios de Impacto Ambiental de los proyectos de inversión de toda índole que puedan causar impactos ambientales significativos. Una vez aprobados los EIA se emite la resolución de Certificación Ambiental que concede el derecho de iniciar las actividades de operación del proyecto [63].

Con respecto a la presente investigación, el Marco Normativo está basado en:

- **Ley General del Ambiente:** Norma ordenadora del marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Allí se establecen los principios y normas básicas que aseguran el efectivo ejercicio al derecho de un ambiente saludable, es decir: equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida y las actividades de esta; para ello, la Ley general del Ambiente, regula que se desarrolle una efectiva gestión ambiental para la protección del ambiente y así lograr el desarrollo sostenible del país” [64].
- **Ley del Sistema Nacional de Gestión Ambiental:** su objetivo es asegurar el cumplimiento de los objetivos ambientales de las entidades públicas; así como fortalecer la gestión ambiental a todo nivel de gobierno, de este modo garantizar y evitar superposiciones, omisiones, duplicidad, vacíos o conflictos entre ellos” [65].
- **Ejes estratégicos de la gestión ambiental:** Para este informe se elaboraron propuestas, normativas y políticas orientadas a mejorar las condiciones ambientales y sociales en las que se desarrollan las actividades económicas, especialmente las industrias extractivas [66].
- **Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental:** a través de laa cual se crea el SEIA como herramienta de gestión ambiental de carácter preventivo para regular los procedimientos de elaboración, evaluación y control de los Estudios de Impacto Ambiental [67].
- **Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM: Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias:** En esta norma se muestran los valores y parámetros con la finalidad de mejorar la gestión de la calidad ambiental del agua y brindar adecuados niveles de protección a la salud de la población. Esta norma efectúa precisiones para la mejora en la implementación de los estándares en casos de agua para riesgo de vegetales y bebida de animales; contacto con la población y fines recreativos; actividades marino costeras; y para conservación del medio ambiente [68].
- **Decreto Legislativo N° 1285:** Que establece disposiciones para la adecuación progresiva a la autorización de vertimientos y a los instrumentos de gestión ambiental [69].

- **Decreto Supremo n° 003-2010-minam - Aprueban límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) domésticas o municipales**, se estableció con la finalidad de controlar excesos en los niveles de concentración de sustancias físicas, químicas y biológicas presentes en efluentes o emisiones de las Plantas de tratamiento de aguas residuales en los cuerpos de agua receptores, para evitar daños a la salud y al ambiente [29].
- **Resolución ministerial N° 128-2017-VIVIENDA Aprueban Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final:** Donde se establece que son residuos sólidos no peligrosos: los lodos generados por las PTAP, PTAR y otros sistemas vinculados a la prestación de los servicios de saneamiento. Salvo excepciones que determine el MVCS (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento). Además, señala que en ningún caso los lodos provenientes de los mencionados sistemas deben ser utilizados sin considerar condiciones sanitarias y ambientales mínimas apropiadas [70].

Descripción del ambiente:

Ambiente físico:

- a) Agua: La captación y conducción de las aguas superficiales que abastecen al Valle Chancay - Lambayeque y afluentes se realizan a través de la bocatoma Raca-Rumi ubicado en el río Chancay, sus aguas son derivadas hacia el Reservorio Tinajones a través de un canal alimentador de 16 km. de longitud, luego el agua es conducida a las lagunas Boró I y Boró II, las cuales realizan operaciones de pre-sedimentación, además regulan el caudal en épocas de emergencia o estiaje. En la planta de agua potable, el agua sigue los procesos de Coagulación, floculación, Decantación, Filtración y Desinfección. A través del Control de calidad se comprueba que los parámetros Físicos-Químicos y Bacteriológicos cumplen las normas guía de la Organización Mundial de la Salud.

Con respecto a las aguas residuales; se ha comprobado que las aguas residuales, procedentes de los emisores principales de Chiclayo, que se desplazan hacia las

lagunas de estabilización, ubicadas en la zona de Pampa de Perros y San José, no solo causan daño a la salud pública por regar con aguas contaminadas, sino que también afectan al sistema ya que interrumpen el libre discurrir de las aguas servidas. Con estas aguas putrefactas se riegan plantaciones de plátano, tomate, y otra clase de productos agrícolas de primera necesidad, así como también alfalfa que se utilizan como alimento para ganado vacuno y los productores de leche.

- b) **Clima:** El distrito de San José es caracterizado por la brisa marina, con vientos uniformes durante casi todo el año en dirección este a oeste. La temperatura promedio máximo anual es de 25,8°C y la mínima anual es de 17,9°C durante los meses de febrero y agosto respectivamente. La humedad atmosférica relativa es alta con un promedio anual de 82% y las precipitaciones son escasas y esporádicas, sin embargo, la presencia del Fenómeno del Niño altera notablemente las precipitaciones que a su vez causan un incremento considerable del caudal de los ríos generando deslizamientos e inundaciones.
- c) **Calidad del aire:** En cuanto a la calidad del aire, los resultados de los programas de vigilancia y control de la calidad de aire, muestra que desde el 2007 se excede el valor de ECA anual del aire para PM10 (50 ug/m³) y desde el 2012 se excede el valor del ECA diario (150 ug/m³). Las principales fuentes de contaminación son el parque automotor (vehículos), industrias (ladrilleras, azucareras, fundiciones) y fuentes de área (panaderías, imprentas y carpinterías); la pesca, la principal actividad de la Caleta San José, genera también contaminación del agua y del aire, debido a la exposición y putrefacción del pescado y otros productos hidrobiológicos.
- d) **Morfología y Suelo:** La morfología incluye una amplia zona costera donde destacan las pampas aluviales y dunas. El suelo es variado en función al tipo de roca madre, clima, vegetación, topografía, etc., en San José es plano y arenoso con muy poca pendiente (0,1 – 2%). Hacia el oeste, los suelos son fértiles y aptos para la agricultura.

Ambiente biológico:

La fauna de la zona está compuesta típicamente por aves marino-costeras, y especies del mar, además de animales domésticos como perros, gatos y aves de corral. La flora del desierto costero es típica en la caleta y los sembríos de arroz, vegetales, hortalizas y maíz en los campos de los agricultores.

Ambiente socio - cultural:

La Caleta de San José, lugar donde están ubicadas las Lagunas de Estabilización del mismo nombre, son un pueblo conocido principalmente por su cercanía al mar y su principal actividad, la pesca artesanal. Localizada a 13 km del centro de Chiclayo y a 4msnm. El Fondo Nacional de Cooperación y Desarrollo, FONCODES califica a la Caleta de San José y sus comunidades (Chornanca, El Mirador, Gallito, Pampa de Perros, Ciudad de Dios, El Carrilo, Grauz, Laguna Verde, San Andrés) en un nivel “no pobre extremo”, Mientras que el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD, la califica como “Bajo - Pobre”, debido a los siguientes aspectos:

- La única vía de acceso es la Carretera Chiclayo – San José, con un alto tránsito de transporte público liviano y algunos pequeños camiones que transportan productos hidrobiológicos o madera para los astilleros.
- Existe una posta médica que atiende las urgencias, campañas de prevención de salud y vacunación, pues las emergencias son trasladadas a los principales hospitales de la ciudad de Chiclayo, son pocos las escuelas para los niveles inicial, primaria y secundaria, el mercado de la zona contiene productos locales, el terminal pesquero, el cementerio y una estación de policía. Según el último censo,
- El índice de analfabetismo es de 5,4% y la malnutrición del 34%.
- La tasa de enfermedades gastrointestinales y dermatológicas es alta y se debe principalmente al consumo de agua contaminada, inadecuada disposición de excretas, inadecuados hábitos de higiene entre la población.
- Muchas de las comunidades no tienen acceso seguro al agua potable y no existen servicios de drenaje.

- Las principales actividades económicas son la pesca, agricultura y los astilleros. El 90% de las viviendas, son construidas de material noble, mientras que el 96% de la población cuenta con título de propiedad de viviendas y terrenos.
- El ingreso promedio mensual es de 403,00 Nuevos soles.
- El servicio eléctrico es ininterrumpido en la Caleta, pero en las comunidades sólo dura unas pocas horas al día, teniendo que optar por otras fuentes de energía como el benceno, velas, gasolina y hasta pequeños grupos electrógenos, sobre todo en los campos de cultivo.
- El 25% de la población no cuenta con servicio de agua potable, desagüe y energía.
- Los residuos sólidos generados en las viviendas son dispuestos en botaderos en las cercanías de la Caleta, convirtiendo los alrededores en focos infecciosos.

Potenciales impactos:

Para la identificación de los impactos potenciales del proyecto, se utilizó la técnica Lista de Chequeo, la Tabla 34 muestra los resultados obtenidos con este análisis.

Se observa que los mayores impactos se presentan en la etapa de Operación y esos están relacionados con el riesgo biológico por la descarga de lodos, emisión de material particulado y olores molestos, además del ruido por el probable incremento de tráfico, posibles impactos paisajísticos por la acumulación de los residuos. Sin embargo, también se reconocen los impactos positivos como obtención de fertilizante orgánico, mejoramiento de la calidad del efluente y por tanto se eleva la calidad ambiental de la zona, trayendo como consecuencia una reducción de la tasa de enfermedades relacionadas con las emisiones de la PTAR. Las fuentes de empleo que se generará son otro indicador de la mejora de la calidad de vida de la zona y del desarrollo de la región. El incremento del interés científico, académico, corporativo e industrial trae consigo progreso y desarrollo para la región, además de la atracción de las inversiones.

Tabla 34: Identificación de los impactos potenciales.

Elemento ambiental	Impactos	Fases del Proyecto			
		Diseño	Construcción	Operación	Abandono
Biológicos	Obtención de Fertilizante orgánico			X	
	Mejoramiento de tierras agrícolas, suelos y otros productos			X	
	Posible riesgo biológico durante la descarga de lodos			X	X
	Incremento de la calidad de agua residual tratada			X	
Agua	Incremento de la calidad del agua de mar en la zona de descarga			X	
	Posibilidad de tratamiento terciario		X	X	
	El efluente no es apto para el consumo humano			X	
	Posible descarga de sustancias tóxicas y no biodegradables		X	X	
Aire, atmósfera y clima	Emisión de material particulado		X	X	X
	Ruido e incremento del tráfico		X		X
	Disminución de la emisión de GEI			X	X
	Reducción y/o eliminación de olores nauseabundos			X	X
Suelo	Fugas de gas			X	X
	Perforaciones y movimientos de tierra		X		X
	Acumulación de residuos sólidos no biodegradables		X	X	X
Social	Reducción de casos de enfermedades gastrointestinales, pulmonares y dermatológicas			X	X
	Incremento del interés científico y educativo	X	X	X	X
	Estimula la conciencia ambiental	X	X	X	X
	Generación de fuentes de empleo	X	X	X	X
Económico	Se puede generar financiamiento para nuevos proyectos	X	X	X	X
	Se generan planes de desarrollo en la región	X	X	X	X
	Se generan planes de contingencia en caso de desastres naturales o incremento del flujo de agua a tratar	X	X	X	

	Otorgamiento de regalías energéticas para la Región			X	
	Posibles periodos de operación irregular durante start up			X	
Cultural	Producción de energía limpia			X	
	Obtención de créditos y Carbono y certificaciones ambientales			X	
	Riesgo de accidentes de trabajo leves	X	X	X	X

Una Matriz de Leopold, permitirá evaluar cualitativamente el impacto que se origina en el medio ambiente por la puesta en marcha de este proyecto.

Medidas de mitigación

En vista, de los impactos identificados y evaluados a través de la Lista de Chequeo y Matriz de Leopold, se deben establecer medidas de mitigación para aquellos impactos que afectan fuertemente la viabilidad ambiental del proyecto.

Así, se deben considerar los programas de prevención de accidentes y exposición a riesgo biológico, por la naturaleza del recurso a tratar, y programas de prevención de la salud en la población de San José; para ellos se deben tener en cuenta:

Tabla 35: Medidas de mitigación para los impactos identificados.

Impacto	Medida
Presencia olores nauseabundos	Instalación de sistemas de aspiración y deodorización en las zonas de almacenamiento y secado del lodo. Adecuación de áreas para el entierro de los residuos sólidos procedentes del pre-tratamiento.
Presencia de ruidos	Cercar el área de la PTAR con plantas de tallo alto (árboles) Limitar el uso de equipos y maquinarias que emitan elevados niveles de ruido a su uso únicamente diurno (durante la fase de construcción).
Impactos sobre la flora y fauna	Evitar que los residuos se esparzan por las dunas de las zonas costeras. Implementar puntos ecológicos para el almacenamiento de residuos provenientes de las actividades administrativas (papel, plásticos, vidrios, empaque y embalajes, baterías, residuos químicos)
Impactos sobre el suelo:	Impermeabilizar sólo las áreas requeridas para el proyecto. Los materiales y mezclas de construcción deben almacenarse y/o prepararse sólo en áreas disponibles para ello. Los movimientos de tierra y las perforaciones deben realizarse evitando afectar las estructuras cercanas y la red de servicios públicos. Reutilizar los materiales inertes productos de las excavaciones y movimientos de tierras en las mismas obras de ser necesario. Los excesos pueden ser útiles en otros trabajos externos.
Peligros y riesgos	Implementar botiquín de primeros auxilios. Realizar vacunación preventiva a los trabajadores para tétano, tifoidea y hepatitis. Implementar reglas tales como No fumar y No usar llamas abiertas cerca de motores eléctricos, almacenes de

combustibles y otros equipos que puedan terminar en explosiones e incendios.

Implementar el uso obligatorio de Equipos de Protección Personal.

Establecer medidas para actuar en caso de emergencia.

Implementar las señalizaciones correspondientes según el trabajo que se realice en cada fase del proceso (extintores, riego eléctrico, riesgo biológico, materiales inflamables, rutas de evacuación, otras normas de seguridad y señales preventivas).

Planes de contingencia	Anticipar las situaciones de paradas innecesarias por pérdida de fluido eléctrico, fallas y averías en los equipos y afloramientos por obstrucciones en los drenes y canales de entradas o salidas del flujo de agua.
Participación ciudadana	Dar a conocer a los pobladores de las zonas a cerca de las mejoras y los beneficios a la salud que traerá este proyecto de mejora del tratamiento del agua residual con valorización de los residuos. Permitir la participación activa de estudiantes, profesores, colegios profesionales, universidades y otras instituciones que con carácter académico deseen aportar científicamente al proyecto.

4.3. Análisis costo - beneficio

Siendo un proyecto de tan grande envergadura que involucra el tratamiento no sólo de las aguas residuales sino también de los lodos depurados, gasificándolos para obtener energía, ponerlo en marcha, requerirá de grandes inversiones a través de Asociaciones Público – Privadas (APP), según el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), en una APP participan el Estado, a través de alguna de las entidades públicas y uno o más inversionistas privados. Este tipo de participaciones se realizan con el objetivo de integrar la experiencia, los conocimientos, equipos y tecnología de los entes participantes, también permite distribuir recursos y riesgos, generalmente privados, para desarrollar o crear mejoras en infraestructura pública, y de servicios públicos.

Las experiencias más cercanas a nuestra región, demuestran la totalidad de las inversiones. En Latinoamérica, la Empresa Pública de Alcantarillado de Santander, Empas, invertirá \$35 mil millones para la modernización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Río Frío [71]. Según [72] instalar una planta de tratamiento de aguas residuales a partir de UASB en la provincia de Lambayeque para atender una población de 37 036 habitantes se requiere una inversión de 4 259 140 dólares americanos.

En cuanto a la inversión para producir 210 Kw-h de energía por la gasificación del lodo, la Tabla 36 resume la inversión inicial:

Tabla 36: Inversión aproximada para gasificación del lodo:

Equipo	Sub total	Total
Sistema gasificación completo	1	2 500 000
Equipos de limpieza e instalaciones adicionales	1	1 300 000
Generador	1MW	500 000
Permisos	20% total	600 000
	Total	4 900 000

Una aproximación de la inversión total que se requerirá para poner en marcha esta propuesta que atenderá una población aproximada de 320 000 habitantes, se muestra en la Tabla 38.

Tabla 37: Inversión total aproximada.

		Cantidad	Subtotal	Total (US\$)
Maquinaria	Tratamiento de agua (preliminar, primario, UASB, lagunas, canal de salida)	1	36 989 005,00	36 989 005,00
	Secado de lodos	1	30 000,00	30 000,00
	Planta de gasificación	1	8 400 000,00	4 900 000,00
	Grupo electrógeno, generador y cableado	1	500 000,00	500 000,00
Sub Total				45 919 005,00
Herramientas, muebles y equipos	Vehículos	1	40 000,00	40 000,00
	Equipo de seguridad	1	15 000,00	15 000,00
	Herramientas para mantenimiento	1	10 000,00	10 000,00
	útiles de Oficina	7	5 000,00	35 000,00
Sub Total				100 000,00
Organización	Trámites administrativos y jurídico	1	5 000,00	5 000,00
	Estudio topográfico	1	5 000,00	5 000,00
	Estudios técnicos	1	10 000,00	10 000,00
Sub Total				20 000,00
Otros	Licencia municipal	1	900,00	900,00
	Sub Total			
			TOTAL	42 539 905,00

Los costos de operación de la Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, se resumen en la Tabla 38:

Tabla 38: Costos de operación de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

Tratamiento	Rango de costos US\$/hab-año
Preliminar	0,07 – 0,30
Primario	0,23 – 0,81
Reactores UASB	0,07 – 0,27
Lecho de secado	0,31 – 2,08

Fuente: [72]

Se asume entonces, que los costos totales de operación del sistema de tratamiento de agua residual son en promedio 2,07 dólares/habitante.año; equivalente a 662 400 US\$ anuales.

En cuanto a los costos de operación para el sistema de gasificación, estos se resumen en la Tabla 39.

Tabla 39: Costos de operación del Sistema de Gasificación del Lodo

Equipos	Total US\$
Alimentación de la materia	639 846
Operación y Mantenimiento del gasificador	1 385 000
Total	2 024 846

Fuente: Adaptado de [73]

De este modo, la inversión total al primer año de operación asciende a: **45 227 151 US\$**.

BENEFICIOS

Según El D.L. N° 1278 que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, las entidades generadoras de los residuos deben gestionar adecuadamente la segregación, almacenamiento, recolección, valorización, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final de los mismos. Siendo la valorización una actividad que se debe priorizar frente a la disposición final, estas incluyen actividades de reciclaje, compostaje, valorización energética entre otras alternativas, además se debe considerar la infraestructura adecuada y autorizada para tal fin.

La presente investigación pretende resaltar los beneficios sociales y ambientales que trae consigo su implementación, antes que los económicos. Pues, para la elevada inversión que demanda, a partir un estudio económico - financiero podría determinarse la poca rentabilidad del proyecto, sin embargo, es necesario afirmar también que otros estudios deben implementarse para obtener cifras económicas más cercanas a la realidad.

Por ende, los beneficios sociales y ambientales, en este caso, se antepone a los económicos, considerando las limitaciones y el alcance de esta investigación:

- Cada vez son mayores las multas interpuestas a EPSEL S.A. por aniegos en las calles y por vertimientos inapropiados a campos de cultivo.
- En el 2016, la Municipalidad de La Victoria multó con 2 400 000 soles por aniegos en el distrito.
- En los distritos de San José y Pimentel, más de 800 hectáreas de cultivo, especialmente de tallo que sirven de alimento para ganado y verduras como tomate, rabanito, repollo y lechuga son regadas con aguas residuales que provienen de la PTAR San José y ofertadas en distintos mercados de Chiclayo.
- Los vecinos de las comunidades cercanas a Pimentel y San José, mantienen constante un gasto destinado a la compra de medicamentos para atacar las enfermedades gastro-intestinales que padecen, siendo los más vulnerables, niños y ancianos.

Los beneficios que se obtiene del presente proyecto son:

- Producción de agua para riego de cultivos: Los costos promedio agua en la costa norte del Perú son de 650 nuevos soles al año/hectárea.
- Producción de biogás: el biogás producido en el UASB tiene distintas aplicaciones: combustión para generar electricidad y con ello autoabastecimiento energético de la planta.
- Producción de lodos: Los lodos obtenidos de un UASB, tiene un alto contenido de materia orgánica nitrogenada que puede servir para abono de plantas, es decir, el lodo de las PTAR tiene valor económico como fertilizante.
- Gas de síntesis: El gas obtenido de la gasificación, al igual que el biogás, tiene posibilidades de aplicación en usos energéticos. En la presente investigación no

se han estudiado los equipos apropiados para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, podemos afirmar su potencial energético y por ende valor económico.

FINANCIAMIENTO

El Estado, a través del Ministerio de Vivienda, ha aprobado resoluciones donde se establecen y aprueba planes de inversiones en el Sector saneamiento, especialmente, las solicitudes de financiamiento que presenten los diferentes niveles de gobierno: regional, local y EPS, para proyecto de agua y saneamiento rural y en ciudades

V. CONCLUSIONES

En la presente investigación se ha desarrollado un modelo de valorización energética de lodo proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales para reducir el riesgo de impacto negativo al ambiente; concluyendo que el lodo residual de depuradora es un residuo con potencial aprovechamiento energético, sin embargo, se requiere el uso de tecnología sofisticada para su conversión energética, los estudios realizados demuestran que la gasificación del lodo es un proceso complejo que requiere además fuentes de energía externa para su óptimo funcionamiento, existiendo un balance energético poco favorable para los objetivos que se desean conseguir.

Durante la etapa de diagnóstico se ha determinado que el actual sistema de Tratamiento de Aguas residuales de la ciudad de Chiclayo presenta únicamente las etapas de tratamiento preliminar y secundaria, incumpliendo las normativas vigentes de SUNASS y ANA sobre la tecnología a emplear para el tratamiento de este residuo. Los niveles de concentración de contaminantes presentan una tendencia a incrementarse, esto debido a que los lodos residuales del fondo de la laguna nunca han sido descolmatados. De este modo también, surge un efecto poco favorable durante los procesos depuración, ocasionando que el efluente de la PTAR no cumple con los parámetros exigidos por las autoridades competentes como LMP y ECA del agua. Por lo cual, es necesario, realizar una reingeniería de la planta para implementar las etapas de tratamiento pendientes como pre-tratamiento (cribado grueso y fino), tratamiento primario (desarenador y medidor de caudales) y mejorar la etapa secundaria (Reactores UASB y lagunas de estabilización), así como el potencial aprovechamiento del biogás (desulfuración y combustión) y del lodo (secado y aprovechamiento energético mediante gasificación). De este modo se determinan eficiencias de remoción de contaminantes de hasta 91% para DBO₅ y DQO y 99,9% para Coliformes fecales.

En cuanto a las características físico-químicas del lodo, estas se han determinado a partir de la revisión exhaustiva de diversas investigaciones locales, nacionales e internacionales para determinar la composición de C, H, N, O, S y H₂O; y con ello determinar el PCI del lodo a través del método de Dulong en 9,20 MJ/kg. Con ello, los lodos pueden ser aprovechados, previo proceso de deshidratación para eliminar el exceso del agua en rangos mayores al 80 –

85%. La Tecnología de deshidratado solar tipo invernadero se presenta como la más adecuada para alcanzar este objetivo.

El modelo de valorización energética del lodo comprende su tratamiento a través del proceso de gasificación, para un mayor aprovechamiento energético. El software Aspen Plus, fue la herramienta utilizada para simular el proceso de gasificación del lodo, usando dos patrones de reactores: uno isotérmico y otro adiabático. El reactor isotérmico, en condiciones ideales, permite obtener valores satisfactorios de PCI en el syngas de alrededor de $8\text{MJ}/\text{Nm}^3$, sin embargo, es un modelo poco cercano a la realidad industrial. Las simulaciones con el patrón adiabático, en cambio determinan que el valor del PCI se reduce drásticamente casi en 50%, obteniendo aproximadamente $4,5\text{MJ}/\text{Nm}^3$ de potencial energético en el syngas, esto debido al nulo intercambio de calor con el externo, se necesita una inyección de calor proveniente de una fuente externa, esta puede darse a través de la inyección del agente oxidante (aire) a Temperatura elevada (450°C) y con un flujo másico de $1500\text{kg}/\text{h}$, 50% más del flujo másico de lodo alimentado al reactor ($1000\text{kg}/\text{h}$). Así, existe el riesgo de un desbalance desfavorable entre la cantidad de energía obtenida y la cantidad de energía requerida para el óptimo funcionamiento del gasificador.

Otras simulaciones se han proyectado, con el objetivo de mejorar el PCI del syngas, y aprovechando a su vez los residuos agrícolas y agroindustriales de nuestra región, reconocida como una de las de mayor potencial energético de biomasa residual en el País. Estas pruebas muestran que medida que se incrementa el porcentaje de biomasa residual en la mezcla de lodo alimentada al gasificador, se incrementa ligeramente el PCI del syngas y se reduce la cantidad del oxidante requerido para la combustión. En proporciones menores a 30% de biomasa en la mezcla, no se obtienen variaciones considerables en el PCI, mientras que para proporciones mayores al 70%, se pierde el valor de la valorización del lodo, objeto de estudio de la presente investigación.

Desde el punto de vista ambiental, se demuestra que se reduce el riesgo de impacto negativo con el ambiente, dada la valorización de un residuo, cuya disposición inadecuada genera elevadas tasas de enfermedades gastrointestinales, dermatológicas y respiratorias.

VI. RECOMENDACIONES

Se sugiere continuar la investigación, en diversas aristas como:

- Mayores análisis en cuanto a la composición elemental del lodo depositado en el fondo de las lagunas de estabilización de San José.
- Balance de energía en el proceso de gasificación.
- Propuesta de diseño industrial para una planta piloto de gasificación considerando todos los equipos necesarios (tanque de alimentación de biomasa, ciclón para purificación del gas, quemadores, turbinas, compresores, calderas, etc.)

VII. LISTA DE REFERENCIAS

- [1] Tyndall Center for Climate Change Research, «Can Photography Change the Way We See Climate Change?,» 29 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.tyndall.ac.uk/news/can-photography-change-way-we-see-climate-change>. [Último acceso: 03 Julio 2019].
- [2] Universidad Católica San Pablo, «Perú es uno de los países más vulnerables, pero también más atrasado frente al cambio climático,» 18 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://ucsp.edu.pe/saladeprensa/informa/peru-es-uno-de-los-paises-mas-vulnerable-pero-tambien-mas-atrasado-frente-al-cambio-climatico/>. [Último acceso: 03 Julio 2019].
- [3] Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, «La Fiscalización en Residuos Sólidos,» Febrero 2019. [En línea]. Available: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=6471. [Último acceso: 03 Julio 2019].
- [4] F. Colomer, A. Gallardo, F. Robles, D. Bovea y L. Herrera, «Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales.,» vol. 144, Mérida: Universidad autónoma de Yucatán, 2010, pp. 177-190.
- [5] R. Font, M. Gomez-Rico y A. Fullana, «Skin effect in the heat and mass transfer model for sewage sludge drying,» *Separation and Purification Technology*, nº 77, p. 146–161, 2011.
- [6] A. Lowman, M. A. McDonald, W. Steve y N. Muhammad, «Land Application of Treated Sewage Sludge: Community Health and Environmental Justice,» *Environ Health Perspectives*, vol. 5, nº 121, p. 537–542., 2013.
- [7] J. Francisco Atencio, P. Ramos Matías y G. Aguirre Yato, «Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra – Lima,» *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 77, nº 1, 2011.
- [8] R. Burga, «Valoración de lodos sedimentados generados en las lagunas de estabilización de EPSEL para uso como abono orgánico.,» Chiclayo, 2014.
- [9] Real Academia Española, «Diccionario de la lengua española,» 2019. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/?id=5YtOE4H>. [Último acceso: 06 Setiembre 2019].
- [10] Unión Europea, «Diario Oficial de la Unión Europea,» 08 Mayo 2003. [En línea]. Available: <http://www.ebb-eu.org/legis/OJ%20promotion%20ES.pdf>. [Último acceso: 01 Setiembre 2016].
- [11] New Energy System Trade, «Biomasa,» [En línea]. Available: <http://nest-sl.com/biomasa-que-es.php>.

- [12] S. Braatz y A. Kandiah, «Utilización de aguas residuales urbanas para el riego de árboles y bosques,» *Unasyuva - Influencias en los bosques*, vol. 47, n° 185, 1996.
- [13] L. Da Camara, M. Hernandez y L. Paz, «Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias.,» Departamento de fenómeno de transporte, Argentina, Sin fecha.
- [14] C. Vitorio, M. Von Sperling y F. Fernandes, *Biological wastewater treatment: Sludge treatment and disposal*, New Delhi, India.: IWA Publishing, 2007.
- [15] J. Romero, *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principios de diseño*, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2013.
- [16] D. Moratorio, I. Rocco y M. Castelli, «Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía,» *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, n° 10, 2012.
- [17] Northern Utilities, «Combined Heat and Power,» [En línea]. Available: <http://northernutilities.co.uk/combined-heat-and-power/>. [Último acceso: 10 Setiembre 2016].
- [18] X. E. Castells, *Los residuos como combustibles*, Madrid: Diez de Santos, 2012.
- [19] B. Bosio, E. Arato y P. Creppi, «Fuel Cell Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology,» *Fuel Cell Science and Engineering*, pp. 67-95, 2012.
- [20] Ministerio del Ambiente (MINAM), *Guía para la identificación y caracterización de impactos ambientales*, Lima, Perú: MINAM, 2018.
- [21] A. Amador, E. Veliz y M. Bataller, «Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones.,» *Revista Cenic Ciencias Químicas*, vol. 46, 2015.
- [22] European Commission, «Sewage Sludge,» 08 Junio 2016. [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/>.
- [23] Aquasistec, «Planta de tratamiento de aguas residuales,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.aguasistec.com/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales.php>.
- [24] REPSOL, «Informe de Sostenibilidad,» 2016. [En línea]. Available: https://www.repsol.com/imagenes/global/es/informe_sostenibilidad_repsol_2016_tcm13-63403.pdf.
- [25] R. Hernández, E. Zapata y C. Mendoza, *Metodología de la Investigación*, México D.F.: Mc Graw Hill Educación, 2013.
- [26] Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento de Lambayeque - EPSEL, «Ciclo Operacional del Alcantarillado,» 2013. [En línea]. Available:

- <http://www.epsel.com.pe/Presentacion/WFrmServicioAL.aspx>. [Último acceso: 20 Setiembre 2016].
- [27] Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento de Lambayeque - EPSEL, «Resultados de análisis físico-químicos y microbiológicos. Lagunas de estabilización,» Chiclayo, 2018.
- [28] Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento de Lambayeque - EPSEL, «San José, limpian canal de descarga de aguas tratadas en el distrito,» Octubre 2018. [En línea]. Available: <http://www.epsel.com.pe/Portal/archivo/3958>.
- [29] Ministerio del Ambiente - MINAM, «Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. Aprueban Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento Residuales Domésticas o Municipales,» *El Peruano*, 17 Marzo 2010.
- [30] Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), «Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operaciones de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento,» Setiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf>.
- [31] Autoridad Nacional del Agua - ANA, «Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338,» 23 Marzo 2009. [En línea]. Available: https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/ley_29338_0_2.pdf.
- [32] Autoridad Nacional del Agua - ANA, «Resolución Jefatural N°224 - 2013,» 31 Mayo 2013. [En línea]. Available: https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j.224_con_reglamento_autorizaciones_de_vertimientos_6_0.pdf.
- [33] *El rol de la Sunass ante la problemática generada por las aguas residuales*. [Performance]. 2016.
- [34] RPP Noticias, «Contraloría detecta que aguas residuales son utilizadas para regar cultivos,» 19 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://rpp.pe/peru/actualidad/contraloria-detecta-que-aguas-residuales-son-utilizadas-para-regar-cultivos-noticia-1051684>.
- [35] Diario Correo, «Aguas de emisores atentan contra la salud pública y el medio ambiente,» 19 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://diariocorreo.pe/edicion/lambayeque/aguas-de-emisores-atentan-contra-la-salud-publica-y-el-medio-ambiente-750679/>.
- [36] United States Environmental Protection Agency - EPA, «Wastewater Technology Fact Sheet. Screening and Removal,» Junio 2003. [En línea]. Available: https://www3.epa.gov/npdes/pubs/final_sgrit_removal.pdf.

- [37] G. Tchobanoglous, F. Burton y D. Stensel, *Wastewater Engineering: treatment and reuse*, Londres: Metcalf & Eddy Inc, 2014.
- [38] Comisión Nacional del Agua de México - CONAGUA, «Manual de agua potable , alcantarillado y Saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos avanzados con fines de reuso,» Abril 2016. [En línea]. Available: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro35.pdf>.
- [39] Gestione Acqua S.P.A., «Adeguamento dell'impianto di depurazione delle acque reflue urbane del comune di Novi Ligure (AL). Relazione Tecnica,» Milan, 2010.
- [40] Empresa Pública de Alcantarillado de Santander, Escritor, *Ampliación y modernización planta de tratamiento de aguas residuales Rio Frio*. [Performance]. 2009.
- [41] Empresa Pública de Alcantarillado de Santander, «Informe de Gestión,» 20 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.empas.gov.co/wp-content/uploads/2018/04/INFORME-DE-GESTION-EMPAS-2017-WEB.pdf>.
- [42] La República, «Lagunas de San José y Pampas de Perros soportan más de 240 mil metros cúbicos de sedimento,» 14 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://larepublica.pe/archivo/855995-lagunas-de-san-jose-y-pampas-de-perros-soportan-mas-de-240-mil-metros-cubicos-de-sedimento>.
- [43] El Peruano, «Norma Técnica OS.090: Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales,» *El Peruano*, pp. 84 - 104, 23 Mayo 2006.
- [44] Miniterio de Agricultura - Autoridad Nacional del Agua, «Manual de Buenas Prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales.,» Abril 2016. [En línea]. Available: https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/manual_de_buenas_practicas_para_el_uso_seguro_y_productivo_de_las_aguas_residuales_domesticas.pdf. [Último acceso: 01 Diciembre 2018].
- [45] Autoridad Nacional del Agua - Ministerio de Agricultura, «Manual de Buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas,» Abril 2016. [En línea]. Available: https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/manual_de_buenas_practicas_para_el_uso_seguro_y_productivo_de_las_aguas_residuales_domesticas.pdf.
- [46] C. Moliner, «Reduction of nitrates in waste water through the valorization of rice straw: LIFE LIBERNITRATE project,» *Sustainability*, Agosto 2018.
- [47] X. Xue, D. Chen, X. Song y X. Dai, «Hydrothermal and Pyrolysis Treatment for Sewage Sludge: Choice from Product and from Energy Benefit,» *Energy Procedia*, vol. 66, pp. 301 - 304, 2015.

- [48] S. Bellur, C. Coronella y V. Vasquez, «Analysis of biosolids equilibrium moisture and drying,» *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 28, n° 2, p. 291-298, 2009.
- [49] C. Coronella y V. Vasquez, «System and Method for energy production from sludge». Estados Unidos Patente US 8.499.471 B2 , 6 Agosto 2013.
- [50] Rashwan y Tarek, «Self-Sustaining Smouldering Combustion as a Novel Disposal Destruction Method for Waste Water Biosolids,» Ontario, 2015.
- [51] Z. Chávez, J. Colonia, B. Bosio y E. Arato, *Large Scale Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) for energy production in a peruvian community.*, Venecia, 2012.
- [52] A. Pacco, R. Vela, R. Miglio, L. Quipuzco, J. Juscamaita, C. Álvarez y F. Fernández, «Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas,» *Scientia Agropecuaria*, p. 381 – 391, 2018.
- [53] F. Osorio y J. Torres, «Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production,» *Renewable Energy*, vol. 34, n° 10, pp. 2164-2171, 2009.
- [54] C. De Lemos, *Biological wastewater treatment: Anaerobic reactors*, 1 st ed ed., New Delhi: Iwa Publishing, 2007.
- [55] F. Murcia, «Lodos de Depuradora: una Visión Integral,» Murcia, 2013.
- [56] I. Gonzales, «Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR,» Córdova, 2015.
- [57] C. Diocaretz y G. Vidal, «Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas.,» *Theoria*, vol. 19, n° 1, pp. 51 - 60, 2010.
- [58] Huber Technology, «Secado Solar de Lodos SRT,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.huber-technology.cl/es/productos/tratamiento-de-fangos/secado/huber-secado-solar-srt.html>.
- [59] Z. Chávez, «Large Scale Wastewater Treatment Plant with Energy Valorization of Sewage Sludge,» Genova, 2013.
- [60] K. Lara y W. Gallegos, «Caracterización y Evaluación de lodos de depuración provenientes de la Planta Piloto de tratamiento de aguas residuales de la EMPAS - AGUA Quito para su aprovechamiento en la generación de energía.,» *Ciencias Ambientales*, 2017.
- [61] M. Aiello, D. Bacchi, A. Bellini, M. Puccini, M. Seggiani y S. Vitolo, «Sewage Sludge gasification in a Pilot Scale Plant,» Venecia, 2010.

- [62] Carbón Biomasa PUCP, «BIOMAP PUCP Lambayeque,» 2012. [En línea]. Available: <http://carbonbiomasa.pucp.edu.pe/centro-de-investigacion/biomap/#lambayeque>.
- [63] MINAM, «Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental,» [En línea]. Available: <http://www.minam.gob.pe/legislaciones/sistema-nacional-de-evaluacion-de-impacto-ambiental/>.
- [64] Ministerio del Ambiente, «Ley General del Ambiente,» 09 Junio 2009. [En línea]. Available: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/10/ley_general_del_ambiente_ley_28611.pdf.
- [65] Ministerio del Ambiente, «Ley marco del sistema nacional de gestión ambiental - LEY N° 28245,» 08 Junio 2004. [En línea]. Available: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/10/ley-SNGA-28245.pdf>.
- [66] Comisión Multisectorial - Consejo de Ministros, «Ejes estratégicos de la Gestión Ambiental,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/06/EJES-ESTRATEGICOS-DE-LA-GESTION-AMBIENTAL.pdf>.
- [67] Ministerio del Ambiente, «Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental y su Reglamento,» Noviembre 2013. [En línea]. Available: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/10/Ley-y-reglamento-del-SEIA1.pdf>.
- [68] Ministerio del Ambiente, «Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM .- Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias,» 07 Junio 2017. [En línea]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>.
- [69] Ministerio del Ambiente, «Decreto Legislativo N° 1285,» 08 Junio 2017. [En línea]. Available: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DLeg-1285.pdf>.
- [70] Ministerio de Vivienda, «Resolución Ministerial N° 128-2017-Vivienda,» 05 Abril 2017. [En línea]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/12302-128-2017-vivienda>.
- [71] Vanguardia, «Invertirán \$35 mil millones más en la planta de Río Frío en Floridablanca,» 23 Marzo 2016.
- [72] G. Allende y A. Mendoza, «Proyecto de diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del distrito de Lambayeque con el uso de un reactor UASB,» Lambayeque, 2018.

[73] C. Martinez, «Estudio tecno-económico de una planta de gasificación de residuos sólidos urbanos para aplicaciones de caldera y motor,» Sevilla, 2016.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Formulas empleadas en el cálculo de la Eficiencia de remoción de contaminantes en un reactor UASB

La eficiencia de remoción de contaminantes en el tratamiento del agua residual en el reactor UASB, ha sido determinada por:

$$E_{\text{COD}} = 100 \cdot (1 - 0.68 \cdot \text{HRT}^{-0.35})$$

$$E_{\text{BOD}} = 100 \cdot (1 - 0.70 \cdot \text{HRT}^{-0.50})$$

Dónde: HRT es Tiempo de retención hidráulico (por sus siglas en inglés).

Mientras que, para los Coliformes fecales, la eficiencia de remoción depende de la constante cinética de la eliminación de las bacterias (σ):

$$E_{\text{FC}} \rightarrow \ln \left[\frac{N_{\text{FC-UASB}(0)}}{N_{\text{FC-UASB}}} \right] = \sigma \cdot \text{HRT} \quad (3)$$

Donde

$$\sigma = \sigma(20^\circ\text{C}) \cdot (1.19^{(T-20)}) \quad (4)$$

Donde E_{COD} , E_{BOD} and E_{FC} son expresados en %, y el HRT in hours. $\sigma(20^\circ\text{C})$ es igual a 2.60 d^{-1} y $T = 35^\circ$ (temperatura interna del reactor).

Anexo 2: Datos utilizados para el dimensionamiento del sistema de tratamiento del agua residual propuesto para la PTAR San José.

Tabla 40: Parámetros de diseño para el dimensionamiento:

Parameter	Measure unit	Date
Población total	N. habitantes	574 000,00
Población servida	N. habitantes	332 000,00
Caudal máximo	m ³ /h	3 026,22
Caudal de diseño	m ³ /h	2 853,03
Caudal mínimo	m ³ /h	1 516,56
Promedio de precipitaciones anuales	mm/mes	55,00
Promedio de precipitaciones extraordinarias	mm/mes	250 - 402
Periodos de lluvia	Meses	Diciembre - Abril
Demanda biológica de Oxígeno (DBO ₅)	kg/h	647,67
Concentración promedio DBO ₅	mg/l	227,01
Demanda Química de oxígeno DQO	kg/h	971,50
Concentración promedio COD	mg/l	340,52
Concentración promedio SST*	mg/l	250,00**
Concentración de Coliformes Fecales	NMP/100ml	4,11E+07
pH	-	7,60
Temperatura	°C	Invierno: 14,5 - 20°C Verano: 28.0 - 32°C

*SST: Sólidos Suspendidos Totales.

** Se asumió el máximo valor permitido por las leyes peruanas.

Fuente: [51]

Tabla 41: Dimensiones de los reactores UASB en PTAR San José.

Criterios de diseño	Valores
Principal precedente	PTAR Río Frío, Bucaramanga
Diseño	Modular
Número de reactores	5
Número de módulos por reactor	18
Altura total	4,10 m en la zona de digestión (2 m por debajo del nivel del suelo)
Volumen total	3 350 m ³
Tiempo de Retención Hidráulico	6 h
Dimensiones por módulo	9,5 x 5,0 m
Dimensiones del reactor	19 x 45 m
Área total de reactores	1,04 Ha
Velocidad de ascenso del agua	0,7 m/h
Carga volumétrica orgánica	1,63 kgDQO/m ³ .d

Fuente: [51]

Tabla 42: Dimensiones de otros componentes de los reactores UASB.

Parámetro	Valores
Sistema del distribución del agua	
Diámetro de los tubos del sistema de distribución del agua	100 mm
Número de puntos de distribución	18
Área de influencia de cada punto del sistema	2,6 m ²
Separador tri-fásico (G-L-S)	
Número de campanas por cada módulo	2
Carga hidráulica	0,66
Área del separador	5,92 m ²
Velocidad de ascenso del agua en la base del separador	2,76 m/h
Velocidad de salida del efluente	0,86 m/h
Volumen del compartimiento del sedimentador	58,24 m ³
Tiempo de Retención hidráulico en el separador	1,84 h
Descarga del lodo	
Diámetro de las tuberías de descarga	150 mm
Distancia entre puntos de descarga	0,50 m
Número de puntos de descarga (vertical)	3
Distancia del fondo de reactor al primer punto de descarga.	1,5 cm

Fuente: [51]

Tabla 43: Eficiencia de los reactores en PTAR propuesta San José.

Parámetros	Valores
Concentración de DBO ₅ en el agua residual cruda	227,01 mg/l
Concentración de DQO en el agua residual cruda	340,52 mg/l
Concentración de Coliformes Fecales en el agua residual cruda	4,11E+07 NMP/100ml
Concentración de DBO ₅ en el reactor UASB	64,9 mg/l
Concentración de DQO en el reactor UASB	123,7 mg/l
Concentración de Coliformes Fecales en el reactor UASB	6,25E+06 NMP/100ml
Eficiencia de remoción de DBO ₅	71,4%
Eficiencia de remoción de DQO	63,7%
Eficiencia de remoción de Coliformes Fecales	89,7%

Fuente: [51]

Tabla 44: Diseño de post-tratamiento y características del efluente final.

Parámetros	Valores
Caudal de agua por laguna	13 692,22 m ³ /d
Volumen de cada laguna	102 000 m ³
Tiempo de retención hidráulico	10 d
Área requerida por cada laguna	53 300 m ²
Dimensiones de cada laguna	245 * 220 * 1,8
Temperatura del agua en el mes más frío	20°C
Concentración de DBO ₅ en el efluente final	20,14 mg/L
Concentración de DQO en el efluente final	61,31 mg/L
Concentración de Coliformes Fecales en el efluente final	4,96E+04 NMP/100ml
Eficiencia de remoción de DBO ₅	91%
Eficiencia de remoción de DQO	82,1 %
Eficiencia de remoción de Coliformes Fecales	99,9%

Fuente: [51]