

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“PROPUESTAS DE ESTABILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE
LODOS DE PTAR Y BES EN PERÚ BASADAS EN SU
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERA AMBIENTAL**

GIANELLA MILAGROS CANDELA LEVANO

LIMA – PERÚ

2020

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24-Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“PROPUESTAS DE ESTABILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE
LODOS DE PTAR Y BES EN PERÚ BASADAS EN SU
CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA”**

Presentada por:

Gianella Milagros Candela Levano

Tesis para optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ph. D. Lizardo Visitación Figueroa
PRESIDENTE

Ph. D. José Luis Calle Maravi
MIEMBRO

Ing. Lawrence Enrique Quipuzco Ushñahua
MIEMBRO

Mg. Sc. Rosa María Milgio Toledo
ASESORA

Dra. Rosemary Vela Cardich
CO-ASESORA

DEDICATORIA

A mi mamá, Rosilú, por su ejemplo de amor, entrega y lucha a la vida.

A mi papá, Martín, por enseñarme a soñar.

A mis hermanos, Jorge y Juan, por alegrar mis días.

A mi compañero de vida, Angel, por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A la Mg. Rosa Miglio por darme la oportunidad de desarrollar la presente investigación.
Muchas Gracias.

A la Dr. Rosemary Vela por su alegría, tiempo y apoyo brindados.

A SEDAPAL, SEDACUSCO, SEDAPAR y SEDA AYACUCHO por la confianza y facilidades concedidas durante los muestreos.

Al Laboratorio de Energías Renovables, en especial a Angela Castillo por su paciencia y comprensión.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental, en especial a Edgar Giraldo por su ayuda constante.

Al Laboratorio de Saneamiento y Medio Ambiente, en especial a Erika Cadillo por su dedicación.

A mis amigas, Valery, Marycielo y Maryori, por todas las sonrisas, consejos y anécdotas vividas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	Planta de tratamiento de aguas residuales.....	3
2.1.1.	Sistemas de tratamiento aerobio de aguas residuales	3
2.1.2.	Sistema de tratamiento anaerobio de aguas residuales.....	4
2.2.	Baños ecológicos secos.....	4
2.3.	Lodos	5
2.3.1.	Lodos provenientes de PTAR.....	5
2.3.2.	Lodos provenientes de sistemas de saneamiento <i>in situ</i>	13
2.3.3.	Biosólido.....	17
2.4.	Marco legal	17
2.5.	Tecnologías de estabilización de lodos.....	19
2.5.1.	Digestión anaerobia	19
2.5.2.	Compostaje	20
2.5.3.	Tratamiento alcalino	23
2.5.4.	Secado térmico	24
2.5.5.	Lecho de secado convencional	25
2.6.	Métodos de aprovechamiento de lodos.....	25
2.6.1.	Aprovechamiento agronómico	25
2.6.2.	Aprovechamiento energético.....	28
III.	METODOLOGÍA Y MATERIALES	35
3.1.	Metodología.....	35
3.1.1.	Selección de parámetros de análisis y laboratorios	35
3.1.2.	Selección de sistemas de saneamiento.....	36

3.1.3.	Selección de puntos de muestreo.....	38
3.1.4.	Estimación de las cantidades producidas de lodos	43
3.1.5.	Toma y manejo de muestras	43
3.1.6.	Determinación del cumplimiento del DS-N°015-2017-VIVIENDA	45
3.1.7.	Selección de alternativas de estabilización y aprovechamiento de lodos.....	45
3.2.	Materiales.....	46
3.2.1.	Toma de muestra	46
3.2.2.	Materiales de laboratorio	46
3.2.3.	Equipos de laboratorio.....	46
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
4.1.	Producción de lodos.....	47
4.1.1.	PTAR.....	47
4.1.2.	BES.....	51
4.2.	Cumplimiento de los parámetros del DS-N°015-2017-VIVIENDA	52
4.2.1.	Parámetros de estabilización	52
4.2.2.	Parámetros de toxicidad química.....	59
4.2.3.	Parámetros de higienización.....	64
4.3.	Parámetros de aprovechamiento agronómico	70
4.3.1.	Contenido de nutrientes	70
4.4.	Parámetros de aprovechamiento energético.....	75
4.4.1.	Contenido energético.....	75
4.4.2.	Análisis proximal.....	78
4.5.	Propuestas de estabilización y aprovechamiento.....	81
V.	CONCLUSIONES	89
VI.	RECOMENDACIONES	91
VII.	BIBLIOGRAFÍA	92
VIII.	ANEXOS	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sistemas de tratamiento de aguas residuales y el correspondiente grado de estabilización de los lodos	7
Tabla 2: Contenido de ST y producción per cápita de lodos generados en diferentes sistemas y etapas de tratamiento de aguas residuales.....	8
Tabla 3: Tratamiento de agua y lodos residuales en PTAR procedentes de México	10
Tabla 4: Concentración de metales pesados en lodos residuales de México (mg/kg ST)...	12
Tabla 5: Características fisicoquímicas de lodos fecales de VIP y UDDT	15
Tabla 6: Características fisicoquímicas de lodos fecales de baños públicos, tanque séptico y lodos de EDAR	16
Tabla 7: Composición fisicoquímica de lodos crudos y biosólidos	17
Tabla 8: Parámetros de estabilización en biosólidos de Clase A y B.....	18
Tabla 9: Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y B.....	19
Tabla 10: Parámetros de higienización.....	19
Tabla 11: Parámetros en el compostaje	22
Tabla 12: Contenido de N, P, K en el compost	23
Tabla 13: Cantidad requerida de cal (pH:12)	24
Tabla 14: Composición agronómica de fertilizantes minerales simples	27
Tabla 15: Composición agronómica de fertilizantes minerales multi nutrientes	28
Tabla 16: Contenido típico de N-P-K en los lodos.....	28
Tabla 17: Características de diferentes tipos de gases.....	29
Tabla 18: Contenido de biogás generado en diferentes tipos de lodos.....	30
Tabla 19: Poder calórico de diferentes tipos de lodos	33
Tabla 20: Análisis proximal, elemental y calórico de diferentes tipos de lodos	33
Tabla 21: Metodologías de medición de parámetros fisicoquímicos	35
Tabla 22: Metodologías de medición de parámetros microbiológicos.....	36
Tabla 23: PTAR seleccionadas.....	36
Tabla 24: Sistemas de saneamiento in situ seleccionados.....	37
Tabla 25: Producción de lodos mensual en las PTAR de SEDAPAL.....	50
Tabla 26: Producción mínima y máxima de lodos por mes, en las PTAR de SEDAPAL ..	50
Tabla 27: Producción promedio mensual de lodos en las PTAR de provincias.....	51

Tabla 28: Producción promedio anual de lodos fecales por familia en los BES.....	52
Tabla 29: Concentración promedio de sólidos en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	55
Tabla 30: Concentración promedio de sólidos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	57
Tabla 31: Concentración promedio de sólidos en lodos fecales de BES.....	58
Tabla 32: Concentración promedio de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	60
Tabla 33: Concentración promedio de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	61
Tabla 34: Concentración promedio de metales pesados en lodos fecales de BES.....	63
Tabla 35: Concentración promedio de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	66
Tabla 36: Concentración promedio de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	67
Tabla 37: Concentración promedio de microorganismos patógenos en lodos fecales de BES.....	69
Tabla 38: Concentración promedio de nutrientes en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	73
Tabla 39: Concentración promedio de nutrientes en lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	74
Tabla 40: Concentración promedio de nutrientes en lodos fecales de BES.....	75
Tabla 41: Contenido energético promedio de lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	77
Tabla 42: Contenido energético promedio de lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	77
Tabla 43: Contenido energético promedio de lodos fecales de BES.....	78
Tabla 44: Análisis proximal promedio de lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	80
Tabla 45: Análisis proximal promedio de lodos provenientes de tecnologías anaerobias ..	80
Tabla 46: Análisis proximal promedio de lodos fecales de PTAR.....	81
Tabla 47: Propuestas de estabilización y aprovechamiento seleccionadas.....	86
Tabla 48: Concentración de sólidos en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	122
Tabla 49: Concentración de sólidos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias	125

Tabla 50: Concentración de sólidos en lodos fecales de BES.....	126
Tabla 51: Concentraciones de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	127
Tabla 52: Concentraciones de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	130
Tabla 53: Concentraciones de metales pesados en lodos fecales de BES.....	131
Tabla 54: Análisis elemental de lodos aerobios de PTAR.....	132
Tabla 55: Análisis elemental de lodos anaerobios de PTAR.....	135
Tabla 56: Análisis elemental de los lodos fecales de BES.....	136
Tabla 57: Concentración de P y K en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	137
Tabla 58: Concentración de P y K en lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	140
Tabla 59: Concentración de P y K en lodos fecales de BES.....	141
Tabla 60: Análisis termogravimétrico de lodos aerobios de PTAR.....	142
Tabla 61: Análisis termogravimétrico de lodos anaerobios de PTAR.....	143
Tabla 62: Análisis termogravimétrico de lodos fecales de BES.....	144
Tabla 63: Contenido energético de lodos aerobios de PTAR.....	145
Tabla 64: Contenido energético de lodos anaerobios de PTAR.....	147
Tabla 65: Contenido energético de lodos fecales de BES.....	148
Tabla 66: Concentración de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías aerobias.....	149
Tabla 67: Concentración de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias.....	152
Tabla 68: Concentración de microorganismos patógenos en lodos fecales de BES.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Concentración de coliformes fecales en lodos de México.....	11
Figura 2: Concentración de huevos de helminto en lodos de México.....	11
Figura 3: Fases del proceso de compostaje	21
Figura 4: Usos de biogás.	29
Figura 5: Puntos de muestreo de lodos PTAR Totorá.....	38
Figura 6: Sistema de tratamiento de PTAR Huáscar.....	39
Figura 7: Sistema de tratamiento de la PTAR Manchay	39
Figura 8: Puntos de muestreo de lodos PTAR Santa Clara.....	40
Figura 9: Sistema de tratamiento de la PTAR Cieneguilla.....	40
Figura 10: Puntos de muestreo de lodos PTAR La Escalerilla.....	41
Figura 11: Sistema de tratamiento de PTAR San Bartolo.....	42
Figura 12: Puntos de muestreo de lodos PTAR San Jerónimo.....	42
Figura 13: Laguna anaerobia de la PTAR Huáscar	106
Figura 14: Toma de muestra en la válvula de escape de la laguna anaerobia de la PTAR Huáscar.....	106
Figura 15: Toma de muestra en la manga de purga de la laguna aerobia de la PTAR San Bartolo	108
Figura 16: Lodos centrifugados de la PTAR Manchay	109
Figura 17: Toma de muestra en el ingreso de los lodos de la cámara de retorno de la PTAR Cieneguilla	111
Figura 18: Lechos de secado de la PTAR Cieneguilla	111
Figura 19: Toma de muestra de la manguera de purga del clarificador de la PTAR Santa Clara.....	112
Figura 20: Toma de muestra de la válvula del espesador de la PTAR Santa Clara	113
Figura 21: Toma de muestra en la centrífuga de la PTAR Santa Clara.....	113
Figura 22: Secador térmico de la PTAR La Escalerilla.....	116
Figura 23: Lechos de secado de la PTAR La Escalerilla	116
Figura 24: Digestor anaerobio de la PTAR San Jerónimo	118
Figura 25: Baño seco de X-Runner	118
Figura 26: Lodos fecales de los baños secos	119

Figura 27: Baños secos fijos de doble cámara.....	119
Figura 28: Cámaras de baños fijos	120
Figura 29: Baños secos modelo Drymix	120
Figura 30: Interior del Drymix	121

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Descripción de las PTAR y BES visitados	105
Anexo 2: Análisis fisicoquímico	122
Anexo 3: Análisis microbiológico	149

RESUMEN

La presente investigación ha sido realizada con la finalidad de proponer alternativas de estabilización y aprovechamiento agrícola y/o energético de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y baños ecológicos secos (BES) en base a sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

Para la obtención de las muestras de lodos se visitaron ocho PTAR y tres BES. En las primeras, los lodos procedían de tecnologías tales como: lodos activados de aireación convencional, lodos activados de aireación extendida, sistema de aireación extendida de ciclos intermitentes (ICEAS), laguna anaerobia, laguna aireada, tanque Imhoff y digestor anaerobio; y en los segundos de baños secos con cámaras de almacenamiento semanal, mensual y anual.

Al comparar los resultados de la caracterización con los parámetros y disposiciones del DS-N°015-2017 VIVIENDA, se determinó que sólo seis lodos de PTAR podían ser aprovechados como biosólidos tipo B sin previa estabilización. Los demás, incluyendo las muestras de BES, excedían la concentración máxima de sólidos volátiles, primer requisito para considerar a un lodo como biosólido (tipo A o B). La clasificación A no fue alcanzada por ninguno de los lodos debido a que su concentración *E. coli* era superior a la permitida.

Como métodos de estabilización con fines de aprovechamiento agronómico se han propuesto al compostaje, digestión anaerobia (biol y abono), alcalinización y secado térmico o solar (previo balance energético). Por otro lado, como métodos estabilización con fines de aprovechamiento energético se han propuesto la digestión anaerobia (biogás), secado térmico o solar (combustible), incineración y pirólisis (previo balance energético).

Palabras claves: lodos, PTAR, BES, estabilización, aprovechamiento agronómico, aprovechamiento energético.

ABSTRACT

This research has been carried out in order to provide information regarding the physicochemical and microbiological characteristics of different types of sludge from wastewater treatment plants (WWTP) and dry toilets (DT) and, based on it, propose agricultural and / or energy stabilization and exploitation alternatives

To obtain the sludge samples, eight WWTPs and three DTs were visited. In the former, the sludge came from technologies such as: activated conventional aeration sludge, activated extended aeration sludge, intermittent cycle extended aeration system (ICEAS), anaerobic lagoon, aerated lagoon, Imhoff tank and anaerobic digester; and in the seconds of dry toilets with weekly, monthly and annual storage chambers.

When comparing the results of the characterization with the parameters and dispositions of DS-N°015-2017 VIVIENDA, it was determined that only six WWTP sludge could be used as type B biosolids without prior stabilization. The others, including the three DT samples, exceeded the maximum concentration of volatile solids, the first requirement to consider a sludge as biosolid (type A or B). Classification A was not reached by any of the sludges because its E. Coli concentration was higher than allowed.

As stabilization methods for agronomic exploitation purposes, composting, anaerobic digestion (biol and fertilizer), alkalization and thermal or solar drying (prior energy balance) have been proposed. On the other hand, as stabilization methods for energy use purposes, anaerobic digestion (biogas), thermal or solar drying (fuel), incineration and pyrolysis (prior energy balance) have been proposed.

Keywords: sludge, WWTP, DT, stabilization, agronomic use, energy use.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad de los servicios de saneamiento en Perú ha mejorado a lo largo del tiempo; sin embargo, se han descuidado ciertos aspectos que, de acuerdo con Von Sperling y Andreoli (2007), son claves para lograr el éxito dentro de este sector. Estos aspectos son la gestión y manejo de los lodos producidos durante la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Así mismo, la gestión y manejo de los lodos generados en baños ecológicos secos (BES) constituyen también un tema de preocupación dentro del sector saneamiento.

La deficiente gestión de los lodos no sólo atenta contra la salud y el bienestar de las personas, sino que también genera impactos negativos en el medio ambiente ya que dichos residuos “contienen microorganismos y componentes dañinos como metales pesados, farmacéuticos, dioxinas, etc” (Raza *et al*, 2018). Además, se sabe que, en términos económicos, generan un alto gasto a las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) pues, dentro del costo total operacional de la planta, la gestión de lodos representa un considerable porcentaje, el cual puede variar del 20 al 60 por ciento (von Sperling & Andreoli, 2007).

La composición de los lodos provenientes de aguas residuales varía en función a las características de dichas aguas y tecnologías de tratamiento utilizadas en las estaciones de depuración (Uggetti *et al*. 2002). Por su parte, la variabilidad de los lodos fecales está sujeta al modo de uso de los BES, tiempo de almacenamiento y clima (Niwagaba, Mbéguéré y Strande 2014).

Las cantidades de lodos producidos en nuestro país son muy altas, llegando incluso a los 25 metros cúbicos diarios en un punto de operación. Si bien ya se cuenta con parámetros guías que regulan el reaprovechamiento seguro de estos materiales, como los establecidos en el DS-N°015-2017-VIVIENDA, no existen estudios acerca de sus características fisicoquímicas ni microbiológicas.

Por consiguiente, producto de la inadecuada gestión y desconocimiento de las cualidades de los lodos, las PTAR y empresas proveedoras del servicio de saneamiento *in situ* del país optan por disponer a la mayoría de estos potenciales biosólidos en rellenos sanitarios. Esta situación es alarmante debido a que actualmente sólo existen 36 rellenos en todo el territorio nacional (MINAM, 2019).

Diversas investigaciones han concluido que los lodos poseen importantes potenciales de reutilización agrícola y energético. Du, Jian y Gong (2012) señalan que, gracias a su elevado contenido de nutrientes, los lodos de PTAR pueden contribuir al incremento del rendimiento y biomasa de los cultivos agrícolas. Por su parte, Jönsson, Richert, Vinnerås y Salomon (2004) califican a las heces, como “fertilizantes completos de alta calidad”. Además, gracias a su elevado contenido orgánico, los lodos pueden transformarse en fuentes bioenergéticas mediante procesos de digestión anaerobia, pirólisis e incineración (Alvarez *et al.* citado por Raza *et al.* 2018; Alves, Mambeli, Tiago, Silva y Martuscelli, 2018; Colomer, Gallardo, Robles, Bovea y Herrera, 2010 y Raza *et al.*, 2018). De éstos, el más eficiente es la pirólisis, pues Karaca, Sözen, Orhon y Okutan (2018) indican que se puede recuperar alrededor del 74 por ciento de la energía de los lodos como gas de síntesis y alquitrán a través de este proceso.

Ante lo expuesto, la presente tesis tiene como objetivo principal proponer alternativas de estabilización y aprovechamiento agrícola y/o energético para los lodos muestreados provenientes de tecnologías aerobias y anaerobias de PTAR y lodos fecales de BES, en base a su caracterización fisicoquímica y microbiológica. Los objetivos específicos son: primero, estimar las cantidades producidas de lodos con la finalidad de comprender la importancia de su adecuado manejo; segundo, determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos relacionadas a su aprovechamiento agrícola y energético; tercero, determinar el grado de cumplimiento de los estándares para el aprovechamiento de lodos del DS-N°015-2017-VIVIENDA; cuarto, proponer alternativas de estabilización para los lodos que lo requieran y; quinto, proponer alternativas de aprovechamiento agrícola y/o energético

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Planta de tratamiento de aguas residuales

Según MINAM (2009), una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) comprende un espacio físico dentro del cual se ubican estructuras diseñadas y construidas de manera integrada con el objetivo de reducir la concentración de los diversos contaminantes a niveles aceptables por la legislación nacional a través de procesos físicos, químicos y biológicos.

La complejidad de los sistemas de tratamiento varía en función a las características de las aguas residuales de la zona y a los fines últimos que se establezcan para los efluentes (reúso o vertimiento en cuerpo receptor) (MINAM, 2009). Además, de acuerdo con la presencia o ausencia de oxígeno, estos se dividen en tratamientos aerobios y anaerobios.

2.1.1. Sistemas de tratamiento aerobio de aguas residuales

Están basados en la degradación de la materia orgánica bajo la acción de microorganismos dependientes de oxígeno (Quiroz, 2009). Para ello, se establecen sistemas de aireación en los reactores biológicos con la finalidad de oxigenar las aguas residuales a través del contacto directo con el aire, la agitación superficial del influente con turbinas o mezcladores o la liberación de aire mediante orificios (Stenstrom & Rosso, 2017). En consecuencia, las tecnologías aerobias demandan de elevados niveles de energías, los cuales pueden representar hasta el 75 por ciento del consumo energético de las PTAR (Reardon citado por Stenstrom & Rosso, 2017). Sin embargo, cabe precisar que la eficiencia de tratamiento es alta, mayor a 80 por ciento (Torres, 2012).

Dentro de los sistemas de tratamiento aerobios figuran: lagunas aireadas, lodos activados de aireación convencional y lodos activados de aireación extendida.

2.1.2. Sistema de tratamiento anaerobio de aguas residuales.

Las tecnologías anaerobias están diseñadas para degradar la materia orgánica en medios libres de oxígeno. En estos ambientes, microorganismos adaptados fermentan la materia orgánica y producto de ello se genera biogás, es decir, energía (van Lier, Mahmoud y Zeeman, 2017). Las principales desventajas de estas tecnologías frente a las aerobias son los mayores tiempos de retención hidráulica, complicaciones para depurar aguas con pequeñas cargas orgánicas y menor eficiencia, entre el 65 y el 80 por ciento (Crombet, Abalos, Rodríguez, Pérez, 2016 y Torres, 2012). Pero, debido a que sólo entre el 5 y 7 por ciento de la energía queda almacenada como nueva biomasa la producción de lodos es menor y no requiere de estabilización (Torres, 2012).

Dentro de los sistemas de tratamiento anaerobio figuran: lagunas anaerobias, tanque Imhoff, reactor UASB.

2.2. Baños ecológicos secos

Son inodoros cuyo funcionamiento no requiere de agua. En este sentido, las heces y orinas son almacenadas de forma conjunta o separada, durante cierto periodo, en una o dos cámaras respectivamente (Dabbah, Escudero, Fernandez, Hock, 2016). La utilización de estos baños significa entonces un ahorro de aproximadamente del 30 por ciento del consumo diario de agua (Miglio & Spittler, s.f.).

Además del ahorro de agua, otras de las ventajas de los BES son el aprovechamiento agrícola de la orina y las heces como fuentes de nutrientes y materia orgánica y la reducción de contaminación de las napas freáticas ya que, a diferencia de los pozos ciegos y letrinas, los BES poseen cámaras o recipientes impermeables que protegen al suelo de cualquier filtración (Miglio & Spittler, s.f.; Dabbah *et al.* 2016).

Es importante la aplicación de materiales de cobertura tales como cal, ceniza, aserrín, cascarilla de arroz o suelo seco sobre los lodos fecales luego de cada deposición ya que favorece a la sequedad estos y a la reducción de olores y patógenos (Dabbah *et al.* 2016).

2.3. Lodos

2.3.1. Lodos provenientes de PTAR

Los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden ser definidos como residuos sólidos o semisólidos compuestos por una gran cantidad de nutrientes, materia orgánica e impurezas insolubles y solubles provenientes del agua residual (Fijalkowski, Rorat, Grobelak y Kacprzak, 2017; Liu, 2016; Zhang, Hu, DJ. Lee, Chang y YJ., Lee, 2017). La proporción de estos componentes varía en función a las características del agua a tratar, así como a la tecnología utilizada en la PTAR (Moeller, Ferat y Lopez, 2002).

De acuerdo con su composición fisicoquímica, los lodos pueden ser aprovechados agronómicamente como enmiendas y fertilizantes o energéticamente a través de procesos tales como incineración, pirólisis y digestión anaerobia (Fijalkowski *et al.* 2017). Sin embargo, microbiológicamente su manejo puede ser peligroso debido a su alto contenido de patógenos por lo que es necesario, en ciertos casos, estabilizarlos (Moeller *et al.*, 2002). De acuerdo con la tecnología de tratamiento utilizada, podemos identificar los siguientes tipos de lodos de PTAR:

a. Lodo crudo o primario

Según Colón *et al.* (2017), el lodo primario proviene de las unidades de sedimentación primaria y contiene entre el 50 y 60 por ciento de los sólidos sedimentables del agua residual y posee un alto contenido orgánico debido a la presencia de materia fecal y restos de comida. Generalmente las concentraciones de sólidos en este tipo de lodo varían de dos a ocho por ciento y las de sólidos volátiles de 60 a 80 por ciento (Fytili & Zabaniotou, 2008 y Colón *et al.*, 2017).

b. Lodo secundario

El tratamiento secundario o biológico de aguas residuales, del cual derivan este tipo de lodos, puede ser de naturaleza aerobia, anaerobia, sin embargo, el más utilizado es el primero bajo la modalidad de lodos activados (Colón *et al.*, 2017). Colón *et al.* (2017) señala que los lodos de este proceso pueden presentar una concentración de uno al dos por ciento de sólidos totales, cuya fracción de volátiles varía de 50 a 85 por ciento. La cantidad de biomasa producida puede variar en función a los criterios de diseño, eficiencia del tratamiento primario, cantidad de sustrato soluble, porcentaje de remoción de nutrientes, etc (Limón, 2013 y Pöykiö, Watkins y Dahl, 2018). De acuerdo con Morán (2018), estos lodos poseen un elevado contenido de humedad, el cual puede llegar al 90 por ciento.

Dependiendo de los tratamientos empleados en las PTAR, las características y las cantidades producidas de lodos primarios y secundarios pueden variar al igual que su grado de estabilización (ver Tabla 1 y 2).

c. Lodo digerido

Material estabilizado proveniente de los procesos de digestión anaeróbica o aeróbica. Scholz (2016) señala que el contenido de sólidos totales de estos lodos varía de 1 a 4 por ciento y la fracción volátil de 30 a 60 por ciento; debido a la menor concentración de materia orgánica que posee a diferencia de los lodos crudos o secundarios no estabilizados, este puede deshidratarse en lechos de secado sin problemas de olor. El lodo digerido anaeróbicamente, es de color negro y al estar estabilizado no es foco de atención para las moscas e insectos (Scholz, 2016).

Tabla 1: Sistemas de tratamiento de aguas residuales y el correspondiente grado de estabilización de los lodos

Sistema	Lodo Primario	Lodo Secundario
Tratamiento primario (convencional)	Crudo	
Tratamiento primario (tanques sépticos)	Estabilizaos	
Tratamiento primario con coagulante (químicamente mejorado)	Crudo	
Laguna facultativa		Estabilizado
Laguna anaeróbica + laguna facultativa		Estabilizado
Laguna facultativa aireada		Estabilizado
Laguna aireada de mezcla completa + laguna de sedimentación		Estabilizado
Laguna facultativa + laguna de maduración		Estabilizado
Laguna facultativa + laguna de alta velocidad		Estabilizado
Laguna facultativa + remoción fisicoquímica de algas		No estabilizado
Baja velocidad de infiltración		(a)
Rápida filtración		(a)
Flujo superficial		(a)
Humedal		(a)
Tanque séptico + filtro anaeróbico	Estabilizado	Estabilizado
Tanque séptico + infiltración	Estabilizado	(a)
Reactor UASB		Estabilizado
UASB + lodo activado		Estabilizado ^(b)
UASB + filtro aireado sumergido		Estabilizado ^(b)
UASB + filtro anaeróbico		Estabilizado
UASB + filtro de goteo de alta velocidad		Estabilizado ^(b)
UASB + flotación		Estabilizado
UASB + lagunas de pulido		Estabilizado
UASB + flujo superficial		Estabilizado ^(a)
Lodo activado convencional	Crudo	No estabilizado
Aireación extendida		Estabilizado
SBR (aireación extendida)		Estabilizado
Lodo activado convencional con remoción biológica de N/P	Crudo	No estabilizado
Lodo activado con remoción química y biológica de N/P		No estabilizado
Filtro de goteo de baja velocidad	No estabilizado	No estabilizado
Filtro de goteo de alta velocidad	No estabilizado	No estabilizado
Biofiltro aireado sumergido		No estabilizado
Contactador biológico rotativo	No estabilizado	No estabilizado

Nota. ^(a): En los sistemas de tratamiento de aguas residuales de disposición en tierra, es necesaria la eliminación periódica de la biomasa vegetal formada. ^(b): asume el retorno del lodo aeróbico en exceso al reactor anaeróbico, para un mayor espesamiento y digestión, junto con el lodo anaeróbico. Recuperado de “Sludge stabilisation”, de Luduvic, M. 2007. p. 50. Londres, Reino Unido: IWA.

Tabla 2: Contenido de ST y producción per cápita de lodos generados en diferentes sistemas y etapas de tratamiento de aguas residuales

Sistema de tratamiento de aguas residuales	Lodos		
	ST (%)	gSS/hab. d ^(a)	l/hab. d ^(b)
Tratamiento primario (convencional)	2-6	35-45	0.6-2.2
Tratamiento primario (tanques sépticos)	3-6	20-30	0.3-1.0
Laguna facultativa	5-15	12-32	0.1-0.25
Laguna anaeróbica - laguna facultativa			
• Laguna anaeróbica	15-20	20-45	0.1-0.3
• Laguna facultativa	7-12	6-10	0.05-0.15
• Total		26-55	0.15-0.45
Laguna facultativa aireada	6-10	8-13	0.08-0.22
Laguna aireada de mezcla completa + laguna de sedimentación	5-8	11-13	0.15-0.25
Tanque séptico + filtro anaeróbico			
• Tanque séptico	3-6	20-30	0.3-1.0
• Filtro anaeróbico	0.5-0.4	7-9	0.2-1.8
• Total	1.4-5.4	27-39	0.5-2.8
Lodo activado convencional			
• Lodo primario	2-6	35-45	0.6-2.2
• Lodo secundario	0.6-1	25-35	2.5-6.0
• Total	1-2	60-80	3.1-8.2
Lodo activado - aireación extendida	0.8-1.2	40-45	3.3-5.6
Filtro de goteo de alta velocidad			
• Lodo Primario	2-6	35-45	0.6-2.2
• Lodo Secundario	1-2.5	20-30	0.8-3.0
• Total	1.5-4.0	55-75	1.4-5.2
Biofiltro aireado sumergido			
• Lodo Primario	2-6	35-45	0.6-2.2
• Lodo Secundario	0.6-1	25-35	2.5-6.0
• Total	1-2	60-80	3.1-8.2
Reactor UASB	3-6	12-18	0.2-0.6
UASB + Postratamiento aeróbico ^(c)			
• Lodo anaeróbico (UASB)	3-4	12-18	0.3-0.6
• Lodo anaeróbico (Postratamiento) ^(d)	3-4	8-14	0.2-0.5
• Total	3-4	20-32	0.5-1.1

Nota. ^(a) Se asume 0.1 kg DQO/habitante·d y 0.06 kgSS/habitante·d. ^(b) Litros de lodo/habitante·d = [(gSS/habitante·d) / (sólidos secos (%))] × (100/1,000) (asumiendo densidad del lodo de 1,000 kg/m³). ^(c) Postratamiento aerobio: lodos activados, biofiltro aireado sumergido, filtro percolador. ^(d) Lodo aeróbico extraído de los tanques UASB, después de la reducción de la masa y el volumen a través de la digestión y el espesamiento que ocurre dentro del reactor UASB (el exceso de lodo aeróbico que ingresa al UASB también es menor, porque, en este caso, la pérdida de sólidos en el efluente del clarificador secundario se vuelve más influyente). Recuperado de “Sludge characteristics and production”, de Von Sperling, M. & Gonçalves, R. V. 2007. p. 5. Londres, Reino Unido: IWA.

Los lodos provenientes de las PTAR contienen una gran cantidad de nutrientes (C, N, P y K) que permiten el incremento de la biomasa y rendimiento de los cultivos, así como patógenos (bacterias, virus, protozoos y huevos de gusanos parásitos) que pueden ocasionar enfermedades al estar en contacto directo con el ser humano (Donado 2013 y Du *et al.*, 2012). En la Tabla 3 y las Figuras 1 y 2 se muestran producciones de lodos, concentraciones de coliformes fecales (CF) y huevos de helmintos (HH) encontradas por Castrejón *et al.* (2002) encontradas en PTAR de México.

Al mismo tiempo, debido a su alto contenido de materia orgánica, los lodos pueden transformarse, potencialmente, en variadas fuentes de energía mediante procesos de incineración, digestión anaerobia y pirólisis (Alvarez *et al.* citado por Raza *et al.* 2018; Alves *et al.* 2018; Colomer *et al.* 2010 y Raza *et al.* 2018). Este último genera tres productos aprovechables energéticamente: gas, líquido y residuo carbonoso (Arauzo, Sanchez, Ábrego y Gea, 2010).

Por otro lado, si bien los efluentes tratados en las PTAR son de naturaleza doméstica, ilegales descargas industriales pueden ser vertidas en los sistemas de alcantarillado público. La Tabla 4 muestra concentraciones de metales pesados encontradas por Castrejón *et al.* (2000) en distintas muestras de lodos residuales.

Tabla 3: Tratamiento de agua y lodos residuales en PTAR procedentes de México

PTAR	Gasto de operación l/s	Tratamiento del agua residual	Tratamiento de lodos residuales	Producción de lodo Ton ST/día
1	120	LA	NT	0.33
2	2300	LA	NT	5.64
3	35	TPA	NT	0.11
4	1300	LE	NT	NE
5	500	FP	E +EA	15.7
6	2000	TPA	EA + D	31.94
7	1000	TPA	EA + D	18.73
8	1000	TPA	E +EA + D	9.52
9	28	AE	EA + D	0.41
10	500	LA	E + DAN +D	5.3
11	1760	LA	E + DAN +D	55.88
12	4300	LA	E + DAN +D	94.49
13	270	FP y LA	E + DAE +D	5.18
14	1550	FP y LA	E + DAE +D	29.65
15	500	LA	E + DAE +D	15.56
16	124	LA	E + DAE +D	2.85
17	1100	FP y LA	DAE + D	6.9
18	416	LA	E + DAE + D	6.52

Nota: LA (Lodos Activados); TPA (Tratamiento Primario Avanzado: coagulación + sedimentación); LE (Lagunas Aireadas); FP (Filtro Percolador); AE (Aireación extendida); NT (No tratado: crudo); E (Espesamiento); D (Deshidratación); EA (Estabilización alcalina); DAN (Digestión anaerobia); DAE (Digestión aerobia); NE (No especificado). Recuperado de "Evaluación de la calidad de lodos residuales de México", de Castrejón, A.; Barrios, A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A.; González, A. 2002. p. 2. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso.

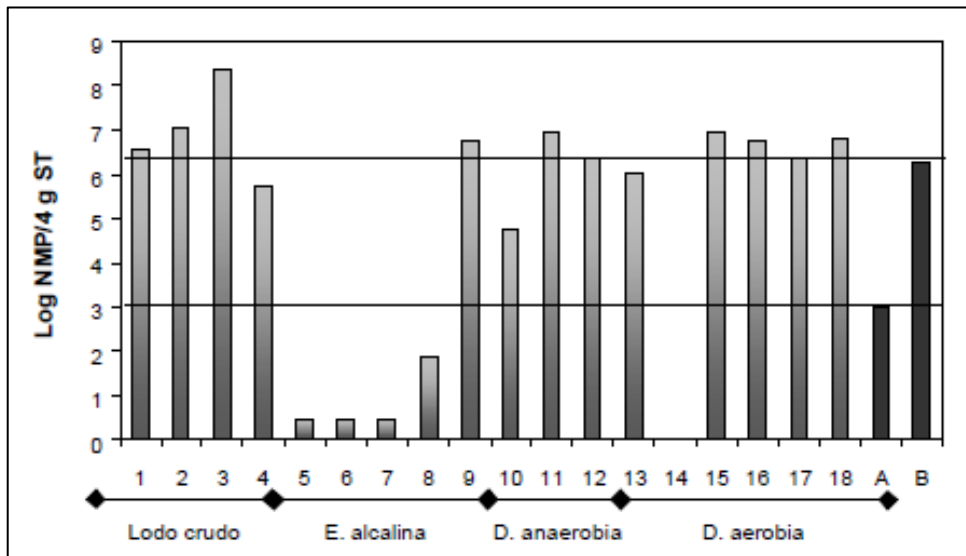


Figura 1: Concentración de coliformes fecales en lodos de México.

Nota. A: Biosólido clase A. B: Biosólido clase B. Recuperado de “Evaluación de la calidad de lodos residuales de México”, de Castrejón, A.; Barrios, A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A.; González, A. 2002. p. 6. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso

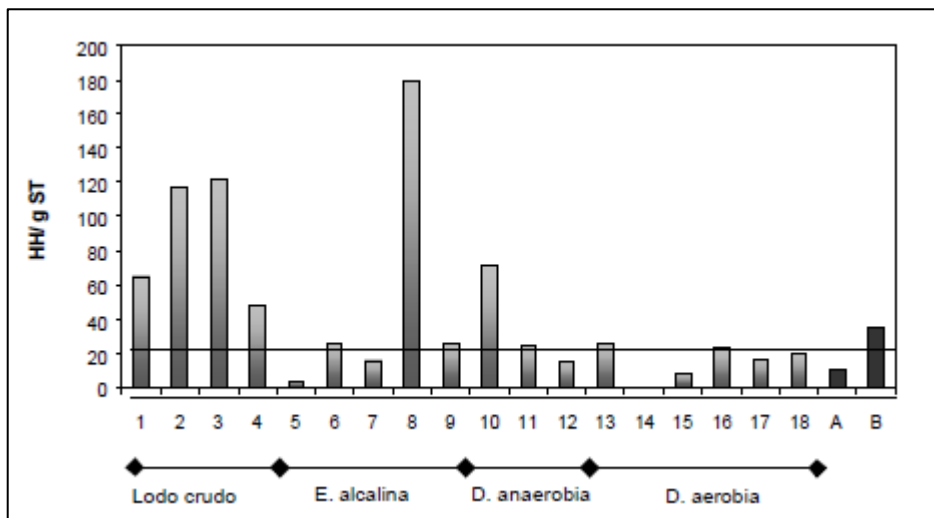


Figura 2: Concentración de huevos de helminto en lodos de México.

Nota. Biosólido clase A. B: Biosólido clase B. Recuperado de “Evaluación de la calidad de lodos residuales de México”, de Castrejón, A.; Barrios, A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A.; González, A. 2002. p. 7. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso

Tabla 4: Concentración de metales pesados en lodos residuales de México (mg/kg ST)

Metal pesado	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Plomo	Mercurio	Níquel	Zinc
LMP Exc.	41	39	1200	1500	300	17	420	2800
LMP Bueno	75	85	3000	4300	840	57	420	7500
PTAR 1	0	0	0.3	4.1	0	0.2	1	5.8
PTAR 2	0.1	0.1	1.2	5	0	0.6	1.7	9.5
PTAR 3	0.1	0.1	0.6	3.8	0	0.4	1	10.3
PTAR 4	10	0.4	8.9	31.1	0.7	3.6	33.2	127.8
PTAR 5	1.4	0.4	2.4	11.3	0	1.4	3.3	19.5
PTAR 6	2.8	0.4	26.1	53.3	ND	2.8	18.6	220.8
PTAR 7	2	0.3	194.5	52.8	ND	36.1	8.5	144.2
PTAR 8	1.8	0.3	4.1	47.7	ND	2.9	21.5	102.3
PTAR 9	0.8	ND	ND	6.5	0.1	ND	ND	17.8
PTAR 10	0.5	0.3	3.4	94.3	0.1	1.9	9.8	152.2
PTAR 11	1.5	1.5	328.2	171.7	6.4	25	643.6	2263
PTAR 12	1.4	0.8	232.7	123.3	1.4	61.3	376.6	900.5
PTAR 13	0.4	0.5	7	180.4	0.3	4.7	17.2	250.1
PTAR 14	4	0	22.3	51.2	0.7	33.2	16.1	177.8
PTAR 15	ND	0.9	50.9	18.2	0.1	3.1	9.9	149.2
PTAR 16	0.4	0.3	3.7	64.2	0.1	1.8	7.5	139.3
PTAR 17	ND	ND	43.2	58.5	0.6	3.1	17.6	228.7
PTAR 18	ND	3.2	37.8	80.2	0.2	18.1	22	299.3

Nota. Recuperado de “Evaluación de la calidad de lodos residuales de México”, de Castrejón, A.; Barrios, A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A.; González, A. 2002. p. 4. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso

2.3.2. Lodos provenientes de sistemas de saneamiento *in situ*

De consistencia suelta o semisólida estos lodos son por lo general crudos o parcialmente digeridos ya que resultan de la recolección, almacenamiento o tratamiento de excrementos que pueden estar en combinación con aguas negras y/o grises (Strande, 2014). Proviene de instalaciones de saneamiento *in situ*, es decir, letrinas, pozos sépticos y baños secos (Doulaye & Sylvie, 2008).

Debido a su naturaleza, la composición, consistencia y cantidad de producción de estos lodos son variables (ver Tablas 5 y 6) (Strande, 2014). Además, en comparación con los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, los lodos fecales poseen una concentración mayor de sólidos suspendidos y disueltos (Doulaye & Sylvie, 2008).

Niwagaba *et al.* (2014) afirman que los factores operativos que ocasionan la variabilidad de los lodos fecales son:

a. Formas de usar el inodoro

La concentración de sólidos en los lodos fecales se ve alterada por la modalidad de uso de los inodoros (secos o de arrastre), los métodos de limpieza anal y la incorporación de aguas grises al sistema de saneamiento. A su vez, estas aguas incrementan la concentración de aceites y grasas. Con respecto a la tasa de acumulación, esta aumenta con el ingreso de otros desechos orgánicos o inorgánicos y mayor número de usuarios.

b. Tiempo de almacenamiento

Influencia el en el grado de estabilización de los lodos fecales debido a la ocurrencia de la digestión anaerobia de estos durante el tiempo su permanencia en los sistemas descentralizados.

c. Infiltración del agua al suelo e ingreso de aguas subterráneas

La infiltración del agua al suelo reduce la dilución y el volumen de los lodos fecales. Por el contrario, el ingreso de aguas subterráneas al sistema incrementa las características mencionadas.

d. Influencia del método de recolección

El bombeo de lodos fecales, por lo general, implica su dilución pues muchas veces estos se concentran en duras capas en los fondos de las cámaras de almacenamiento o presentan una elevada espesura debido a la infiltración de sus aguas.

e. Clima

Las altas temperaturas contribuyen a la degradación de los lodos fecales. Y, dependiendo de la tecnología empleada, la recolección y transporte de lodos puede incrementar en épocas lluviosas.

Tabla 5: Características fisicoquímicas de lodos fecales de VIP y UDDT

Parámetro		Tipo de BES			
		VIP Seco	VIP Húmedo	VIP CAB	UDDT
Humedad	%	83	79	77	60
SS	mg/l	381	562	139	246
SSV	g/g (ST)	0.57	0.54	0.49	0.45
Ceniza	g/g (DW)	0.43	0.46	0.51	0.55
SVI	ml/mg	0.11	0.04	0.51	0.23
pH	-	7.6	7.7	7.4	7.5
DQO	mg/g (ST)	680	720	650	490
NH ₄ -N	mg/g (ST)	13	7	3	5
TKN	mg/g (ST)	40	30	30	30
PO ₄ -P	mg/l	0.73	0.83		1
P _{tot}	mg/l	3.86	2.93		3.27
Conductividad Térmica	W/mK	0.54	0.55	0.6	0.38
Valor Calorífico	MJ/kg	14.06	13.08	14.31	12.93
Densidad	kg/m ³	1356.5	1443.1	1350.1	1450.4

Nota: Recuperado de “Faecal Sludge Quantification, Characterisation and Treatment Objectives”, de Niwagaba, C.; Mbéguéré, M. y Strande, L. 2014. p. 30. Londres, Reino Unido: IWA.

Tabla 6: Características fisicoquímicas de lodos fecales de baños públicos, tanque séptico y lodos de EDAR

Parámetros	Tipo de LF		Los de EDAR	Fuentes
	Baños Públicos	Tanques sépticos		
pH	1.5 a 12.6	-	-	USEPA (1994)
	6.55 a 9.34	-	-	Kengne et. al (2011)
ST (mg/l)	52500	12000 a 35000	-	Kone y Strauss (2004)
	30000	22000	-	NWSC (2008)
	-	34106	-	USEPA (1994)
	≥3.5%	<3%	<1%	Heinss <i>et al</i> (1998)
% SVT (como % de TS)	68	50 a 73	-	Kone y Strauss (2004)
	65	45	-	NWSC (2008)
DQO (mg/l)	49000	1200 a 7800	-	Kone y Strauss (2004)
	30000	10000	7 a 680	NWSC (2008)
	20000 a 50000	<10000	500 a 2500	Heinss <i>et al</i> (1998)
DBO (mg/l)	7000	840 a 2600	-	Kone y Strauss (2004)
	-	-	20 a 299	NWSC (2008)
TN (mg/l)	-	190 a 300	-	Kone y Strauss (2004)
	-	-	32 a 250	NWSC (2008)
TNH (mg/l)	3400	1000	-	Katukiza <i>et al</i> (2012)
NH₄-N (mg/l)	3300	150 a 1200	-	Kone y Strauss (2004)
	2000	400	2 a 168	NWSC (2008)
	2000 a 5000	<1000	30 a 70	Heinss <i>et al</i> (1998)
NO₃ (mg N/l)	-	0.2 a 2.1	-	Koottatep <i>et al</i> (2005)
TP (mg P/l)	450	150	9 a 63	NWSC (2008)
Coliformes fecales (UFC/100 ml)	1x10 ⁵	1x10 ⁶	6.3x10 ⁴ a 6.6x10 ⁵	NWSC (2008)
Huevo de helmintos (HH/l)	2500	4000 a 5700	-	Heinss <i>et al</i> (1998)
	20000 a 60000	4000	-	Heinss <i>et al</i> (1998)
	-	600 a 6000	-	Ingalline <i>et al</i> (2002)
	-	16000	-	Yen-Phl <i>et al</i> (2010)

Nota. Recuperado de “Faecal Sludge Quantification, Characterisation and Treatment Objectives”, de Niwagaba, C.; Mbéguéré, M. y Strande, L. 2014. p. 24. Londres, Reino Unido: IWA

2.3.3. Biosólido

Se define como biosólido a los lodos de PTAR y sistemas de saneamiento *in situ* estabilizados que poseen características fisicoquímicas y microbiológicas adecuadas para el aprovechamiento de estos sin perjuicio de la salud o el medio ambiente. En la Tabla 7, se comparan características fisicoquímicas de lodos crudos y biosólidos.

Tabla 7: Composición fisicoquímica de lodos crudos y biosólidos

Parámetros	Lodos primarios o crudos	Lodos secundarios	Lodos digeridos anaeróbicamente (biosólido)
pH	5-8	6.5-8	6.5-7.5
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /l)	500-1500	-	2500-3500
Nitrógeno (% de ST)	1.5-4	2.4-5	1.6-6
Fósforo (%P de ST)	0.3-1.2	1.2-4.8	0.7-1.7
Potasio (%K de ST)	0.1	0.4-0.6	0-2.5
Aceite, grasas (% de ST)	6-30	-	5-20
Proteínas (% de ST)	20-30	-	15-20
Sólidos Totales (%)	2-8	1-2	6-12
Sólidos Volátiles (% de ST)	60-80	50-85	30-60

Nota. Recuperado de “Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los llanos en el departamento del META.”, de Donado R. 2013. p. 22. (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana) y de “Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods”, de Fityli & Zabaniotou. 2008.

2.4. Marco legal

Los siguientes documentos regulan el manejo, monitoreo y reaprovechamiento de los lodos:

- RM-N°128-2017-VIVIENDA “Aprueban Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final”
- RM-N°093-2018-VIVIENDA “Protocolo de monitoreo de biosólidos”
- RM-N°024-2017-VIVIENDA “Reglamento para el Reaprovechamiento de los Biosólidos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”

- DS-N°015-2017-VIVIENDA “Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”

Si bien el marco legal nacional, aquí citado, señala que el reaprovechamiento de los lodos puede ser de índole agrícola, forestal, industrial (rubro de cerámica y cemento debido a su concentración de minerales), o energético (incineración en base a su poder calorífico) los parámetros bajo los cuales se regula su reuso están enfocados al sector agronómico (ver Tablas 8,9 y 10). Dichos parámetros, pertenecientes a la DS-N°015-2017-VIVIENDA, determinan si un lodo puede ser clasificado como biosólido A o B, es decir si son aplicables al suelo sin restricciones sanitarias o aplicables al suelo con restricciones sanitarias, según la localización de los suelos y/o tipo de cultivo respectivamente.

Así mismo, cabe mencionar que, aunque en el artículo 3 del decreto en mención se considere a las excretas de BES como lodos mediante la definición:

Son residuos sólidos provenientes de procesos de tratamiento de aguas residuales que cuentan con alta concentración de materia orgánica, característica que se aplica principalmente a los lodos obtenidos en el tratamiento primario y tratamiento secundario, así como a las excretas de instalaciones sanitarias *in situ*.

Y en el artículo 9 se señale que estos materiales deben estar libres de impurezas visibles y no degradables tales como plástico, vidrio y/o metal para su transformación en biosólidos, en la definición de biosólidos del mismo documento legal sólo se consideran a los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales con características físicas, químicas y microbiológicas adecuadas para su reaprovechamiento como acondicionador del suelo.

Tabla 8: Parámetros de estabilización en biosólidos de Clase A y B

Concentración de materia orgánica:	
Materia orgánica (SV)	≤ 60% de Materia seca (ST)

Tabla 9: Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y B

mg/kg ST	Arsénico	Cadmio	Cromo	Cobre	Plomo	Mercurio	Níquel	Zinc
Clase A y B	40	40	1200	1500	400	17	400	2400

Tabla 10: Parámetros de higienización

Indicador	Clase A	Clase B
Indicador de contaminación fecal	<i>Escherichia coli</i> < 1000 NMP/ 1gST o Salmonella sp. < 1 NMP / 10g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del Anexo N° II.
Indicador de Huevos de Helmintos	Huevos viables de Helmintos < 1 /4g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la higienización	

2.5. Tecnologías de estabilización de lodos

El DS-N°015-2017-VIVIENDA señala que los procesos de estabilización tienen el objetivo de reducir la fracción orgánica de un producto y que los procesos de higienización buscan reducir la concentración de microorganismos patógenos en este. En los Anexos I y II del documento legal se indica que la digestión anaeróbica y aeróbica son tecnologías de estabilización, mientras que el compostaje térmico, secado térmico o solar, digestión anaeróbica termofílica y tratamiento alcalino son tecnologías de higienización. Sin embargo, para Ludovice (2007) la estabilización de los lodos implica también la disminución de la concentración de patógenos y detalla que dicho proceso puede darse mediante mecanismos biológicos (compostaje y digestión), químicos (alcalinización) y térmicos. La presente investigación ha sido elaborada bajo este concepto.

2.5.1. Digestión anaerobia

Es un proceso de fermentación microbiana donde en ausencia de oxígeno, se genera una suspensión acuosa y biogás cuya composición consta principalmente de CH₄ (50%-70%), CO₂ (30%-50%), H₂S y NH₃ (Acosta & Obaya, 2005; López, Ramírez, Gomes y Morgan-Sagastume, 2017).

Además, de acuerdo con Acosta y Obaya (2005), por cada kilogramo de sólidos degradables se producen 350 litros de gas, y a diferencia de la digestión aerobia, a través de la digestión anaerobia se puede lograr una reducción de entre el 40 a 60 por ciento de los sólidos suspendidos volátiles, buena inactivación de patógenos, y posibilidades de reúso del lodo en la agricultura.

Luduvic (2007) señala que factores tales como el tratamiento preliminar, la concentración de sólidos totales y la presencia de sustancias inhibitoras y metales en los lodos pueden alterar la eficiencia del proceso digestivo pues el ingreso de residuos sólidos y arena reduce el volumen neto del reactor. Las concentraciones ideales de sólidos totales deben variar entre 4 y 8 por ciento, no se recomiendan concentraciones inferiores a 2.5 por ciento ya que poseen un efecto negativo en la digestión (Luduvic, 2007). Determinadas concentraciones de hidrocarburos, detergentes aniónicos no biodegradables cationes inorgánicos organoclorados y agentes oxidantes pueden detener el proceso de degradación, así mismo la reacción de las enzimas y metales puede conducir a la formación de complejos insolubles (Luduvic, 2007).

2.5.2. Compostaje

Comprende un proceso aeróbico de degradación de materia orgánica, bajo la acción de microorganismos mesófilos y termófilos en condiciones controladas de temperatura, humedad, oxígeno y nutrientes (Pinto, 2007; Luduvic, 2007).

De acuerdo con Pinto (2007) el compostaje consta de tres fases: mesofílica, termofílica y mesofílica final (ver Figura 3). Dichas fases son descritas por el autor como sigue a continuación:

- La fase mesofílica, donde se lleva a cabo la proliferación de microorganismos mesófilos e incremento gradual de la temperatura.
- La fase termofílica inicial en la cual, se alcanza la temperatura máxima del proceso (65°C) y por ende la reducción y aumento de la población de microorganismos

mesófilos y termófilos respectivamente. Otra importante consecuencia del efecto térmico es la inactivación de organismos patógenos.

- La fase mesofílica final. Contrariamente a la fase termofílica, en esta los microorganismos termófilos disminuyen debido al descenso de la temperatura producto de la descomposición de la materia orgánica. Al presentarse nuevamente un medio adecuado para los microorganismos mesófilos, estos se recuperan.

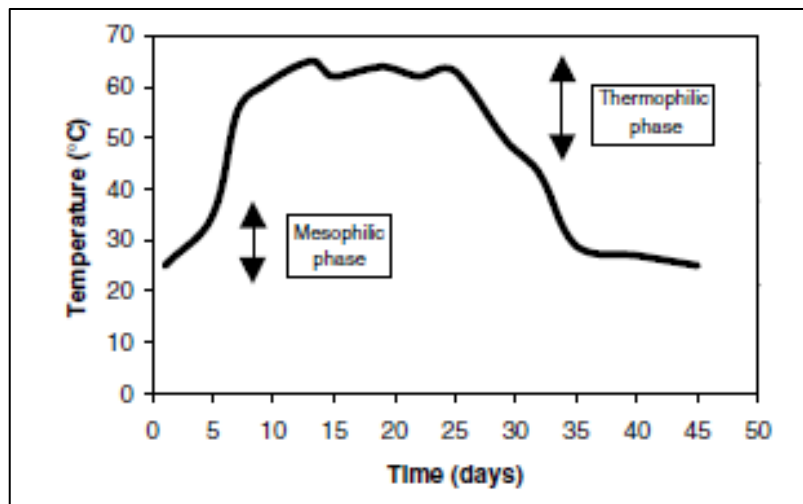


Figura 3: Fases del proceso de compostaje

Nota: Recuperado de “Pathogen removal from sludge” (Pinto, 2007). p. 128. Londres, Reino Unido: IWA.

En el proceso de compostaje se degrada aproximadamente entre el 20 y 30 por ciento de sólidos volátiles (Scholz, 2016). Pinto (2007) menciona que los factores que influyen en la eficiencia del proceso en mención son la relación C/N, estructura física de los materiales, humedad, aireación, temperatura y pH. Idealmente la relación C/N debe variar de 26 a 31 pues menores o mayores valores conducen a la pérdida de N por liberación de amoníaco y a un desarrollo limitado de microorganismos y por ende bajas temperaturas en el compostaje respectivamente (van Oorschot, de Waal y Semple, 2000; Pinto, 2007).

Una de las desventajas que presentan los lodos es su fina estructura, ya que esta conduce a la formación de grumos, problemas de aireación, deficiencias en la degradación del potencial biosólido y disminución de la temperatura del proceso (Torres, Madera y Martínez, 2007).

Para hacer frente a este problema, se sugiere mezclar los lodos con materiales de soporte de mayor granulometría que permitan elevar la porosidad del compost a 30 u 35 por ciento (Pinto, 2007 y Torres *et al.*, 2007).

La humedad de las pilas de compostaje debe ser igual a 50 o 60 por ciento, mayores valores pueden impedir la distribución del aire mientras que menores valores pueden afectar negativamente a la actividad microbiana y a las temperaturas del proceso. (Pinto, 2007). La fase termofílica debe alcanzar temperaturas de 55°C a 65°C, si sobrepasa estos valores la actividad microbiana se reduce y se amplían los ciclos de tratamiento (Pinto, 2007).

Al igual que Pinto (2007), la FAO (2013) reconoce también parámetros importantes a monitorear durante el proceso de compostaje. Los valores de estos varían en función a la fase en la que se encuentra el proceso (ver Tabla 11). Una vez maduro el compost, el contenido de macronutrientes de este se aproxima al presentado en la Tabla 12.

Tabla 11: Parámetros en el compostaje

Parámetros	Rango ideal al comienzo (2-5 días)	Rango ideal para compost en fase termofílica II (2-5 semanas)	Rango ideal de compost maduro (3-6 meses)
C: N	25:1 - 35:1	15/20	10:1 - 15:1
Humedad	50% - 60%	45% - 55%	30% - 40%
Concentración de oxígeno	~10%	~10%	~10%
Tamaño de partícula	<25 cm	~15 cm	<1.6 cm
pH	6.5 - 8.0	6.0 - 8.5	6.5 - 8.5
Temperatura	45 - 60°C	45°C Temperatura ambiente	Temperatura ambiental
Densidad	250 - 400 kg/m ³	<700 kg/m ³	<700 kg/m ³
Materia orgánica (Base seca)	50% - 70%	>20%	>20%
Nitrógeno Total (Base seca)	2.5 - 3%	1-2%	~1%

Nota: Recuperado de “Manual de Compostaje del Agricultor: Experiencias en América Latina.”. de FAO. 2013. p. 31. Santiago, Chile: ISBN.

Tabla 12: Contenido de N, P, K en el compost

Nutriente	% en compost
Nitrógeno	0.3% - 1.5% (3g a 15g por Kg de compost)
Fósforo	0.1% - 1.0% (1g a 10g por Kg de compost)
Potasio	0.3% - 1.0% (3g a 10g por Kg de compost)

Nota: Recuperado de “Manual de Compostaje del Agricultor: Experiencias en América Latina.” de FAO. 2013. p. 3. Santiago, Chile: ISBN.

2.5.3. Tratamiento alcalino

Proceso de estabilización que consiste en la adición de productos alcalinos capaces de elevar el pH de los lodos a 12 por al menos 72 horas. Bajo este mecanismo, se reduce la concentración de microorganismos patógenos debido a la alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma celular de los patógenos (Pinto, 2007). Silva, Bedoya y Torres (2013) indican que además del pH, la temperatura ($T \geq 55^\circ\text{C}$) y la liberación de amoníaco contribuyen a la inactivación de los patógenos.

De acuerdo con Pinto (2007), los productos más usados en el encalado de lodos son la cal viva e hidratada. No obstante, el primero suele emplearse en lodos semisólidos y no líquidos debido a que la mezcla con estos es dificultosa y requiere de un previo proceso de apagado (Pinto, 2007). La reacción de la cal viva con la humedad de los lodos libera calor e incrementa la temperatura de la mezcla (Pinto, 2007).

La cantidad de cal requerida para elevar el pH a 12 depende de la concentración de sólidos, tipos de lodos y las condiciones buffer de estos (ver Tabla 13). Es necesario que los lodos contengan como máximo una fracción volátil de 38 por ciento es decir que se encuentren digeridos pues el tratamiento alcalino no afecta a la materia orgánica. Las desventajas de la adición de alcalinizantes están en el aumento de sólidos y emisión de malos olores a causa de la liberación de amoníaco que acompaña al incremento del pH (Pinto, 2007).

Tabla 13: Cantidad requerida de cal (pH:12)

Tipos de lodos	kg Ca (OH)₂ por tonelada de solidos secos	pH Final
Lodos Primarios	54-154 (110)	12.7
Lodos Activados	190-350 (270)	12.6
Lodos anaeróbicos	125-225 (170)	12.4

Nota: Recuperado de "Pathogen removal from sludge". de Pinto, M. 2007. p. 140. Londres, Reino Unido: IWA.

2.5.4. Secado térmico

Eficiente y flexible proceso de estabilización, secado y remoción de microorganismos patógenos que consiste en la exposición de lodos, digeridos y con concentraciones de sólidos de 20 a 35 por ciento, a altas temperaturas por periodos cortos (Gonçalves, Ludovice y von Sperling, 2007; Pinto, 2007 y Andreoli, Pegorini, Fernandes y Dos Santos, 2007).

La energía necesaria para el funcionamiento del proceso es variable dependiendo del grado de eficiencia del secador y de las características del lodo a tratar. El uso de combustible es costoso, por lo cual, es recomendable emplear el CH₄ proveniente de los digestores anaerobios o gas natural para reducir los costos de operación (Gonçalves *et al.*, 2007).

Las principales ventajas del secado térmico son la producción de pellets de calidad, con concentraciones de sólidos de 90 a 95 por ciento, aptos para uso agronómico sin restricciones ya que son libre de microorganismo patógenos y reducción de costos de almacenamiento y flete debido a la significativa reducción del volumen de los lodos (Gonçalves *et al.*, 2007; Pinto, 2007 y Ludovice & Fernandes, 2007). Si bien el secado térmico puede tener efectos negativos sobre las características fisicoquímicas de los lodos, conduciendo a reducciones del carbono orgánico, nitrógeno, fósforo y demás, las concentraciones finales de estos son similares a los encontrados en los abonos orgánicos (Giraldo y Lozano citados por Silva *et al.*, 2013)

2.5.5. Lecho de secado convencional

Consta de un tanque abierto de concreto u otro material adecuado dentro del cual se vierten lodos con la finalidad de reducir su contenido de humedad por procesos de evaporación y percolación e inactivar microorganismos patógenos mediante la exposición a la luz solar (Gonçalves *et al.*, 2007; Van Haandel and Lettinga, citados por Gonçalves *et al.*, 2007). Está conformado por tres elementos: medio de drenaje, capa de soporte y sistema de drenaje (Gonçalves *et al.*, 2007).

Para lograr el secado de los lodos en un periodo corto de tiempo es necesario que estos estén previamente digeridos (Jordão and Pessôa, citados por Gonçalves *et al.*, 2007). Es recomendable retirar los lodos una vez estos hayan alcanzado una concentración de sólidos del 30 por ciento para evitar problemas relacionados a su eliminación (Gonçalves *et al.*, 2007).

2.6. Métodos de aprovechamiento de lodos

2.6.1. Aprovechamiento agronómico

Si bien la normativa nacional establece parámetros bajo los cuales el aprovechamiento de los lodos es seguro para el suelo, los cultivos y la población, estos no aseguran la calidad agronómica de dichos lodos. Por ello, es necesario determinar características químicas adicionales tales como concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, compuestos orgánicos húmicos, entre otros, que permitan identificar los posibles beneficios del aprovechamiento de los biosólidos.

La FAO (2002) denomina fertilizante a todo material, natural o industrializado, que posee una concentración de al menos 5 por ciento de N, P₂O₅ o K₂O, macronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, existen otros materiales llamados “enmiendas” que, si bien poseen un contenido limitado de nutrientes, impactan positivamente en la naturaleza química, física y biológica del suelo lo cual favorece también a la actividad agronómica (Ministerio de Agricultura de Columbia Británica, 2010).

GUS, citado en G., Siebielec, S., Siebielec y Lipski (2018), refiere que en Polonia de una producción aproximada de 706.6 mil toneladas de lodos de PTAR, 13 mil toneladas están conformadas por P. Esta cantidad, sería suficiente para, en un área de 618 ha, reemplazar a los fertilizantes minerales de P con una tasa de aplicación de 20.9 kg/ha. De igual manera Melo *et al.* (2018), señala que la aplicación consecutiva durante 10 años de lodos de aguas residuales en campos de maíz puede reemplazar por completo la fertilización mineral con fósforo y micronutrientes y parcialmente la fertilización con nitrógeno sin reducir la productividad del cultivo. Por su parte Singh y Agrawal (2011) indican que “la enmienda de lodos mejora las propiedades del suelo, como la porosidad, densidad aparente, estabilidad de los agregados y capacidad de retención de agua”.

En las Tablas 14 y 15 se presentan la composición nutricional de fertilizantes minerales simples y multinutrientes, respectivamente, mientras que en la Tabla 16 se presenta la composición nutricional típica de los lodos de PTAR. En esta última se puede observar la amplia brecha que existe entre los fertilizantes minerales simples y los lodos. No obstante, estos últimos son más cercanos, en composición a los fertilizantes multi nutrientes NPK ya que la concentración de N y P es mínimamente 5 por ciento y los lodos biológicos o secundarios poseen entre 3 y 6 por ciento de N y entre 3 y 7 por ciento de P (Gonzales, 2015).

Tabla 14: Composición agronómica de fertilizantes minerales simples

Nombres comunes (fórmulas)	Grado o análisis de porcentaje				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S
Fertilizantes nitrogenados					
Sulfato amónico (NH ₄) ₂ SO ₄	21	0	0	-	23
Nitrato amónico NH ₄ NO ₃	33-34.5	0	0	-	-
Nitrato amónico-cal NH ₄ NO ₃ +CaCO ₃ (nitrato amónico-cálcico)	20.5-26	0	0	-	-
Urea CO(NH ₂) ₂	45-46	0	0	-	-
Nitrosulfato amónico NH ₄ NO ₃ - (NH ₄) ₂ SO ₄	26	0	0	-	15
Fertilizantes fosfatados					
Superfosfato simple Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + CaSO ₄	0	16-20	0	-	12
Superfosfato triple o concentrado Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0	46	0	-	-
Fosfato de roca molido (fosfato mineral)	0	20-40	0	-	-
Fertilizantes potásicos					
Muriato o cloruro potásico KCl	0	0	60	-	-
Sulfato potásico K ₂ SO ₄	0	0	50	-	18
Sulfato potásico - magnésico K ₂ SO ₄ - 2MgSO ₄	0	0	26-30	5.-7	16-22
Fertilizantes de magnesio					
Kieserita MgSO ₄ - 7H ₂ O	-	-	-	16	22
Kieserita calcinada MgSO ₄ - H ₂ O	-	-	-	20	27
Fertilizantes azufrados					
Todos los fertilizantes conteniendo S como anión	-	-	-	-	Según fórmula
Yeso CaSO ₄ - 2H ₂ O	-	-	-	-	16-18
Otros fertilizantes					
Nitrato sódico NaNO ₃	16	0	0	-	-
Fosfato di-cálcico Ca (HPO ₄)	0	35-42	0	-	-
Escoria Thomas	0	16-20	0	1.-3	-

Nota. Recuperado de “Los Fertilizantes y su uso (4° ed)”, de FAO. 2002. p. 38. Paris, Francia: IFA.

Tabla 15: Composición agronómica de fertilizantes minerales multi nutrientes

Tipo de Fertilizante		% N	% P ₂ O ₅	% K ₂ O
Fertilizante NPK		5-26	5-35	5-26
Fosfatos Amónicos	DAP	16-18	42-48	-
	MAP	11	52	-
Nitrofosfatos	NP	20-26	6-34	-
Fertilizantes PK	PK	-	6-30	6-30

Nota. Recuperado de “Los Fertilizantes y su uso (4° ed).”, FAO. 2002. p. 39. Paris, Francia: IFA.

Tabla 16: Contenido típico de N-P-K en los lodos

Tipo de Lodo	% N	% P ₂ O ₅	% K ₂ O
Lodo Primario	2-3	1-2	-
Lodo Biológico	3-6	3-7	-
Lodo Mixto	1-6	1-4	0.1-0.4

Nota. Recuperado de “Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR”, de Gonzáles, I. C. 2015. p. 44. (Tesis doctoral, Universidad de Córdoba).

2.6.2. Aprovechamiento energético

El marco legal peruano que regula el reaprovechamiento de lodos de PTAR no establece parámetros referidos al reaprovechamiento energético.

a. Generación de metano

La digestión anaerobia es el proceso a través del cual, diferentes tipos de microorganismos, dentro de un ambiente anóxico, degradan la materia orgánica. Uno de sus principales productos es el biogás cuya composición consta de CH₄, CO₂, H₂S, NH₃, etc. El potencial energético de este combustible es directamente proporcional a la concentración de CH₄. Por lo general, dicha concentración es 60 por ciento, lo que conlleva a un biogás con PCI de 21.5 MJ/Nm³ ya que el PCI del metano es de 35.9 MJ/Nm³ (ver Tabla 17). Bajo los procedimientos de transformación adecuados esta energía química puede ser aprovechada en su naturaleza térmica y mecánica (ver Figura 4) (López *et al.*, 2017).

Los lodos provenientes de clarificadores primarios y los secundarios de origen aerobio son sustratos adecuados para la digestión anaerobia ya que poseen altas fracciones orgánicas (López *et al.*, 2017).

En la Tabla 18 se muestra los resultados de producción de metano obtenidos en una investigación brasileña en un proceso de digestión anaerobia.

Tabla 17: Características de diferentes tipos de gases.

Combustible	MJ/Kg	MJ/Nm ³	kWh/Nm ³	Equivalencia a CH ₄
Metano	50	35.9	10	1
Gas Natural	45.1	31.8	8.8	0.9
Biogás típico (60% CH ₄)	30	21.5	6	0.6
Butano	45.7	118.5	32.9	3.3
Propano	46.4	90.9	25.2	2.5
Metanol	19.9	15900	4415.4	442.9
Etanol	26.9	21400	5942.8	596.1
Gasolina	45	33300	9247.4	927.6

Nota. Recuperado de “Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. (1° ed).”, Lopez, J.; Ramírez, Benly.; Gomes, C. y Morgan, J. 2017. p. 44. Ciudad de México, México: GIZ.

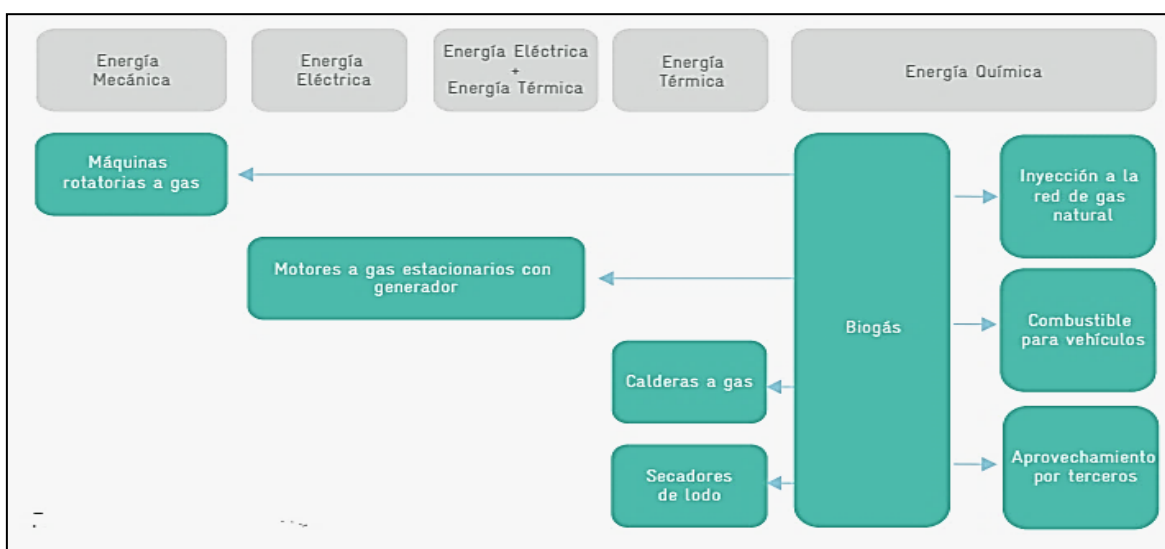


Figura 4: Usos de biogás.

Nota. Recuperado de “Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. (1° ed).”, Lopez, J.; Ramírez, Benly.; Gomes, C. y Morgan, J. 2017. p. 137. Ciudad de México, México: GIZ.

Tabla 18: Contenido de biogás generado en diferentes tipos de lodos

Municipio	Medición	HRT (días)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	
Varginha	1ro	11	22.3	4.3	15.3	-	
	2do	27	48.5	2.59	5.29	-	
	3ro	76	52.71	1.88	0.16	-	
	4to	171	52.55	-	-	-	
Pouso Alegre	1ro	6	13.3	1.5	17.7	-	
	2do	55	41.4	2.19	6.35	-	
	3ro	150	42.12	0.45	0.19	-	
Santa Rita do Sapucaí	1ro	6	5.4	1.9	19.7	11	
	2do	55	17.72	1.26	7.79	5	
	3ro	150	18.84	0.97	0.22	3	
Itajubá	Sin calefacción	1ro	4	23.47	5.62	9.77	-
		2do	100	48.41	3.18	0.17	-
	Con calefacción	1ro	4	24.01	5.49	9.08	-
		2do	100	49.98	3.57	0.15	-

Nota. Recuperado de “). Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of sludge generated at wastewater treatment plants in the South of Minas Gerais, Brazil as a potential energy source”, Alves, A.; Mambeli, R.; Tiago, G.; Silva, I.; Martucelli, E. (2018). 2018. p. 137. ELSEVIER. 41: 139-153

b. Incineración

Proceso de estabilización y recuperación energética capaz de eliminar la materia orgánica y microorganismos patógenos presentes en los lodos de PTAR. Genera una significativa reducción del volumen de los lodos. Las cenizas provenientes de lodos deshidratados, generalmente, representan menos del 4 por ciento del volumen inicial de estos (Luduvic & Fernandes, 2007).

Producto de la combustión de los biosólidos se liberan contaminantes atmosféricos entre los cuales figuran los óxidos de nitrógeno, monóxidos de carbono, dióxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles. Por ello es necesario que las plantas incineradoras cuenten con sistemas de filtros y continuos monitoreos de los gases liberados (Luduvic & Fernandes, 2007).

Colomer *et al.* (2010) recomienda que los lodos a incinerar deben ser secados hasta reducir su humedad a 10 o 15 por ciento. Sin embargo, Fernandes, Lopes, Andreoli y da Silva (2007) señalan que el contenido de sólidos totales debe ser, como mínimo, igual a 35 por ciento

De acuerdo con Fytili y Zabaniotou (2008) el 24, 20, 25 y 55 por ciento de los lodos de Dinamarca, Francia, Estados Unidos y Japón son incinerados, respectivamente.

c. Pirólisis

Proceso de degradación térmica de la materia orgánica en un ambiente inerte libre de oxígeno donde las temperaturas pueden variar desde 300 °C hasta 900 °C. Luego de su operación, la materia queda reducida a una fracción sólida (carbón), líquida (alquitrán y/o aceite compuesto por acetona, metanol y ácido acético) y gaseosa no condensable (H₂, CH₄, CO y CO₂). La proporción de estas fracciones varía en función a los criterios técnicos tomados durante la operación (T°, duración del proceso, presión, etc.) y a las características del material a pirolisar. Los metales pesados presentes en los lodos de PTAR, quedan confinados y menos biodisponibles en la fracción sólida del lodo pirolisado (Fytili y Zabaniotou, 2008 y Jin *et al.*, 2016). Karaca *et al.* (2018) señala que cuando el sistema de pirólisis se ajusta a las óptimas condiciones de operación a alta temperatura y velocidad de rotación, alrededor del 74 por ciento de la energía de los lodos puede recuperarse potencialmente como gas de síntesis y alquitrán.

La concentración de materia orgánica otorga valor combustible a los lodos (Gonzales, 2015). Diferentes investigaciones han encontrado rangos variables de poder calorífico en los lodos, los cuales pueden oscilar entre 13.941 y 24.292 kJ / kg de lodo seco siendo el de la hulla 32.500 kJ/kg (Fonts *et al.*; Pedroza *et al.*; Ospanov *et al.*; Inguanzo *et al.*; citados en Karaca *et al.* 2018; Gonzales, 2015).

Para un adecuado análisis de las aptitudes de los lodos para la pirólisis e incineración es necesario determinar los siguientes parámetros.

- **Análisis elemental: Carbono (%), hidrógeno (%), oxígeno (%), nitrógeno (%) y azufre (%)**

La determinación de la concentración de estos elementos permite identificar, en cierta medida, los gases que se desprenderán durante la incineración de un material. Ellos pueden ser: SO₂, CO₂, CO y NO_x (Colomer *et al.* 2010).

- **Análisis proximal: Humedad (%), material volátil (%), cenizas (%) y carbono fijo (%)**

La determinación de estos parámetros permite predecir el comportamiento de un combustible, así como distinguir la fracción inerte (porcentaje de cenizas y humedad) de aquella que almacena la energía química del biosólido (porcentaje de material volátil y carbono fijo). Se considera materiales volátiles a los gases y vapores, diferentes a la humedad, desprendidos durante la descomposición térmica de la biomasa. Luego de la liberación estos materiales, se produce la combustión del carbono fijo, el cual es un indicador de la producción de coque o char. Finalmente, una vez oxidado todo el carbono fijo, se obtienen residuos inertes llamados cenizas. La relación entre el contenido de material volátil y carbono fijo indica la reactividad del combustible cuya magnitud varía inversamente proporcional al contenido de carbono fijo (García & Rezeau, 2010 y López & Lena, 2010).

- **Análisis de poder calórico: Poder calórico inferior (PCI) (KJ/kg), Poder calórico superior (PCS) (KJ/kg).**

El poder calórico de un combustible se entiende como el calor desprendido durante la combustión completa de dicho material como consecuencia de la transformación de la energía química del combustible en energía térmica. Dependiendo del estado físico del agua formada producto de la oxidación del hidrógeno y de la proveniente de la biomasa se tienen dos tipos de poder calórico: inferior si el agua se encuentra en estado gaseoso y superior si el agua se encuentra es estado líquido (García & Rezeau, 2010 y López & Lena, 2010).

A continuación, en las Tablas 19 y 20 se muestran resultados de análisis calórico, elemental y termogravimétrico para diferentes tipos de lodos.

Tabla 19: Poder calórico de diferentes tipos de lodos

Tipo de lodo	Poder Calórico (kJ/kg solido seco)
Lodo crudo primario	23300-29000
Lodo digerido anaeróbicamente	12793
Lodo activado	19770-23300

Nota. Recuperado de “Sludge transformation and disposal methods”, de Ludovice, M. & Fernandes, F. 2007. p. 213. Londres, Reino Unido: IWA.

Tabla 20: Análisis proximal, elemental y calórico de diferentes tipos de lodos

Parámetros	Inguanzo <i>al.</i> (2002)	<i>et</i> Ospanov <i>al.</i> (2015)	<i>et</i> Pedroza <i>al.</i> (2014)	<i>et</i> Dominguez (2006)	Karac <i>et al</i> 2018
Características de la WWTP					
Aguas Residuales					
COD (mg/L)	NA*	NA	NA	NA	535
Edad del lodo ^(d)	NA	NA	NA	NA	30
Fuente del lodo	Digerido anaeróbicamente	Tanque de sedimentación secundaria	Digerido aeróbicamente	Digerido aeróbicamente	Digerido anaeróbicamente
Lodo HHV (kj/kg)	16.527	21.234	21.087	16.694	14.435
Características del lodo					
Humedad %	5.2	5.3	6	71	6
Ceniza %	29.5	30	38	31	33
Material Volátil %	60.7	65	54	62	55
Carbono %	35	47.7	28	52	34
Rendimiento total del producto					
Gas %	17	17	24	30	34
Solido %	45	42	52	10	42
Liquido %	40	41	24	57	23

Continuación...

Energía					
Gas %	22	17	20	28	48
Solido %	12	24	14	4	29
Líquido %	63	54	20	5	26
Recuperación de energía** (%)	85	71	40	33	74
kJ/kg lodo orgánico	23.313	23.096	15.48	11.297	15.606

Nota. * NA: no disponible. ** Calculado en base a alquitrán y gas de síntesis. Recuperado de “High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery” de Karaca, C.; Sözen, S.; Orhon, D. y Okutan, H 2018. p. 224. ELSEVIER. 78:217-226.

III. METODOLOGÍA Y MATERIALES

3.1. Metodología

3.1.1. Selección de parámetros de análisis y laboratorios

En función a los objetivos de la presente tesis, los cuales son determinar el cumplimiento del DS-N°015-2017-VIVIENDA y proponer alternativas de estabilización e higienización y aprovechamiento, bajo un enfoque agronómico y energético, de lodos de PTAR y BES, se consideró la determinación de los parámetros señalados en las Tablas 21 y 22.

Tabla 21: Metodologías de medición de parámetros fisicoquímicos

Parámetro	Metodología	Laboratorio
Carbono (%)		
Nitrógeno (%)	ASTM D5373/Mét. A	
Hidrógeno (%)		
Oxígeno (%)	Absorción infrarroja no dispersiva optimizada de bajo ruido	Lab. Energías Renovables de la UNALM
Azufre (%)	ASTM D1552	
Humedad (%) ^(a)		
Material volátil (%) ^(b)	ASTM D7582	
Cenizas (%) ^(c)		
Carbono fijo (%) * ^(d)		
Poder calórico superior (Cal/g)	ASTM D5865	
Poder calórico inferior (Cal/g)		
Arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel, mercurio y zinc (mg/kg)	ES_EPA3051_6020	SGS
P y K (mg/kg)	ES_EPA3051_6020	
Sólidos volátiles (%)		Lab. de Ingeniería Ambiental de la UNALM
Sólidos fijos (%)	SM 2540 G-1997	
Sólidos totales (%)		

Nota: La suma de a, b, c y d es igual a la unidad. * Calculado matemáticamente.

Tabla 22: Metodologías de medición de parámetros microbiológicos

Parámetro	Metodología	Laboratorio
E. coli (NMP/1g ST)	Filtro por membrana	Lab. de Saneamiento y Medio Ambiente de la UNALM
Huevos de helmintos	NOM-004-SEMARNAT-2002	UNALM

3.1.2. Selección de sistemas de saneamiento

a. PTAR

Se realizó una amplia búsqueda bibliográfica para identificar los diferentes tipos de lodos producidos en el país. Si bien estos pueden variar de acuerdo con las características del efluente, se consideró como factor diferencial a la tecnología de la cual éstos provienen. Es decir, unidades de tratamiento dentro de las líneas de agua o lodo según sea el caso pues no todas las PTAR llegan a tratar completamente los lodos generados. Posteriormente se consideraron los siguientes criterios para la selección de las PTAR:

- Tipo de lodo generado
- Representatividad de la tecnología de tratamiento empleada
- Accesibilidad y cercanía a Lima
- Vigente y adecuada operación de la planta

La Tabla 23 muestra las PTAR que fueron seleccionadas dentro del proyecto.

Tabla 23: PTAR seleccionadas

Tipo de lodo	PTAR	Unidad de tratamiento
Lodos provenientes de tecnologías anaerobias	Totora	Tanque Imhoff
	Huáscar	Laguna anaerobia
	San Jerónimo	Biodigestor
Lodos provenientes de tecnologías aerobias	Cieneguilla	Lodos activados de aireación convencional
	Santa Clara	Lodos activados con aireación extendida
	La Escalerilla	
	San Bartolo	Laguna aireada de mezcla parcial
Manchay	Sistema ICEAS	

b. BES

A través de una búsqueda bibliográfica se identificaron los principales sistemas de saneamiento *in situ* desarrollados en el país. Posterior a ello, se identificaron también a los centros, instituciones u empresas que promueven el uso de dichos sistemas. Finalmente se consideraron los siguientes criterios de selección.

- Representatividad del sistema de saneamiento empleado
- Periodo de permanencia del lodo fecal en las cámaras de almacenamiento
- Tipo de material secante empleado
- Accesibilidad y cercanía a Lima
- Vigente y adecuada operación del sistema

La Tabla 24 muestra los sistemas de saneamiento *in situ* seleccionados.

Tabla 24: Sistemas de saneamiento *in situ* seleccionados

Tipo de lodo	BES	Tipo de baño	Periodo de almacenamiento de lodos
Crudos	X-Runner	Móvil	Una semana
Parcialmente estabilizados	Arrebol	Móvil Fijo	Un mes Un año

3.1.3. Selección de puntos de muestreo

a. PTAR

- **PTAR Totora**

Los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR Totora se ubicaron a la salida del sistema de purga del tanque Imhoff (N°4), en el lecho de secado y en la pila de composta empírica (ver Figura 8). Los códigos de campo de estos puntos fueron TO-IM4 y TO-SC, respectivamente.

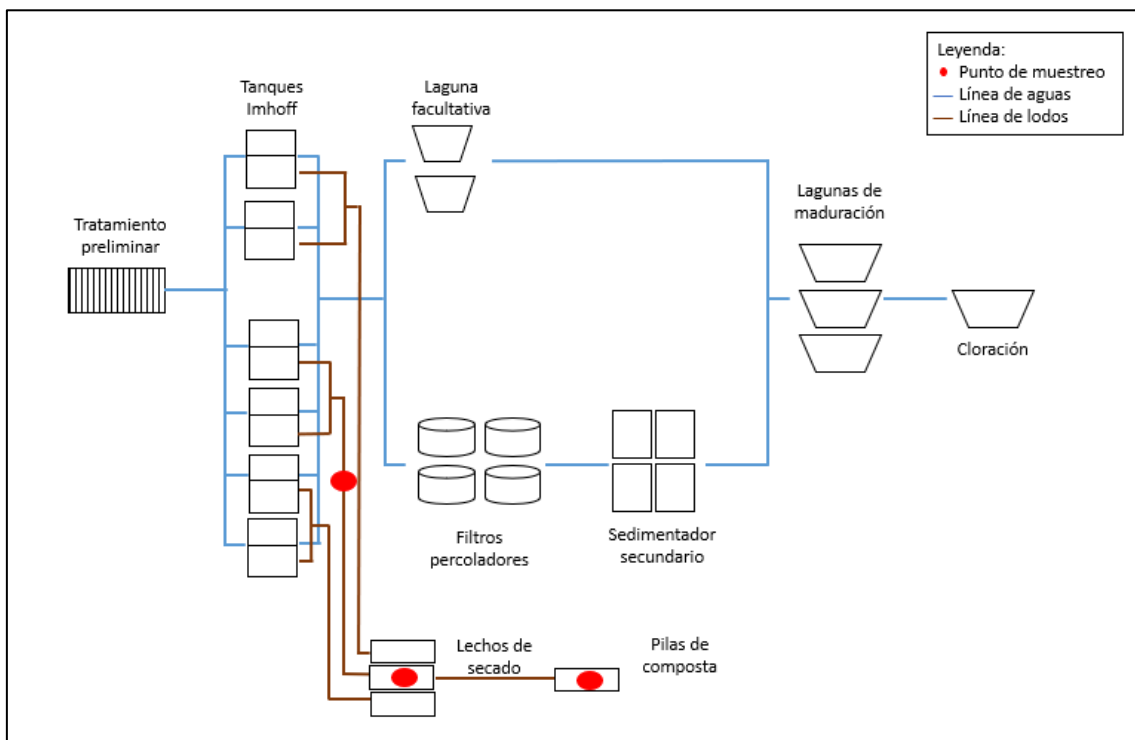


Figura 5: Puntos de muestreo de lodos PTAR Totora

- **PTAR Huáscar**

El punto de muestreo seleccionado en la PTAR Huáscar se ubicó al término del sistema de purga de lodos de la laguna anaerobia (ver Figura 5). El código de campo de este punto fue HU-LAN.

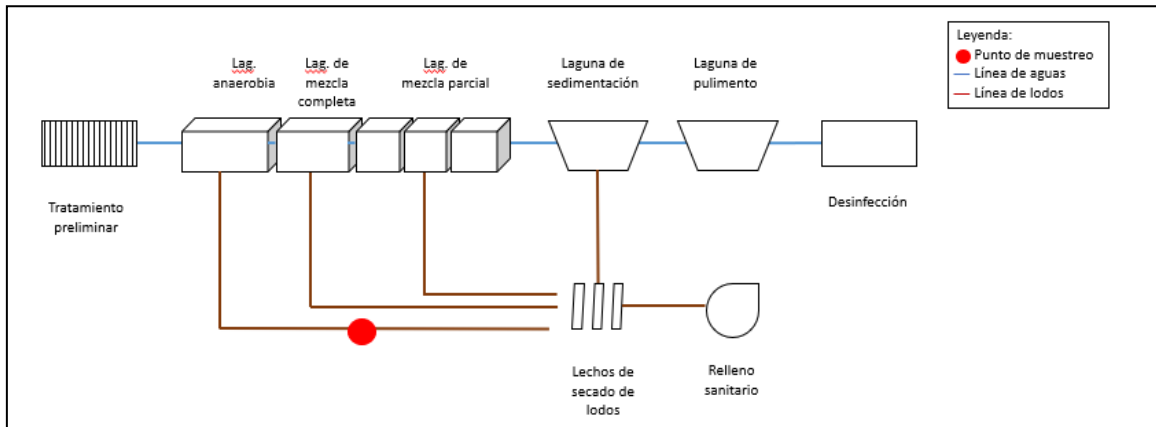


Figura 6: Sistema de tratamiento de PTAR Huáscar

- **PTAR Manchay**

Los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR Manchay se ubicaron en la válvula de purga del tanque aireado y en la salida de la centrífuga de lodos (ver Figura 7). Los códigos de campo de estos puntos fueron MA-TA y MA-CE, respectivamente.

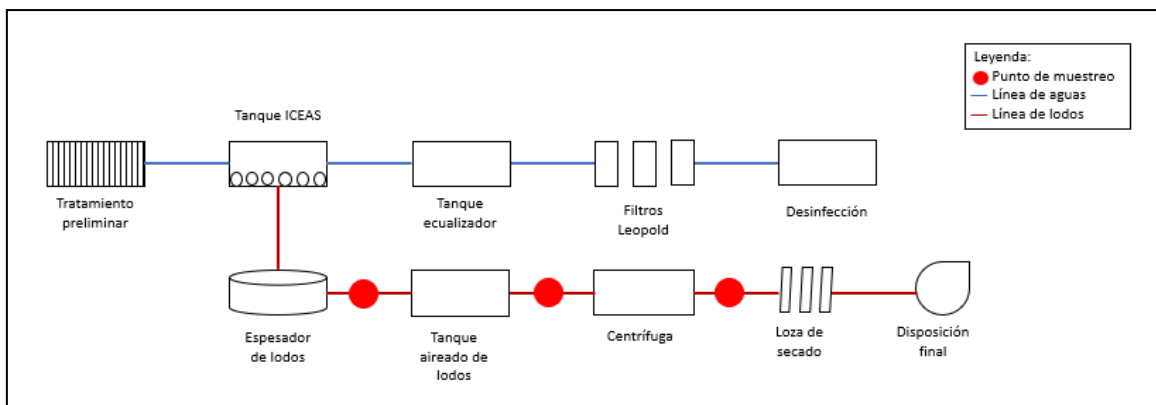


Figura 7: Sistema de tratamiento de la PTAR Manchay

- **PTAR Santa Clara**

Los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR Santa Clara se ubicaron en las válvulas de purga del clarificador y el espesador y en la salida de la centrifugadora (ver Figura 9). Los códigos de campo de estos puntos fueron ST-CL, ST-ES y ST-CE, respectivamente.

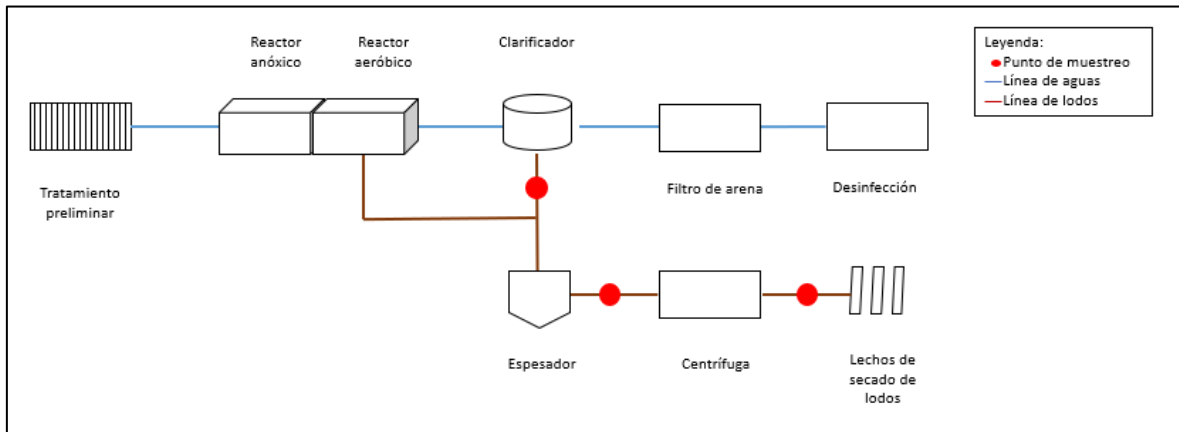


Figura 8: Puntos de muestreo de lodos PTAR Santa Clara

- **PTAR Cieneguilla**

Los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR Cieneguilla se ubicaron al término del sistema de retorno del concentrador de lodos y en el lecho de secado (ver Figura 12). Los códigos de campo de estos puntos fueron CI-CR y CI-LS, respectivamente.

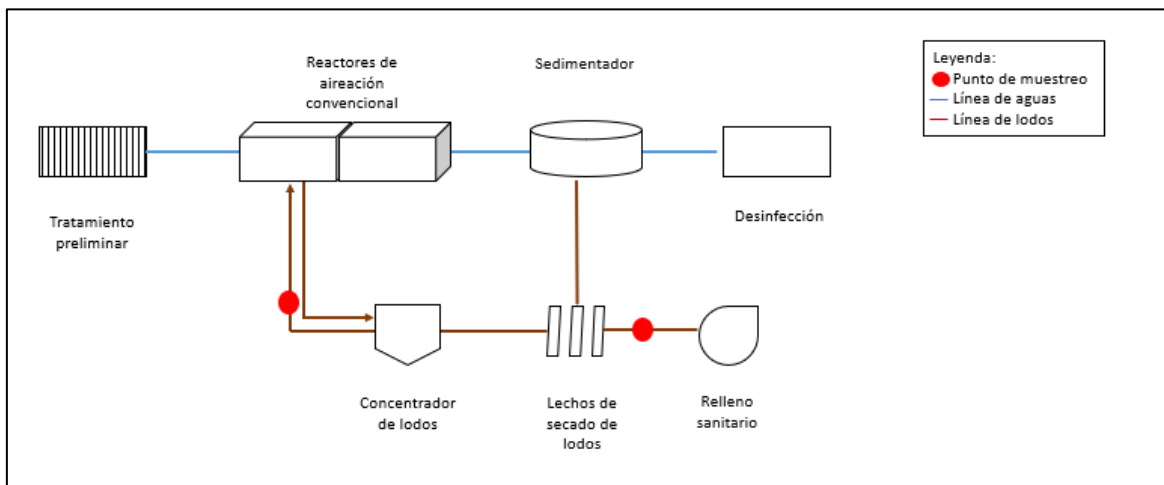


Figura 9: Sistema de tratamiento de la PTAR Cieneguilla

- **PTAR La Escalerilla**

Los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR La Escalerilla se ubicaron en las válvulas de purga del espesador, el lecho de secado y el secador solar (ver Figura 11). Los códigos de campo de estos puntos fueron LE-ES, LE-SS y LE-ST, respectivamente.

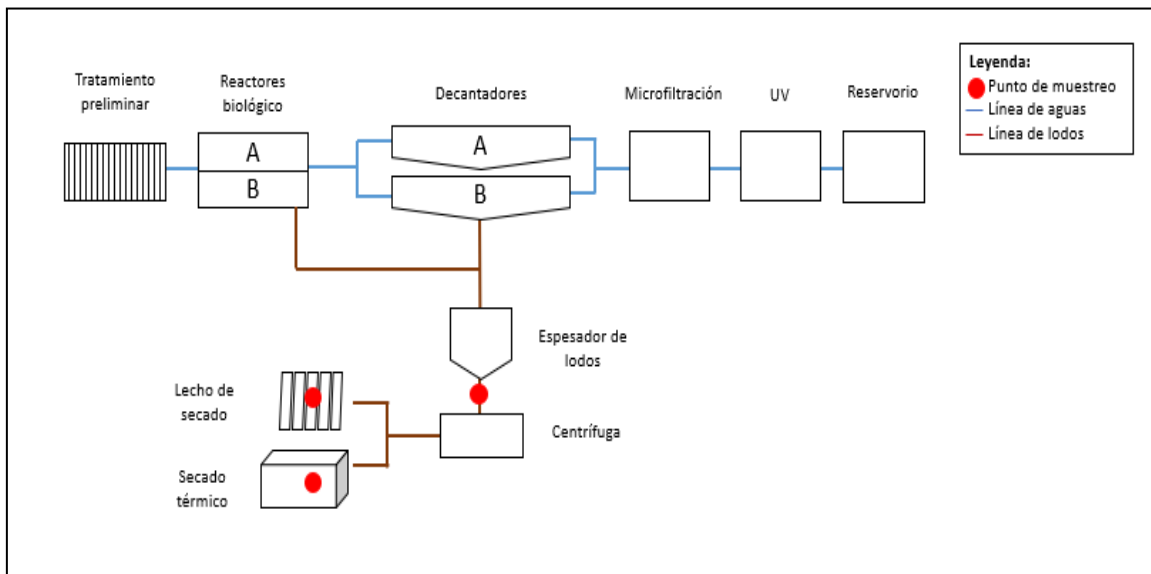


Figura 10: Puntos de muestreo de lodos PTAR La Escalerilla

- **PTAR San Bartolo**

El punto de muestreo seleccionado en la PTAR San Bartolo se ubicó al término del sistema de purga de lodos de la laguna de mezcla parcial (ver Figura 6). El código de campo de este punto fue SB-LA.

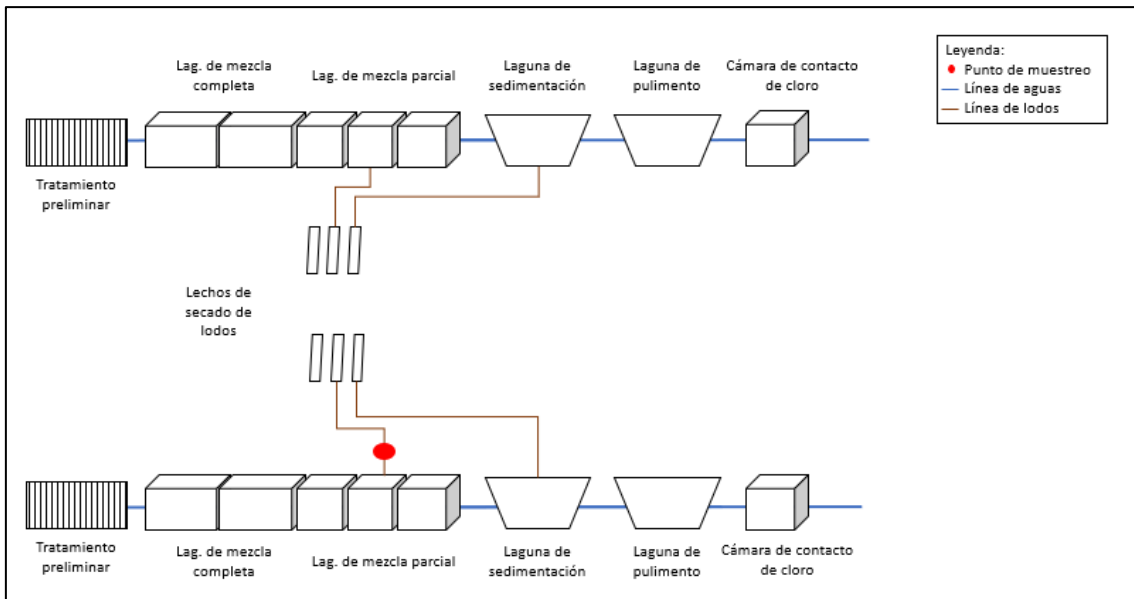


Figura 11: Sistema de tratamiento de PTAR San Bartolo

- **PTAR San Jerónimo**

Los puntos de muestreo seleccionados en la PTAR San Jerónimo se ubicaron en las válvulas de purga del espesador y el digestor anaerobio y en la salida de la centrífuga (ver Figura 10). Los códigos de campo de estos puntos fueron SJ-ES, SJ-DA y SJ-CE, respectivamente.

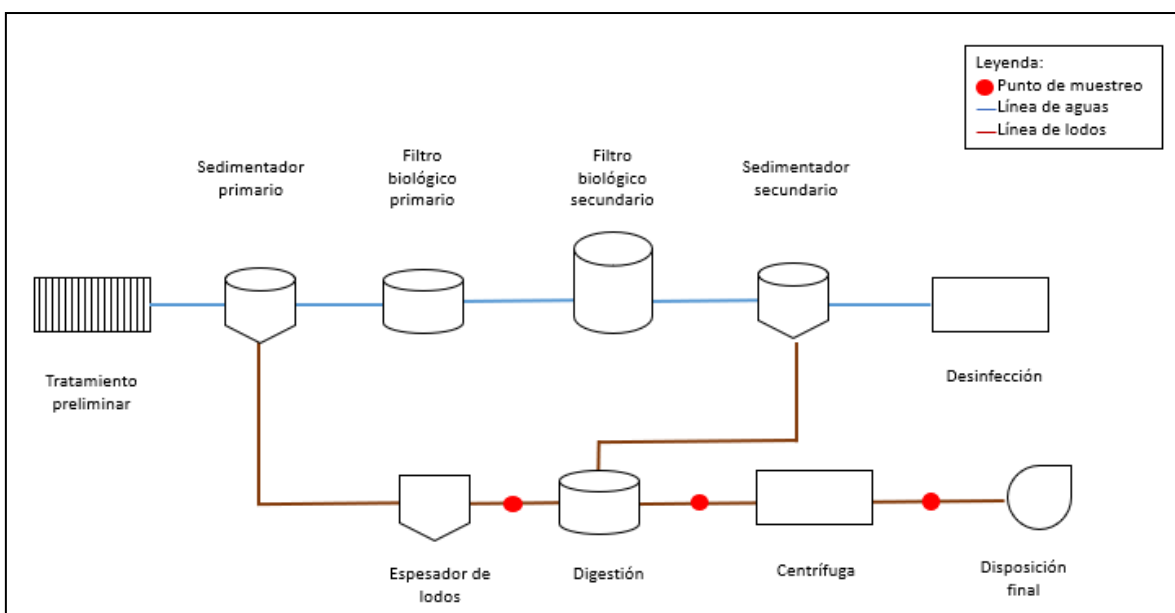


Figura 12: Puntos de muestreo de lodos PTAR San Jerónimo

b. BES

Los baños secos son unidades individuales compuestas principalmente por una taza, un tubo de ventilación y una o dos cámaras de almacenamiento. Por lo tanto, los puntos de muestreo seleccionados en los sistemas de saneamiento *in situ* de las empresas X-Runner y Arrebol se ubicaron dentro de las cámaras de almacenamiento semanal y mensual y anual, respectivamente. Los códigos de campo de estos puntos fueron XR-BS y AR-BS.

3.1.4. Estimación de las cantidades producidas de lodos

En cada PTAR y punto de instalación de saneamiento *in situ* se levantó información respecto a las cantidades de lodos producidas, mediante la utilización de encuestas dirigidas a los operarios y usuarios. La información recopilada permitió estimar la producción de diaria, mensual y anual de lodos.

3.1.5. Toma y manejo de muestras

a. Muestreo

- **Muestreo de lodos de aguas residuales**

La toma de muestras de lodos de PTAR se realizó en base a lo establecido en la RM N° 093-2018-VIVIENDA, Protocolo de Monitoreo de Biosólidos. Sin embargo, debido a dificultades suscitadas en campo, se realizaron ciertas modificaciones a los procedimientos establecidos en el protocolo en mención. El muestro comprendió lodos finales e intermedios. Si bien el DS-015-2017-VIVIENDA únicamente aplica para los finales (próximos a ser comercializados o reaprovechados), conocer las características de los intermedios permitirá conocer el funcionamiento y la eficiencia de las unidades de tratamiento de las líneas de agua y lodo.

En cada PTAR, con excepción de las de provincia y Santa Clara, se llevaron a cabo tres muestreos con frecuencias de aproximadamente 15 días. Por motivos logísticos y económicos sólo realizó una toma de muestras en las plantas de Arequipa, Cusco y Ayacucho. En la PTAR Santa Clara, por el contrario, se realizaron dos muestreos adicionales con el propósito de reportar resultados representativos, dado que, en el mes de setiembre de 2018, la puesta en marcha del segundo reactor biológico de la planta ocasionó la pérdida de lodos del primero. Para recuperarlos, los operarios se vieron obligados a paralizar la línea de lodos durante las jornadas diurnas.

La obtención de muestras de lodos líquidos de aguas residuales estuvo facilitada por la presencia de válvulas de escape en cada una de las unidades de las líneas de lodos de las plantas. Se tomaron tres muestras simples, de cuatro litros cada una, a intervalos de 30 minutos siempre que la generación de lodos se encontrase continua. A continuación, a fin de formar una muestra compuesta, las muestras simples fueron vertidas en un recipiente, de 20 litros de capacidad, para su adecuada homogenización. Por último, el lodo mezclado fue depositado en frascos de plásticos de un litro, previamente etiquetados y rotulados, para su envío a los laboratorios antes mencionados.

El muestreo de lodos semisólidos, como los resultantes de los procesos de centrifugación, se llevó a cabo del mismo modo que el de los lodos líquidos debido a que la operación de las centrífugas es continua. Las muestras simples fueron homogenizadas manualmente para la formación de las muestras compuestas.

- **Muestreo de lodos fecales**

La toma de muestras de los lodos de la empresa Arrebol implicó el ingreso a las viviendas de los usuarios, por lo cual sólo se tomaron tres muestras simples de las cámaras de almacenamiento anual y dos de las cámaras de almacenamiento mensual.

Por otro lado, los lodos fecales de la empresa X-Runner fueron muestreados dentro de su planta de transferencia pues a diferencia Arrebol, la primera además de ofrecer baños secos a los usuarios, se encarga del recojo (semanal), transporte y disposición final de los lodos.

En la planta se escogieron, aleatoriamente, quince bolsas de lodos y se dividieron en tres grupos. Luego, a partir de estos, se formaron tres muestras compuestas de un litro de volumen.

b. Preservación y transporte de muestras

Las muestras recolectadas, envasadas y rotuladas estuvieron acompañadas por una cadena de custodia dentro de un cooler con refrigerantes (gel pack) para lograr su conservación hasta su llegada a los laboratorios.

3.1.6. Determinación del cumplimiento del DS-N°015-2017-VIVIENDA

Una vez realizada la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos de PTAR y baños secos, se compararon los resultados encontrados en los lodos muestreados con los establecidos en el DS N°015-2017-VIVIENDA. De esta manera, se determinó a qué tipo de biosólidos (A o B) pertenecen los lodos estudiados.

3.1.7. Selección de alternativas de estabilización y aprovechamiento de lodos

Se propusieron tratamientos de estabilización para aquellos lodos que incumplieron las concentraciones límites de materia orgánica y microorganismos patógenos del DS N°015-2017-VIVIENDA. Las propuestas se basaron en los resultados de las caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas realizadas y en el análisis de información detallada en libros y artículos científicos. Ello permitió identificar las ventajas, desventajas, requerimientos y eficiencias de los tratamientos.

De igual manera, los métodos de aprovechamiento fueron propuestos en base a las características fisicoquímicas y microbiológica de cada lodo y al análisis de información detallada en libros y artículos científicos sobre experiencias en el reúso de lodos.

Para la determinación de las cualidades agronómicas de los lodos se evaluaron los siguientes parámetros: C (mg/kg), N (mg/kg), P (mg/kg), relación C/N, K (mg/kg), %SV(ST), As (mg/kg), Cd (mg/kg), Cr (mg/kg), Cu (mg/kg), Pb (mg/kg), Hg (mg/kg), Ni (mg/kg) y Zn (mg/kg). Por otro lado, las cualidades energéticas fueron evaluadas con: PCI (KJ/kg), PCS (KJ/kg), cenizas (%), humedad (%), carbono fijo (%) y material volátil (%).

3.2. Materiales

3.2.1. Toma de muestra

- Frascos de plástico de 1 litro
- Galoneras de 20 litros
- Baldes de 4 y 20 litros
- Agitador
- Equipos de protección personal
- Cooler
- Gel pack
- Bolsas de polietileno con cierre hermético de 0,70 m x 0,50 m.

3.2.2. Materiales de laboratorio

- Crisoles
- Tubos Falcon (45ml)
- Espátulas
- Pinzas

3.2.3. Equipos de laboratorio

- Mufla
- Estufa
- Vortex
- Centrífuga
- Balanza digital

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Producción de lodos

4.1.1. PTAR

En la Tabla 25 se presentan los valores de producción mensual de lodos en las PTAR dirigidas por SEDAPAL durante el año 2018. En la Tabla 26 se muestran los valores máximos y mínimos del año en mención y las toneladas de lodos producidas por litro de agua residual tratada por segundo. Los valores promedios de producción de lodos no fueron calculados debido a la alta variabilidad de la información.

Esta variabilidad lodos puede asociarse a periodos de mantenimiento de las unidades de tratamiento, paralizaciones en la línea de lodos (producto de problemas técnicos) o frecuencias de vaciado de los lechos de secado. Otra causa posible es la contabilidad conjunta de los lodos primarios y secundarios, pues la data reportada por SEDAPAL corresponde a la cantidad total de lodos entregados a la EPS-RS encargada del transporte de estos materiales al relleno sanitario.

Al comparar las relaciones “lodo-caudal” calculadas en base a las producciones mínimas y máximas de lodos, se advierte que las plantas con sistemas de tratamiento de aireación extendida generan más lodos que aquellas con sistemas de lagunaje (aerobio) y lodos activados de aireación convencional. Los rangos de producción de las PTAR Santa Clara y

Manchay fueron de 0.3 a 1.6 y de 0.7 a 1.6 toneladas de sólidos totales de lodo por litro de agua residual tratada por segundo (ver Tabla 26). Estos resultados son contrarios a los esperados, pues una de las ventajas de la aireación extendida sobre la convencional es la menor producción de lodos como consecuencia de una edad de los lodos mayor. Por otro lado, la operación de las lagunas aireadas de mezcla parcial, usadas en la PTAR San Bartolo, genera los niveles más bajos de producción de lodos con 0.0003 y 0.04 toneladas de sólidos totales por litro de agua residual tratada por segundo. Respecto al comportamiento mensual de esta planta, en la Tabla 25 se aprecia como en el mes de julio la producción de lodos se eleva exponencialmente y toma un valor de 811.9 toneladas. Se cree que este valor atípico corresponde a una jornada de limpieza de las lagunas. Tilley, Ulrich, Lüthi, Raymond y Zurbrugg (2014) explican que la remoción de lodos en lagunas de mezcla completa debe llevarse a cabo cada dos a cinco años y en una frecuencia mayor en lagunas facultativas. Estas edades de lodos además de conducir a la estabilidad de estos provocan una reducción de su masa y volumen. Una situación similar ocurre con la PTAR Cieneguilla, que el mes de marzo registró su mayor producción de lodos, 167.4 toneladas. Los demás meses sólo se generaron entre 4.1 y 22.11 toneladas.

Sobre la información concerniente a la producción promedio mensual de lodos de las plantas ubicadas en el interior del país, es preciso señalar, que fue obtenida mediante entrevistas realizadas al personal a cargo de dichas instalaciones. Estos valores y las toneladas producidas de lodos por litro de agua residual de tratada por segundo se encuentran consignados en la Tabla 27.

Entre las tecnologías de tratamiento evaluadas en este grupo, las de mayor generación de lodos son el filtro percolador-digestor anaerobio de la PTAR San Jerónimo y la aireación extendida de la PTAR La Escalerilla, con 0.46 y 0.5 toneladas de sólidos totales por litro de agua residual de tratada por segundo, respectivamente. Como era esperado, los tanques Imhoff, unidades anaerobias, produjeron menos lodos que las tecnologías aerobias. Por cada litro de aguas residual tratada por segundo la PTAR Totora generó 0.27 toneladas de sólidos totales.

Todas las plantas de tratamiento evaluadas en Lima disponen sus lodos en rellenos sanitarios; esta situación genera altos costos para la EPS SEDAPAL, con valores estimados en 100 soles por tonelada desechada. La PTAR Totorá, La Escalerilla y San Jerónimo, en cambio, al estar registradas en RENAPROB (Registro Nacional de Producción y Reaprovechamiento de biosólidos), han iniciado la comercialización de sus lodos.

Tabla 25: Producción de lodos mensual en las PTAR de SEDAPAL

PTAR	Caudal de diseño (l/s)	Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre
Cieneguilla	118	Caudal (l/s)	41.4	55.6	77.2	82.6	77.3	69.6	68.4	63.9	48.9
		Lodos (t)	12.7	22.11	167.4	-	4.08	12.8	21.6	-	-
Santa Clara	437	Caudal (l/s)	174.6	175	169.2	170.5	158.8	157.3	161.4	177.9	212.3
		Lodos (t)	1569.4	1198	1745.8	1007.5	857	1041.9	1076.8	891.5	376
Manchay	60	Caudal (l/s)	52.8	51.4	56.5	54.1	53.6	50	49.4	50.9	54.6
		Lodos (t)	275.6	301.4	505.1	295.6	234.4	465	253.4	517	303.2
San Bartolo	1700	Caudal (l/s)	1149.2	1150.6	1190.1	1207.3	1179.6	1170.5	1151.9	1189.2	1201.3
		Lodos (t)	47.42	24.1	24.6	23.7	6.9	83.1	811.9	6.4	7.2

Tabla 26: Producción mínima y máxima de lodos por mes, en las PTAR de SEDAPAL

PTAR	Producción mínima		Producción máxima		t de lodo/ l/s de agua residual tratada			
					Base húmeda		Base seca ^(a)	
	Caudal (l/s)	Lodos (t)	Caudal (l/s)	Lodos (t)	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Cieneguilla	77.3	4	77.2	167.4	0.05	2.2	0.005	0.2
Santa Clara	212.3	376	169.2	1745.8	1.8	10.3	0.3	1.6
Manchay	53.6	234.4	50.9	517.1	4.4	10.2	0.7	1.6
San Bartolo	1189.2	6.4	1151.9	811.9	0.005	0.7	0.0003	0.04

Nota: ^(a) Calculado en base al contenido de sólidos totales de los lodos finales de cada PTAR presentados en la Tabla 29.

Tabla 27: Producción promedio mensual de lodos en las PTAR de provincias

PTAR	Caudal de diseño (l/s)	Caudal (l/s)	Lodos (t)	t lodos por l/s de agua residual tratada	
				Base húmeda	Base seca ^(b)
Totora	543	355	116.7 ^(a)	0.3	0.27
San Jerónimo	446	570	900 ^(a)	1.6	0.46
La Escalerilla	260	90	51	0.6	0.5

Nota: ^(a) Considerando una densidad igual a 1000 kg/m³. ^(b) Calculado en base al contenido de sólidos totales de los lodos finales de cada PTAR presentados en las Tablas 29 y 30.

4.1.2. BES

En la Tabla 28 se presentan los valores promedio de producción anual de lodos fecales de baños secos con cámaras de almacenamiento semanal y anual pertenecientes a las empresas X-Runner y Arrebol. El peso de los lodos incluye a las heces y al aserrín (material secante).

Los sistemas manejados por X-Runner generan, semana a semana, diez kilos de lodos fecales húmedos por familia. Esta frecuencia de vaciado no permite la degradación y reducción del volumen de los lodos. En consecuencia, la cantidad de heces retirada de las cámaras no difiere sustancialmente de la excretada por las personas (Strande *et al* 2018). Asumiendo un total de cinco integrantes por familia, se puede estimar que la producción de lodos per cápita anual de estos baños es igual a 96 kilos. De estos, aproximadamente 45 kilos corresponden a aserrín, pues Vinnerås (2002) refiere que una persona puede producir alrededor de 51 kilos de heces al año. Se infiere entonces, que el uso de aserrín como material secante puede incrementar hasta el 88 por ciento la masa de lodo fecal.

Los baños secos de Arrebol con cámaras de almacenamiento anual capaces de permitir una mayor reducción del volumen y masa de los lodos fecales producen producen 50 kilos de lodo por persona al año. Esta cantidad representa sólo el 52 por ciento de la generada por X-Runner. Sin embargo, al comparar las producciones de ambos sistemas en base seca se observa que estas sólo difieren en 2.4 kilos por persona.

Tabla 28: Producción promedio anual de lodos fecales por familia en los BES

BES	Lodos			
	Base húmeda		Base seca ^(b)	
	kg / familia	kg/persona ^(a)	kg / familia	kg/persona ^(a)
X-Runner	480	96	170.9	34.2
Arrebol	250	50	159.0	31.8

Nota: ^(a) 5 personas por familia. ^(b) Calculado en base al contenido de sólidos totales de los lodos finales de cada PTAR presentados en la Tabla 31.

4.2. Cumplimiento de los parámetros del DS-N°015-2017-VIVIENDA

4.2.1. Parámetros de estabilización

a. PTAR

De acuerdo con el DS-N°015-2017-VIVIENDA, sólo se consideran biosólidos tipo A o B, a aquellos lodos cuya concentración de sólidos volátiles, en base seca, es menor o igual a 60 por ciento. Sperling y Gonçalves (2007) señalan que este parámetro es un buen indicador de la fracción orgánica de los lodos. Sin embargo, a diferencia de la normativa peruana, estos autores consideran que los sólidos de un lodo digerido pueden contener hasta 65 por ciento de sólidos volátiles.

Los resultados de los análisis de sólidos muestran que los lodos finales que cumplen con el parámetro de estabilización impuesto por el Ministerio de Vivienda son los provenientes de las PTAR La Escalerilla (lodos activados de aireación extendida), Santa Clara (lodos activados de aireación extendida), San Bartolo (laguna aerobia), San Jerónimo (filtro percolador-digestor anaerobio), Totorá (tanques Imhoff-lecho de secado) y Huáscar (laguna anaerobia) (ver Tabla 29 y 30).

La PTAR La Escalerilla cuenta con dos sistemas de secado de lodos, secado solar y convencional. A el primero se dirige el 40 por ciento de los lodos centrifugados mientras que al segundo 60 por ciento. El secador solar reduce la humedad de los lodos a 4 por ciento

y el lecho a 10 por ciento. En algunas oportunidades con la intención de reducir el tiempo de secado de los lodos dispuestos en el lecho convencional, la PTAR opta por mezclar a estos con los procedentes del secador solar. Adicionalmente al contenido de humedad, la fracción orgánica de los lodos también disminuye a causa de la temperatura y periodo de permanencia en las unidades de secado. De 75 por ciento, la concentración de sólidos volátiles pasó a 59.8y 60.4 por ciento en los lodos extraídos del lecho y del secador solar, respectivamente. Cabe mencionar que la concentración de material volátil del lodo espesado, 75 por ciento resultó mayor a la esperada, pues de acuerdo con Sperling y Gonçalves (2007), un lodo secundario aeróbico procedente de un reactor de lodos activados con aireación extendida suele contener entre 65 y 70 por ciento de sólidos volátiles.

Los lodos del clarificador de la PTAR Santa Clara, por su parte, a pesar de ser originados también bajo la tecnología de aireación extendida, resultaron con una concentración de sólidos volátiles menor a la advertida por los autores Sperling y Gonçalves (2007). Con 57 por ciento de sólidos orgánicos, estos lodos demostraron el buen funcionamiento de la planta pese a los problemas técnicos suscitados antes mencionados. En cuanto a los lodos finales de esta PTAR, se observa que cumplen con el parámetro de estabilización del DS-N°015-2017-VIVIENDA.

Otra PTAR operada por aireación extendida es Manchay, pero en contraste con las anteriores, los lodos finales de esta planta superan en 13 puntos porcentuales a la concentración máxima de sólidos volátiles permitida en biosólidos. Este exceso podría atribuirse a cortos e inadecuados periodos de purga de lodos o sobrecargas orgánicas en el caudal de ingreso. La sobrecarga hidráulica se descarta como posible causa, ya que como se observa en la Tabla 25 el caudal real no excede al de diseño (60 l/s).

El estudio de los lodos de estas tres plantas reafirma lo descrito por Uggetti *et al* (2002): “La cantidad de lodo producido y su composición dependen de las características del influente y del tratamiento de aguas residuales utilizado.” En todos los casos, aun cuando se empleó el mismo proceso de depuración, el grado de estabilidad de los lodos fue diferente. Empero, el Anexo 1 del DS-N°015-2017-VIVIENDA considera que los lodos provenientes de las tecnologías de lodos activados de aireación extendida, lagunas, filtros percoladores, tanques Imhoff, reactores anaerobios de flujo ascendente y manto de lodos y digestores son estables

por defecto. Esta conjetura no sólo podría conducir a clasificaciones de biosólidos erróneas sino también a atentar contra el medio ambiente y la salud de las personas.

La concentración de sólidos volátiles de las muestras de lodo de la PTAR San Bartolo, 44.9 por ciento, se encuentra dentro del rango reportado por la literatura para lagunas de estabilización, de 35 a 55 por ciento (Sperling y Gonçalves, 2007). Si bien el lodo de esta planta proviene de una tecnología de tratamiento aerobio su naturaleza es anaerobia. Las lagunas de mezcla parcial poseen una capa superior aerobia y una inferior anaerobia donde se origina el lodo (Silva, 2004).

Sperling y Gonçalves (2007) refieren que los lodos aeróbicos secundarios de aireación convencional suelen contener entre 75 y 80 por ciento de sólidos volátiles. No obstante, las muestras tomadas a la salida de la cámara de retorno de la PTAR Cieneguilla exhibieron una concentración promedio de 53 por ciento. Este grado de estabilidad podría deberse a una edad de lodo mayor a la establecida por la NTP OS.090 para este tipo de tratamiento de aguas residuales (4 a 15 días) o a ingresos de lodos maduros al reactor. Al operar con un caudal equivalente, aproximadamente, a la mitad del de diseño (ver Tabla 25) la planta opta por retener a sus lodos durante 40 a 60 días previo a su recirculación y disposición en los lechos de secado. La concentración de material volátil de los lodos finales de esta PTAR resultó igual a 65 por ciento, 12 unidades porcentuales mayor que la encontrada en los lodos recirculados. Si bien se esperaba una menor presencia orgánica en estos lodos, producto de su paso por el lecho, se debe tener en cuenta que las muestras de cada unidad provenían de influentes diferentes. Probablemente el que dio origen al lodo del lecho de secado contenía mayor concentración de materia orgánica que el vinculado al lodo de la cámara de retorno. El incumplimiento del parámetro de estabilización (60 por ciento SV) por parte de los lodos finales podría relacionarse a la proximidad entre la fecha de disposición en los lechos y la de muestreo, un mes.

Tabla 29: Concentración promedio de sólidos en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia		Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
					%Humedad	%ST	%(SV/ST)
DS-N°015-2017-VIVIENDA							%60
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01	98.3	1.7	75
			Lecho de secado	LE-SS-01	11.2	88.8	59
			Secador solar	LE-ST-01	4.1	95.9	60
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional	Cámara de retorno	CI-CR	99.2	0.8	53
			Lecho de secado	CI-LS-01	90.6	9.4	65
	Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA	97.7	2.4	64
			Centrífuga	MA-CE	83.9	16.1	73
	San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA	94.7	5.3	44
	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL	99.4	0.6	57
			Espesador	ST-ES	95.6	4.4	61
		Centrífuga	ST-CE	84.4	15.6	60	

Torres (2012) menciona que las tecnologías anaerobias de tratamiento de aguas residuales generan lodos estabilizados. Esta aseveración se confirmó en los análisis de sólidos practicados a los lodos de las PTAR San Jerónimo, Totorá y Huáscar (ver Tabla 30).

Con la intención de elevar la fracción orgánica y obtener así una mayor generación de metano, la PTAR San Jerónimo mezcla, espesa y digiere los lodos procedentes de los sedimentadores primarios y secundarios. La fracción orgánica de los lodos mixtos luego de ser tratados fue de 52 por ciento. Esta concentración es menor a la indicada por Sperling y Gonçalves (2007) quienes sostienen que los lodos digeridos contienen entre 60 y 65 por ciento de materia orgánica.

De las tres tecnologías anaerobias estudiadas, el tanque Imhoff fue la que produjo lodos con menor concentración de volátiles (ver Tabla 30). El largo periodo de permanencia en los lechos de secado (3 meses) redujo la humedad y material volátil de los lodos de 90.9 a 18.9 por ciento y de 44 a 21 por ciento, respectivamente. Sin embargo, al someter a los lodos a procesos empíricos de compostaje, con el objetivo de mejorar sus propiedades agronómicas, la humedad se elevó a 50.8 por ciento y los sólidos volátiles a 39 por ciento.

Tabla 30: Concentración promedio de sólidos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros			
				%Humedad	%ST	%(SV/ST)	
DS-N°015-2017-VIVIENDA				60%			
PTAR PROVINCIAS	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Espesador	SJ-ES-01*	95.3	5.6	55
			Digestor anaerobio	SJ-DA-01	96.9	3.3	52
			Centrífuga	SJ-CE-01	67.2	29.4	50
	Totora	Tanques Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	90.9	9.1	44
			Lecho de secado	TO-LS-01	18.9	81.2	21
			Semi composta	TO-SC-01	50.8	49.2	39
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN	90.2	9.8	54

Nota: *Lodo proveniente de filtro percolador.

b. BES

Los lodos fecales presentan concentraciones de sólidos volátiles mayores a las encontradas en los lodos de PTAR. Los provenientes de la empresa X-Runner poseen una concentración promedio igual a 94 por ciento que excede en 34 unidades porcentuales al parámetro de estabilidad del DS-N°015-2017-VIVIENDA (ver Tabla 31). De igual manera, los lodos de la empresa Arrebol, con concentraciones iguales a 89 por ciento (cámara mensual) y 81 por ciento (cámara anual), superan la concentración límite permitida de sólidos volátiles.

La humedad es similar entre los lodos de las cámaras semanales, y mensuales. No obstante, en los lodos de las cámaras anuales, este parámetro se reduce en 40 por ciento, aproximadamente. La liberación de los vapores de agua, en los tres tipos de baños, se realiza mediante un tubo de ventilación (Dabbah *et al.* 2016).

En consecuencia, se podría afirmar que el aumento de los tiempos de almacenamiento de los lodos no sólo favorece a la degradación de la materia orgánica sino también a la disminución del grado de humedad de los materiales en cuestión.

Tabla 31: Concentración promedio de sólidos en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros			
				%Humedad	%ST	%(SV/ST)	
DS-N°015-2017-VIVIENDA						%60	
	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS	64.4	35.6	94
BAÑOS SECOS	Arrebol	Baños fijos	Cámaras mensuales	AR-BS (m)	60.2	39.8	89
			Cámaras anuales	AR-BS (a)	36.4	63.6	81

4.2.2. Parámetros de toxicidad química

a. PTAR

Los lodos muestreados, provenientes de tecnologías aerobias y anaerobias, contienen concentraciones de metales pesados menores a límites máximos impuestos por el DS-N°015-2017-VIVIENDA (ver Tabla 32 y 33).

La presencia de metales pesados en los influentes de las PTAR se debe a las descargas de efluentes no domésticos en el sistema de alcantarillado público (Loose, 2015). Dentro de las principales industrias contaminantes se tienen a las fabricantes de compuestos orgánicos (curtido e industria farmacéutica) e inorgánicos (lavanderías, industria petrolera y fabricación de tintes y pigmentos), fundidoras y galvanoplastia (Da Silva, Fernandes, Soccol y Morita, 2007). El MVCS con el objetivo de continuar con la regulación y control de estos vertimientos aprobó, en marzo de este año, un nuevo reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) a través del DS-N°010-2019-VIVIENDA.

Los lodos de la PTAR San Bartolo contienen las más altas concentraciones de metales pesados, con excepción de cromo y níquel que predominan en la PTAR Santa Clara y Huáscar, respectivamente. Este escenario podría deberse a una mayor contaminación de los influentes de estas plantas frente a las demás y/o a las altas eficiencias de remoción de metales de las tecnologías de lagunas aireadas y lodos activados. Dichas eficiencias pueden llegar, incluso, al 99 por ciento (Da Silva *et al.* 2007).

Tabla 32: Concentración promedio de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia		Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)							
					As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
DS-N°015-2017-VIVIENDA					40	40	1200	1500	400	17	400	2400
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01								
			Lecho de secado	LE-SS-01	4	1	334	145	52	0.6	14	674
			Secador solar	LE-ST-01	4	1	265	135	56	0.7	16	629
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional	Cámara de retorno	CI-CR	4	1	311	439	24	0.4	14	587
			Lecho de secado	CI-LS-01	7	1	307	431	36	0.5	14	582
	Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA	5	2	23	105	55	0.3	16	561
			Centrífuga	MA-CE	4	2	14	112	57	0.5	10	588
	San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA	20	5	276	453	120	5	25	1658
	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL	6	3	357	125	41	0.6	37	471
			Espesador	ST-ES	6	4	544	183	62	0.7	52	732
			Centrífuga	ST-CE	6	4	508	169	56	0.6	50	674

Tabla 33: Concentración promedio de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)								
				As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn	
DS-N°015-2017-VIVIENDA				40	40	1200	1500	400	17	400	2400	
	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Centrífuga	SJ-CE-01	7	1	22	135	27	0.6	13	791
PTAR PROVINCIAS	Totora	Tanques Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	4	0.7	55	73	36	0.6	33	369
			Lecho de secado	TO-LS-01	7	1	36	70	37	0.8	24	447
			Semi composta	TO-SC-01	6	0.8	25	50	37	0.8	16	438
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN	10	3	78	237	38	1.0	62	1509

b. BES

Los lodos fecales presentaron concentraciones de metales pesados menores a las encontradas en los lodos de PTAR (ver Tabla 34). Esta diferencia se debe a la naturaleza de los lodos, pues mientras que los primeros surgen a partir del tratamiento de aguas residuales contaminadas con efluentes industriales, los segundos proceden de la mezcla de heces y aserrín.

Al igual que en los lodos de PTAR, en los lodos fecales predomina el zinc. Esta similitud entre los lodos puede atribuirse a la presencia de aguas negras en el influente de las plantas de tratamiento. En la Tabla 34, se observa que la concentración de los metales aumenta de manera directamente proporcional al tiempo de almacenamiento. Se cree que esta variación surge producto de la degradación de la materia orgánica, pues si bien el incremento del tiempo de almacenamiento si favorece a la disminución de la cantidad de sólidos volátiles, no influye en la cantidad de metales.

A diferencia de los otros metales evaluados, el zinc puede ser ingerido a través de diferentes alimentos como mariscos, carnes rojas derivados lácteos, huevos, nueces, semillas, legumbres y cereales sin refinar (Rubio *et al.* 2007; López, Castillo y Diazgranados, 2010). Puede ser absorbido también mediante la inhalación de polvos o vapores provenientes de fundiciones o soldaduras de zinc. Trabajos de construcción, mecánica y pintura exponen también a sus trabajadores a zinc. El cuerpo humano excreta este metal, principalmente, mediante las heces. La orina, por otro lado, posee un papel secundario con una excreción menor al dos por ciento (Rubio *et al.* 2007).

Tabla 34: Concentración promedio de metales pesados en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)								
				As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn	
DS-N°015-2017-VIVIENDA				40	40	1200	1500	400	17	400	2400	
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS	<2.857	0.2	1	4	<0.346	<0.262	2	90
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras mensuales	AR-BS (m)	<2.857	0.7	1	24	1	<0.262	1	145
			Cámaras anuales	AR-BS (a)	<2.857	0.6	1	26	5	0.3	2	336

4.2.3. Parámetros de higienización

a. PTAR

El DS-N°015-217-VIVIENDA señala que un biosólido se clasifica como tipo A cuando sus concentraciones de *E. coli* y huevos de helmintos son menores a 1000 NMP/1gST y 1 HH (viable) /4gST, respectivamente y tipo B cuando proviene de las tecnologías contempladas en el Anexo 1 (lagunas facultativas, anaerobias y aerobias, tanques Imhoff, filtros percolador, RAFAML y lodos activados de aireación extendida) y Anexo 2 (secado al aire y mineralización) de dicho decreto.

Como se observa en la Tabla 35, todos los lodos analizados, provenientes de tecnologías aerobias, exceden entre 4 y 6 unidades logarítmicas a la concentración máxima normada de *E. coli* para biosólidos de tipo A. Las disminuciones de los contenidos de humedad de los lodos producto de su paso por centrifugadoras o lechos de secado convencionales no guardan relación proporcional con la disminución de los patógenos debido a que estas tecnologías no llegan a niveles de humedad críticos para los microorganismos.

La OMS (2013) indica que la *E. coli* puede crecer en ambientes donde la temperatura oscila entre los 6°C y 50°C, siendo su temperatura óptima 37°C. A escala de laboratorio, se ha determinado que esta bacteria se muere a 70°C con una exposición de 5 minutos y a 60°C con una exposición de 60 minutos (Pinto, 2007). El secador solar de la PTAR La Escalerilla opera, por lo general, en un rango de temperatura de 30°C a 40°C con un máximo de 50°C. Por esta razón, la concentración de *E. coli*, en los lodos, no disminuye significativamente al ser tratados en esta unidad.

Al igual que los lodos provenientes de tecnologías aerobias, los de tecnologías anaerobias no cumplen los requisitos para ser considerados de tipo A (ver Tabla 36). La reducción de coliformes en los lodos de la PTAR San Jerónimo, hasta alcanzar la higienización para ser comercializado como biosólido de Clase A, podría verse favorecida si la digestión se realizara a mayores temperaturas; tal como lo reportan Cheunbarn y Pagilla (2000), para un arreglo termofílico-mesofílico en el que se reduce el número de coliformes fecales de 8 log₁₀

a $2 \log_{10}$. De igual manera, Rojas y Cabirol. (2000), lograron en un sistema de dos fases, mesofílico-termofílico con un tiempo de retención hidráulico de 15 y 20 días, una reducción de coliformes termo tolerantes en $4.99 \log_{10}$.

Con respecto a los huevos de helmintos, en todos los casos se realizó el conteo mas no su viabilidad, debido a que, como se mencionó anteriormente, el DS-N°015-2017 no establece una concentración máxima de dicho parámetro para la clasificación de biosólidos de tipo B. Finalmente, en base a los análisis de sólidos, toxicidad química y microbiológicos realizados y a lo dispuesto en el DS-N°015-2017-VIVIENDA se puede concluir que los lodos finales provenientes de las PTAR La Escalerilla, San Bartolo, Santa Clara, San Jerónimo, Totorá y Huáscar son biosólidos de tipo B.

Tabla 35: Concentración promedio de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
				Coliformes Totales (UFC/g ST)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g ST)	Coliformes Termotolerantes (UFC/g ST)	H.H./4gST	
DS-N°015-2017-VIVIENDA BIOSÓLIDO TIPO A					<10 ³ NMP/1gST		<1 (viable)	
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos	Espesador	LE-ES-01	4.91E+02	2.00E+07	2.80E+07	6 ^a
		activados de aireación extendida	Lecho de secado	LE-SS-01	1.29E+10	5.00E+08	N. C	10 ^a
			Secador solar	LE-ST-01	5.00E+08	5.00E+07	N. C	2 ^a
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos	Cámara de retorno	CI-CR	2.10E+10	8.09E+09	1.40E+10	22 ^a
		activados convencional	Lecho de secado	CI-LS-01	1.51E+10	5.28E+09	8.93E+09	24 ^a
	Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA	2.62E+10	8.50E+09	1.56E+10	<1 ^a
			Centrífuga	MA-CE	1.29E+10	3.17E+09	4.40E+09	<1 ^a
	San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA	7.07E+09	1.10E+09	4.47E+09	35 ^a
	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL	1.53E+10	4.30E+09	9.67E+09	18 ^a
			Espesador	ST-ES	7.59E+09	2.04E+09	3.86E+09	11 ^a
		Centrífuga	ST-CE	5.81E+09	8.38E+08	2.26E+09	14 ^a	

Nota: N. C= No crecimiento. ^a Conteo de huevos sin determinación de viabilidad

Tabla 36: Concentración promedio de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
				Coliformes Totales (UFC/g ST)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g ST)	Coliformes Termotolerantes (UFC/g ST)	H.H./4gST	
DS-N°015-2017-VIVIENDA					<10 ³ NMP/1gST		<1 (viable)	
PTAR PROVINCIAS	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Espesador	ES-DA-01	1.94E+08	1.38E+07	8.60E+07	14 ^a
			Digestor anaerobio	SJ-DA-01	8.80E+08	5.40E+07	3.20E+07	8 ^a
			Centrífuga	SJ-CE-01	2.22E+08	7.50E+06	1.26E+08	15 ^a
	Totorá	Tanques Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	1.23E+10	6.53E+09	9.80E+09	11 ^a
			Lecho de secado	TO-LS-01	2.16E+09	9.60E+08	1.35E+09	7 ^a
			Semi composta	TO-SC-01	6.10E+09	2.70E+09	4.50E+09	18 ^a
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN	9.35E+09	1.65E+09	3.00E+09	20 ^a

Nota: ^a Conteo de huevos sin determinación de viabilidad

b. BES

Las concentraciones de *E. coli* presentadas por los lodos fecales de cámaras semanales, mensuales y anuales fueron $1.03E+08$ UFC/g ST, $1.58E+07$ UFC/g ST y $1.25E+05$ UFC/g ST, respectivamente (ver Tabla 37). Estos resultados muestran que si bien la contaminación por *E. coli* disminuye con el tiempo de almacenamiento, esta sobrepasa el límite máximo del DS-N°015-2017-VIVIENDA para un biosólido tipo A (10^3 NMP/1gST). Niwagaba (2009) sugiere que, a temperaturas ambientales iguales a 20°C, los lodos deben ser almacenados durante un año y medio a dos años y un año a 35°C.

Si bien los grados exponenciales de las concentraciones de *E. coli* de los lodos de almacenamiento semanal eran iguales a los de los lodos finales de la PTAR Santa Clara, Totorá y La Escalerilla (lecho de secado) y los de los lodos de almacenamiento mensual iguales a los de los lodos del secador solar de la PTAR La Escalerilla; las tecnologías de saneamiento *in situ*, a diferencia de diversos tratamientos de aguas residuales, no se encuentran contempladas en los Anexos 1 del DS-N°015-2017-VIVIENDA, por cual aunque los lodos fecales cumplieren con el parámetro de estabilización exigido por el MVCS no pueden ser clasificados como biosólidos tipos B.

El conteo de huevos de helminto reveló que los lodos fecales contienen entre 817 y 9917 huevos por cada cuatro gramos de sólidos totales (ver Tabla 37). Esta cantidad es muy superior a la encontrada en los lodos de PTAR, pues en ellos el conteo máximo fue de 35 H.H/4g ST. Montangero y Strauss, citado por Niwagaba *et al.* (2014) menciona que las concentraciones de helmintos son generalmente de 10 a 100 veces mayores en lodos fecales, en comparación con los lodos de aguas residuales.

Tabla 37: Concentración promedio de microorganismos patógenos en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
				Coliformes Totales (UFC/g ST)	Escherichia coli (UFC/g ST)	Coliformes Termotolerantes (UFC/g ST)	H.H. /4 gST	
DS-N°015-2017-VIVIENDA					<10 ³ NMP/1gST		<1 (viable)	
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS	1.87E+08	1.03E+08	1.40E+08	9917*
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras mensuales	AR-BS (m)	3.99E+07	1.58E+07	2.53E+07	933*
			Cámaras anuales	AR-BS (a)	2.86E+05	1.25E+05	N. C	817*

Nota: N.C= No crecimiento. *No se ha determinado la viabilidad

4.3. Parámetros de aprovechamiento agronómico

4.3.1. Contenido de nutrientes

a. PTAR

Las concentraciones de carbono y nitrógeno en los lodos provenientes de tecnologías aerobias varían de 29 a 35 por ciento y de 4 a 6 por ciento, respectivamente (ver Tabla 38). Las mayores concentraciones de estos elementos se dan en los lodos de la PTAR Manchay que como se observó anteriormente poseen también la mayor concentración de materia orgánica, 73 por ciento. Con concentraciones menores al 1 por ciento, los lodos de la PTAR San Bartolo exhiben los niveles más bajos de carbono y nitrógeno. Se presume que estos valores presentan error en su determinación pues los lodos de esta planta poseen 44 por ciento de sólidos volátiles y de acuerdo con Colomer *et al.* (2010) incluso los lodos industriales del sector textil y cervecera poseen 30 y 12 por ciento de carbono y 5 y 2 por ciento de nitrógeno, correspondientemente.

Las relaciones C/N son semejantes entre los todos los lodos variando sólo de 5 a 6. Estos resultados son similares a los reportados por Alvarenga *et al.* (2015) quien determinó relaciones C/N de 5.4 y 5.9 en muestras de lodos activados de aireación convencional. De someter a los lodos a un proceso de compostaje, se requería la adición de grandes cantidades de materiales ricos en carbono para aumentar dicha relación a valores entre 26 y 31 (van Oorschot *et al* 2000). Por ejemplo, para compostar un total de 500 kg (peso húmedo) de lodos se necesitarían aproximadamente 896 kg (peso húmedo) de hojarasca o 774 kg (peso húmedo) de cascarilla de arroz considerando concentraciones de C, N y humedad iguales a 48.6, 0.9 y 38 por ciento; y 44, 0.9 y 8.8 por ciento citadas por Prado (2017) para los materiales complementarios mencionados, respectivamente, y de 30, 5 y 80 por ciento para los lodos. Además, para reducir costos operativos, las fuentes de carbono tendrían que localizarse en zonas cercanas a la PTAR.

Las concentraciones de P varían de 0.9 a 1.62 por ciento y de K de 0.14 a 0.59 por ciento en los lodos finales de cada PTAR (ver Tabla 38). Estas concentraciones son muy variables en la literatura. Por ejemplo, en la recopilación bibliográfica realizada por Andreoli *et al* (2007) los porcentajes de P y K varían de 1.48 a 3.7 y de 0.01 a 0.36, respectivamente, en lodos activados. Mientras que Alvarenga *et al* (2015) señala que en su investigación los lodos activados de aireación extendida presentaron concentraciones de P desde 2.6 a 5.7 por ciento y de K de 0.58 a 1.16 por ciento. En el compost, estos nutrientes tienen una presencia menor al 1 por ciento (FAO, 2013).

En los lodos provenientes de tecnologías anaerobias, la concentración de C fluctúa entre 9 y 30 por ciento, mientras que la N entre 1 y 3 por ciento (ver Tabla 39). Los lodos de la PTAR Huáscar presentaron la mayor concentración de carbono, 31 por ciento. Este resultado era esperado debido a que como se observó en la Tabla 30, dentro de los lodos provenientes de tecnologías anaerobias los de la PTAR Huáscar poseían la mayor fracción orgánica. Todas las concentraciones de C, con excepción de la de los lodos del lecho de secado de la PTAR Totorá, y N encontradas en los lodos finales de las plantas están dentro del rango de valores reportado por Pinto (2007). Para este autor, las concentraciones de C y N varían, generalmente, de 22 a 30 por ciento y de 1 a 6 por ciento, respectivamente.

Con concentraciones de N menores a 3.1 por ciento, los lodos de las PTAR Huáscar, San Jerónimo y Totorá, a diferencia de los lodos procedentes de tecnologías aerobias, presentan relaciones C/N entre 7 y 11 (ver Tabla 39). De manera similar, Roig *et al.* (2012) encontró relaciones C/N entre 7 y 10 en muestras de lodos estabilizados mediante digestión anaerobia.

Finalmente, las concentraciones de P y K comprendieron los siguientes rangos de valores: 0.8-1.2 y 0.1-5, correspondientemente. Respecto a estos elementos, la literatura refiere variados resultados. Andreoli *et al.* (2007) consideran concentraciones de P y K iguales a 0.2 y 0.4 para lodos de lagunas anaerobias. Roig *et al.* (2007), por su parte, reporta concentraciones de P entre 2.2 y 2.6 por ciento y de K entre 0.4 y 0.5 por ciento para lodos estabilizados mediante digestión anaerobia.

Los efluentes de un reactor anaerobio contienen altas concentraciones de P debido a que dentro de la digestión anaerobia se produce la lisis de un importante número de

microorganismos y por ende la liberación de polifosfatos almacenados en estos. (Bonmatí, Viñas y Cerillo, 2018 y Martí, 2006). El sistema de lodos activados, por el contrario, puede eliminar alrededor del 50 por ciento del P entrante puesto que los microorganismos lo incorporan a su tejido celular como compuestos fosfatados (Morán, 2018 y Knobelsdorf, 2005). La diferencia descrita se refleja en los resultados de las Tablas 38 y 39 donde se observa que los lodos aerobios poseen mayor concentración de P que los anaerobios.

Tabla 38: Concentración promedio de nutrientes en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia		Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
					C (%)	N (%)	C/N	P (%)	K (%)
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01	31.6	5.7	5		
			Lecho de secado	LE-SS-01	29.0	5.2	5	1.6	0.6
			Secador solar	LE-ST-01	30.9	5.5	5	1.4	0.6
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional	Cámara de retorno	CI-CR	31	5	6	1.1	0.3
			Lecho de secado	CI-LS-01	29.7	4.6	6	1.1	0.2
	Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA	33.6	6.2	5	1.7	0.7
			Centrífuga	MA-CE	35.3	6.1	5	1.6	0.5
	San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA	0.3	0.2	2	1.5	0.1
	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL	33	4.8	5	0.7	0.3
			Espesador	ST-ES	30	5	5	1	0.3
			Centrífuga	ST-CE	30.5	4.9	6	0.9	0.3

Tabla 39: Concentración promedio de nutrientes en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia		Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
					C (%)	N (%)	C/N	P (%)	K (%)
PTAR	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Digestor anaerobio	SJ-DA-01	25.6	2.7	9		
			Centrífuga	SJ-CE-01	29.2	3.1	9	1.2	0.2
PROVINCIAS	Totora	Tanques Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	24.3	2.1	11	0.9	0.4
			Lecho de secado	TO-LS-01	9.3	1.2	7	0.8	0.4
			Semi composta	TO-SC-01	18.5	2.1	8	0.8	0.5
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN	31	2.6	11	0.8	0.1

b. BES

Las concentraciones de carbono de los lodos fecales evaluados varían de 36.5 a 47.4 por ciento (ver Tabla 40). Estos valores son superiores a los encontrados en los lodos de PTAR por causa del menor grado de estabilidad de los lodos fecales. Así mismo, dicha situación conduce a mayores relaciones C/N en un rango de 11 a 24.

En su investigación, Ahmed, Ofori-Amanfo, Awuah y Cobbold (2019) reportaron concentraciones de P y K, para lodos fecales crudos, iguales a 2.5 y 0.2 por ciento, respectivamente. No obstante, la Tabla 40 muestra concentraciones de P de 0.5 a 0.9 por ciento y de K de 0.5 a 1.5 por ciento. Respecto a las concentraciones de P, estas son menores a las encontradas en los lodos de PTAR (ver Tablas 38 y 39) debido a que además de heces, orina y restos orgánicos, las aguas residuales contienen restos de detergente y jabones compuestos por fosfato (Andreoli *et al.* 2007).

Tabla 40: Concentración promedio de nutrientes en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros					
				C (%)	N (%)	C/N	P (%)	K (%)	
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS	47.4	1.9	24	0.5	0.5
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras mensuales	AR-BS (m)	45.9	2.8	16	0.9	1.5
			Cámaras anuales	AR-BS (a)	36.5	3.3	11	0.8	1.5

4.4. Parámetros de aprovechamiento energético

4.4.1. Contenido energético

a. PTAR

Karaca *et al.* (2018), con fines comparativos, recopilaron diferentes valores reportados de PCS de lodos de PTAR. En su investigación, se observó que los PCS de lodos provenientes

de tecnologías anaerobias eran menores a los de tecnologías aerobias con valores de 14.435 MJ/kg -16.527 MJ/Kg y 16.694 MJ/kg - 21.087 MJ/kg, respectivamente. Los resultados de las Tablas 41 y 42, con excepción del de los lodos de la PTAR San Jerónimo, muestran un escenario similar al descrito por los autores. Los lodos aerobios, obtuvieron un PCS mínimo igual a 12.9 MJ/kg y un PCS máximo igual a 17.1 MJ/kg. Por su parte los lodos anaerobios tuvieron un rango de PCS de 4.3 MJ/kg a 14.2 MJ/kg. Si bien los valores de PCS son menores a los de la literatura, los lodos procedentes de tecnologías aerobias predominan energéticamente. Dado que el influente del reactor anaerobio de la PTAR San Jerónimo está compuesto por lodos mixtos de significativa carga orgánica, el PCS promedio de los lodos centrifugados es comparable al de los lodos de tecnologías aerobias.

Con respecto al PCI o poder calorífico neto se observan valores muy bajos para los lodos de SEDAPAL. Dentro de estos, el mayor les corresponde a los lodos de la PTAR Manchay que escasamente llega a 2.8 MJ/kg como consecuencia de su alto nivel de humedad. Los lodos con altos PCI son los procedentes de la PTAR La Escalerilla. Por su bajo grado de humedad (4.1 por ciento) y su importante contenido de materia orgánica (60 por ciento) los lodos del secador solar alcanzan poderes de calentamiento neto de 13.5 MJ/kg. Los lodos del lecho de secado de esta misma planta poseen un PCI de 11.5 MJ/kg a causa de su mayor humedad (11.2 por ciento) y menor contenido de materia orgánica (59 por ciento).

Aunque los PCI de los lodos de la PTAR Totorá y San Jerónimo resultaron mayores a los de los lodos de SEDAPAL, resultaron menores a los de la PTAR Escalerilla (ver Tabla 41 y 42). Los lodos de la PTAR San Jerónimo, con 4.3 MJ/kg, superaron al poder de calentamiento neto de 3.5 MJ/kg de los lodos de la PTAR Totorá. Pues a pesar de que los lodos del lecho de secado eran menos húmedos, los lodos del digestor anaerobio poseían cerca del doble de materia orgánica. Ninguno de los lodos analizados superó al PCS de la madera (21 MJ/kg), pero sí al PCI del lignito (9.5 MJ/kg) (Urien, 2013 y Colomer *et al.* 2010). Estos fueron los de la PTAR La Escalerilla.

Para Colomer, Carlos, Herrera, Gallardo y Bovea (2009), un lodo es aprovechable energéticamente mediante la incineración cuando posee mínimamente entre 8.4 MJ/Kg y 12.6 MJ/Kg. Bajo esta premisa, sólo los lodos de la PTAR La Escalerilla son adecuados para un reúso energético.

Tabla 41: Contenido energético promedio de lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Lecho de secado	LE-SS-01	12.9	11.5
			Secador solar	LE-ST-01	13.5	13.0
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados de aireación convencional	Lecho de secado	CI-LS	13.0	1.2
			Centrífuga	MA-CE	17.1	2.8
			Centrífuga	ST-CE	14.3	2.2

Tabla 42: Contenido energético promedio de lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	
PTAR PROVINCIA	San Jerónimo	Digestor anaerobio	Centrífuga	SJ-CE-01	14.2	4.6
			Lecho de secado	TO-LS-01	4.3	3.5
			Semi composta	TO-SC-01	7.7	3.6

b. BES

Los valores promedio de PCS de los lodos fecales evaluados fueron 20.2 MJ/kg (cámara semanal), 14.3 MJ/kg (cámara mensual) y 15.1 MJ/kg (cámara anual) (ver Tabla 43). Dichos valores son semejantes a los reportados por Ahmed *et al.* (2019) y Murray *et al.* (2014), pues para estos autores el PCS de lodos fecales crudos varía de 16,39 MJ/kg a 18,31 MJ / kg y de 16.2 MJ/kg a 19.1 MJ/kg.

Por su mayor contenido orgánico, el PCI de los lodos fecales es mayor al de los lodos aerobios de SEDAPAL y anaerobios de provincia (ver Tabla 41, 42 y 43). Pero, tomando como referencia el PCI mínimo de aprovechamiento energético de Colomer *et al.* (2009), sólo los lodos de las cámaras anuales, con 9.2 MJ/kg, son adecuados para el fin en mención. Estos obtuvieron un mayor poder de calentamiento debido a que si bien su fracción orgánica (81.2 por ciento) era menor frente a los lodos de las cámaras semanales y mensuales, su grado de humedad era el más reducido (36 por ciento).

Tabla 43: Contenido energético promedio de lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS	20.2	7.7
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras mensuales	AR-BS (m)	14.3	7.7
			Cámaras anuales	AR-BS (a)	15.1	9.2

4.4.2. Análisis proximal

a. PTAR

Las concentraciones promedio de cenizas en los lodos procedentes de tecnologías aerobias son mayor al 28 por ciento (ver Tabla 44). Karaca *et al.* (2018) explican que estos valores se deben, presumiblemente, a la acumulación de materiales inorgánicos en la biomasa durante

su permanencia en reactores de aireación extendida. Dichos materiales pueden estar constituidos por limo o partículas de arena (Chan & Wang, 2018).

En los lodos anaerobios, las concentraciones promedio de cenizas resultaron más altas. Los lodos del lecho de secado de la PTAR Totorá alcanzaron una concentración de 76.1 por ciento (ver Tabla 45). Esta excesiva concentración de material inerte puede deberse al amplio tiempo (tres meses) en que los lodos fueron expuestos a agentes contaminantes en la intemperie.

Las concentraciones de carbono fijo en todos los lodos evaluados, con excepción de lodo digerido de la PTAR San Jerónimo, son bajas. A diferencia del carbón vegetal que está constituido por 50 a 95 por ciento de carbono fijo, los lodos provenientes de tecnologías aerobias y anaerobias sólo contienen 1.5 a 9.9 por ciento y 0.1 a 0.3 por ciento, respectivamente.

Tomasi, Leibold, Ritcher, Stapf y Seifert (2018) señalan que altos y bajos niveles de cenizas y carbono fijo, respectivamente, conducen a bajos valores de poder calórico. Al comparar las Tablas 41 y 42 con las 44 y 45 se puede observar cómo lo descrito por los autores explica la superioridad de los PCS de los lodos aerobios frente a los anaerobios, con excepción de los de la PTAR San Jerónimo.

Tabla 44: Análisis proximal promedio de lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia		Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros			
					Humedad (%)	MV (%) ^a	Cenizas (%) ^a	CF (%) ^a
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Lecho de secado	LE-SS-01	10.6	59.8	36.0	4.2
			Secador solar	LE-ST-01	4.2	60.8	34.4	4.7
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados de aireación convencional	Lecho de secado	CI-LS-01	90.8	53.8	36.2	9.9
	Manchay	ICEAS	Centrífuga	MA-CE	83.9	73.2	28.4	1.5
	Santa Clara	Lodos activados de aireación convencional	Centrífuga	ST-CE	84.3	61.7	35.8	2.4

Nota: ^a Expresado en base seca

Tabla 45: Análisis proximal promedio de lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia		Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros			
					Humedad (%)	MV (%) ^a	Cenizas (%) ^a	CF (%) ^a
PTAR PROVINCIA	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Centrífuga	SJ-CE-01	67.2	53.5	46.6	~0
	Tоторa	Tanques Imhoff	Lecho de secado	TO-LS-01	18.5	24.0	76.1	0.1
			Semi composta	TO-SC-01	53.4	40.4	59.5	0.3

Nota: ^a Expresado en base seca

b. BES

La Tabla 46 presenta las concentraciones promedio de cenizas y carbono fijo encontradas en los lodos fecales de baños ecológicos secos. En dicha tabla, se observa que la concentración de los parámetros mencionados varía directamente proporcional al tiempo de almacenamiento como consecuencia de la degradación de la materia orgánica que, a su vez, concentra materiales no biodegradables.

A diferencia de los lodos de PTAR, los lodos fecales presentan concentraciones de cenizas variables entre 4.8 y 16.1 por ciento (ver Tabla 46). Esta característica acompañada de una concentración de CF igual a 7.4 por ciento explica por qué los lodos de la empresa X-Runner poseen mayores PCS que los de PTAR (ver Tabla 41, 42 y 43).

Tabla 46: Análisis proximal promedio de lodos fecales de PTAR

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros			
				Humedad (%)	MV (%) ^a	Cenizas (%) ^a	CF (%) ^a
X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS	62.0	87.8	4.8	7.4
Arrebol	Baños fijos	Cámaras mensuales	AR-BS (m)	46.0	81.4	9.3	9.3
		Cámaras anuales	AR-BS (a)	42.2	74.7	16.1	9.2

Nota: ^a Expresado en base seca

4.5. Propuestas de estabilización y aprovechamiento

En base al análisis de los resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos de PTAR y BES, en la Tabla 47 se presentan las propuestas de estabilización y aprovechamiento.

Según nuestra legislación, el primer requisito que deben cumplir los lodos para considerarse biosólidos ya sea tipo A o B, es poseer una concentración de sólidos volátiles, en base seca, menor o igual a 60 por ciento. Los lodos que incumplen este parámetro son los provenientes

de la PTAR Cieneguilla, Manchay y BES por contener sólidos con un porcentaje de materia orgánica por encima del 65 por ciento.

El segundo requisito, está asociado a la toxicidad química de los lodos causada por su contenido de metales pesados. Debido, presumiblemente, a una baja contaminación industrial, ninguno de los lodos estudiados exhibió concentraciones no permitidas de metales pesados.

El tercer y último requisito, define la clasificación de los lodos como biosólidos tipo A o B. Sólo aquellos con una concentración de E. coli menor a 10^3 NMP/gST y menos de un huevo de helminto viable por cada 4 gramos de sólidos totales, pueden ser considerados biosólidos tipo A. En el presente estudio, la concentración de E. coli en todos los lodos fue significativamente alta, superando incluso hasta en 6 unidades logarítmicas al límite máximo mencionado. Al no presentar la calidad requerida para ser biosólidos tipos A, los lodos pueden aplicar a la denominación B mediante el cumplimiento de los procesos considerados en los Anexos 1 y 2 del DS-N°015-2017-VIVIENDA. Estos son: Lagunas aireadas, lagunas anaerobias, lagunas facultativas, lagunas de estabilización, lagunas con fito depuración, lodos activados de aireación extendida, filtro percolador, tanque Imhoff, RAFAML, digestión anaerobia y aerobia, secado al aire y mineralización.

En consecuencia, los únicos lodos aptos para su reaprovechamiento son los de la PTAR La Escalerilla (lodos activados de aireación extendida), San Bartolo (laguna aireada), Santa Clara (lodos activados de aireación extendida), San Jerónimo (digestor anaerobio), Totorá (tanque Imhoff) y Huáscar (laguna anaerobia). Los demás requieren de tratamientos de estabilización que reduzcan su fracción orgánica y contaminación microbiológica.

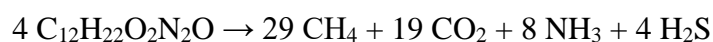
La determinación de la viabilidad de los huevos de helmintos en las muestras de lodo no se efectuó debido a que esta no era determinante para la clasificación de los biosólidos, pues al exceder la concentración máxima de E. coli, no podían acceder a la clasificación “A” aun cuando la cantidad de huevos viables en 4 gramos fuera menor a 1.

Con la finalidad de reducir la concentración de sólidos volátiles y microorganismos patógenos en los lodos y así mejorar la calidad de estos, se han planteado métodos de estabilización tales como compostaje, alcalinización, secado (solar o térmico) e incineración quien reduce a cenizas a los lodos. La efectividad de la alcalinización y el secado en la reducción de coliformes fecales es alta comparada a la del proceso de compostaje. El empleo de cal puede disminuir entre 4 a 8 unidades logarítmicas la concentración de coliformes fecales y el secado entre 5 a 6 (Moeller *et al.*, 2005, Cota & Ponce, 2008). El compostaje, en cambio, sólo reduce entre 2 a 4 unidades logarítmicas (Jiménez *et al.*, 1999; Moeller *et al.*, 2005; Torres *et al.*, 2007; Torres, Pérez, Escobar, Uribe e Imery, 2007; Asses *et al.* 2017). Entonces, de requerir la obtención de la clasificación de biosólidos tipo A, la alcalinización y secador térmico son las mejores opciones. Debe tenerse en consideración que el incremento del pH, ocasionado por la alcalinización, puede producir una reducción de la actividad microbiana por lo que de ser necesaria una reducción del porcentaje de sólidos volátiles o enriquecimiento agronómico del material, no habrían adecuadas condiciones para llevar a cabo el proceso de compostaje (Ronteltap, Dodane y Bassan, 2014).

Fernandes *et al.* (2007) señala que la concentración de sólidos totales de los lodos a compostar debe estar en un rango de 15 a 20 por ciento y el grado de humedad para la alcalinización en 60 a 75 por ciento. En este sentido, debido a la alta sequedad presentada por los lodos de las PTAR La Escalerilla y Totorá, estos no son adecuados candidatos para los procesos referidos. Ante esta situación, una alternativa adicional podría ser la exposición de los lodos a la radiación solar (rayos UV) puesto que estos poseen capacidad bactericida y diversos autores han reportado su efecto en la inactivación de patógenos (Pinto, 2007).

Si bien actualmente la PTAR Cieneguilla opera con un caudal menor al de diseño que obliga a retener los lodos por periodos mayores a los de la aireación convencional (40-60 días), próximamente recibirá un nuevo afluente de 80 a 85 l/s. Por tanto, los lodos de la cámara de retorno tendrán edades conformes a la tecnología de la cual provienen (4 a 15 días) y elevarán su concentración de sólidos volátiles. Bajo este escenario, dichos lodos podrían ser estabilizados y aprovechados energéticamente a través de la digestión anaerobia realizando previamente su espesamiento y análisis del potencial bioquímico de metano.

No obstante, el potencial de producción teórica de metano puede ser calculado a partir de la ecuación de Boyle y la composición elemental del lodo (ver Tabla 54) obteniendo así la siguiente ecuación:



Considerando que cada mol de metano posee un volumen de 22.4 litros, por cada kilogramo de sólidos volátiles se generarían 0.6 m³ de CH₄. Entonces, considerando la producción máxima y mínima de lodos reportada en la Tabla 26, en la PTAR Cieneguilla se obtendrían 42 587 m³ y 1018 m³ de CH₄, respectivamente. A diferencia de López *et al.* (2017) quien señala que el biogás producto del tratamiento de aguas residuales contiene entre 60 y 85 por ciento (en volumen) de CH₄, los lodos de la cámara de retorno poseen 48 por ciento.

Los lodos del lecho de secado de la PTAR Cieneguilla, de las centrífugas de las PTAR Manchay, Santa Clara y San Jerónimo, de los baños secos y de las lagunas semi aireada y anaerobia pueden ser compostados y aprovechados como enmiendas. Empero, los lodos de lagunaje y de la PTAR Cieneguilla deberán permanecer un adecuado lapso en sus lechos de secado que permita alcanzar la concentración mínima necesaria de sólidos totales (entre 15 y 20 por ciento) para el compostaje. El inicio de este proceso, además, requiere de sustratos con relaciones C/N entre 25 y 35. Por ello, sería necesario mezclar a los lodos con materiales ricos en carbono que permitan incrementar sus relaciones C/N pues, como se observó en las Tablas 38, 39 y 40, estas son menores a 24. Debe tenerse en cuenta también, que los materiales en mención deben poseer grados de humedad y tamaños de partícula que favorezcan a la aireación y estructura de las pilas.

La FAO (2002) indica que un material se considera fertilizante cuando posee al menos 5 por ciento de N, P₂O₅ o K₂O. Los lodos aerobios de la PTAR La Escalerilla y Manchay son los únicos con concentraciones de 5 y 6 por ciento de N; lodos de la PTAR Santa Clara y Cieneguilla poseen 4 por ciento de N y los lodos anaerobios y fecales menos de 3 por ciento. El P y K, por su parte, se encuentran en concentraciones menores al 1 por ciento en todas las muestras de lodos. Sin embargo, los requerimientos de P de las plantas son muy bajos y Melo *et al.* (2018) detalla que la aplicación de lodos durante 10 años en campos de maíz

puede reemplazar por completo la fertilización mineral de fósforo y micronutrientes y parcialmente la fertilización con nitrógeno sin reducir la productividad del cultivo (Andreoli *et al.* 2007).

La alcalinización puede aplicarse a los mismos lodos propuestos para el compostaje. No obstante, algunos deberán estabilizarse o reducir su contenido de humedad primero. Los lodos del lecho de secado de la PTAR Cieneguilla (lodos activados de aireación convencional) y lodos fecales tendrán que reducir su concentración de sólidos volátiles mediante la exposición a la radiación solar (<60%) o compostarse previamente. En la PTAR Manchay se deberá mejorar el desarrollo del sistema ICEAS con antelación, pues al ser una tecnología de aireación extendida esta debería producir lodos estabilizados. Los lodos estabilizados de las lagunas de las PTAR San Bartolo y Huáscar tendrán que reducir su grado de humedad a 60 o 75 por ciento en sus lechos de secado. Los lodos de las centrifugas de la PTAR Santa Clara y San Jerónimo podrán ser alcalinizados directamente ya que son estables y poseen un moderado grado de humedad.

Con la finalidad de lograr un aprovechamiento energético de los lodos, se propone la incineración y pirólisis de los lodos de aireación extendida de la PTAR La escalerilla y lodos fecales de las empresas X-Runner y Arrebol. Estos últimos podrán incinerarse de forma directa, bajo los grados iniciales de humedad, o posterior al secado de los lodos en un secador solar o térmico. En el caso de la pirólisis, por el contrario, será necesario obligatoriamente reducir la humedad a menos del 10 por ciento. Ordóñez (2019) señala que bajo este valor el proceso de pirólisis se desarrolla adecuadamente. Por su baja concentración de carbono fijo, no se recomienda la pirólisis de los lodos del lecho de secado de la PTAR Cieneguilla, de las centrifugas de las PTAR Manchay, Santa Clara y San Jerónimo; mas sí su incineración previa reducción del grado de humedad en un secador térmico o solar. Adicionalmente a su aprovechamiento como combustible, el lodo proveniente de los procesos de secado puede emplearse como enmienda ya que conserva sus propiedades fertilizantes (Luduvic & Fernandes, 2007). Cabe resaltar que es de suma importancia realizar el balance energético de cada uno de los procesos propuestos para garantizar la eficiencia y buenos resultados de estos.

Tabla 47: Propuestas de estabilización y aprovechamiento

PTAR de procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Tratamiento	Aprovechamiento
Lodos aerobios					
La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01		Enmienda
		Lecho de secado	LE-SS-01	Incineración ¹	→ Combustible
				Pirólisis ¹	→ Combustible
		Secador solar	LE-ST-01		Enmienda
				Incineración ¹	→ Combustible
				Pirólisis ¹	→ Combustible
Cieneguilla	Lodos activados de aireación convencional	Cámara de retorno	CI-CR	Digestión anaerobia ²	→ Biogás Biol Enmienda
		Lecho de secado	CI-LS	Compostaje ³	→ Enmienda
				Alcalinización ⁴	→ Enmienda
				Incineración ^{1,6}	→ Combustible
Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA		
		Centrífuga	MA-CE	Compostaje	→ Enmienda
				Alcalinización ⁵	→ Enmienda
				Secado térmico ¹ o solar	→ Enmienda Combustible
				Incineración ^{1,6}	→ Combustible
San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA	Compostaje ³	→ Enmienda
				Alcalinización ³	→ Enmienda

Continuación...

		Clarificador	ST-CL		
		Espesador	ST-ES		
Santa Clara	Lodos activados de aireación convencional	Centrífuga	ST-CE	Compostaje	→ Enmienda
				Alcalinización	→ Enmienda
				Secado térmico ¹ o solar	→ Enmienda Combustible
				Incineración ^{1,6}	→ Combustible
Lodos anaerobios					
San Jerónimo	Digestor anaerobio	Centrífuga	SJ-CE-01	Compostaje	→ Enmienda
				Alcalinización	→ Enmienda
				Secado térmico ¹ o solar	→ Enmienda Combustible
				Incineración ^{1,6}	→ Combustible
Totora	Tanque Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01		
		Lecho de secado	TO-LS-01		Enmienda
Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN	Compostaje ³	→ Enmienda
				Alcalinización ³	→ Enmienda
Lodos fecales					
X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS	Compostaje	→ Enmienda
				Alcalinización ⁴	→ Enmienda
				Secado térmico ¹ o solar	→ Enmienda Combustible
				Incineración ^{1,6}	→ Combustible
				Pirólisis ^{1,6}	→ Combustible

Continuación...

			Compostaje	→	Enmienda
			Alcalinización ⁴	→	Enmienda
		Cámaras mensuales	AR-BS (m)	→	Enmienda Combustible
			Secado térmico ¹ o solar	→	Enmienda Combustible
			Incineración ^{1,6}	→	Combustible
			Pirólisis ^{1,6}	→	Combustible
Arrebol	Baños fijos		Compostaje	→	Enmienda
			Alcalinización ⁴	→	Enmienda
		Cámaras anuales	AR-BS (a)	→	Enmienda Combustible
			Secado térmico ¹ o solar	→	Enmienda Combustible
			Incineración ^{1,6}	→	Combustible
			Pirólisis ^{1,6}	→	Combustible

¹Previo análisis del balance energético.

²Previo espesamiento y análisis de potencial bioquímico de metano

³Posterior a la reducción del grado de humedad. El compostaje requiere de %ST= 15%-20%. La alcalinización de un grado de humedad cercano a 60%-75%

⁴Posterior a su estabilización (%SV<60%)

⁵Previo mejoramiento del sistema ICEAS, de esta manera se obtendrán lodos estabilizados (%SV<60%)

⁶Posterior a la reducción del grado de humedad a <10% en un secado secador solar o térmico. No obstante, los lodos fecales, estos pueden prescindir del secado previo.

V. CONCLUSIONES

- La producción mensual de lodos (t) por unidad de caudal (l/s) de agua tratada en las PTAR de Lima es muy variable y no posee un patrón asociado al tipo de tecnología bajo el cual se producen. Tal es así que se observan valores mínimos 0.005 t/(l/s) en la PTAR San Bartolo y valores máximos de 10.3 t/ (l/s) en la PTAR Santa Clara.
- En los lodos de provincia, se observan diferencias en la tasa de producción de lodos respecto a la tecnología empleada. En la PTAR La Escalerilla (lodos activados de aireación extendida) se generan mayor cantidad de lodos que en las PTAR Totorá y San Jerónimo, ambas con tratamiento anaerobio.
- La producción de lodos fecales es menor a la de los de PTAR. Debido a su corto periodo de almacenamiento y por ende ínfima degradación de materia orgánica, la generación de lodos en la empresa X-Runner (50 kg/hab año) es mayor que la de Arrebol (96 kg/hab año).
- En base al control de los parámetros del DS-N°015-2017-VIVIENDA, sólo los lodos de las PTAR con aireación extendida (La Escalerilla y Santa Clara), lagunas aireadas (San Bartolo), lagunas anaerobias (Huáscar) y digestor de lodos (San Jerónimo), son biosólidos tipo B; los demás lodos requieren ser estabilizados.
- Se propone el compostaje como método de estabilización para los lodos fecales (Arrebol y X-Runner) y los lodos provenientes de tecnologías anaerobias que alcancen, mediante centrifugación o secado solar, concentraciones de sólidos mínimas entre 15 y 20 por ciento (PTAR Huáscar, Totorá y San Jerónimo). En el caso de los lodos de tecnologías aerobias, su compostaje dependerá de la existencia y proximidad de altas fuentes carbonáceas.
- Se propone la alcalinización como método de estabilización de lodos enfocado al aprovechamiento agronómico como enmiendas para los lodos fecales (Arrebol y X-Runner) previamente estabilizados; los lodos de las lagunas aerobia (PTAR San Bartolo) y anaerobia (PTAR Huáscar) previa reducción de la humedad hasta 60 o 75 por ciento, los lodos del lecho de secado del sistema de aireación convencional (PTAR

- Cieneguilla) previamente estabilizados y los lodos centrifugados de: el sistema ICEAS (PTAR Manchay) previo mejoramiento de la línea de tratamiento de aguas, la aireación extendida (PTAR Santa Clara) y el digestor anaerobio (PTAR San Jerónimo).
- Se propone la incineración (previo balance energético), como método de estabilización de lodos enfocado al aprovechamiento energético como combustibles para los lodos fecales (Arrebol y X-Runner), lodos activados de aireación extendida del secador solar y lecho de secado (PTAR La Escalerilla), y lodos centrifugados de: el sistema ICEAS (PTAR Manchay), la aireación extendida (PTAR Santa Clara) y el digestor anaerobio (PTAR San Jerónimo).
- Se propone la pirólisis (previo balance energético) como método de estabilización de lodos enfocado al aprovechamiento energético como combustibles para los lodos fecales (Arrebol y X-Runner) y lodos activados de aireación extendida del secador solar y lecho de secado (PTAR La Escalerilla).
- Se propone el secado térmico (previo balance energético) o solar como método de estabilización de lodos enfocado al aprovechamiento agronómico y energético como enmiendas y combustibles, respectivamente, para los lodos fecales (Arrebol y X-Runner) y lodos centrifugados de: el sistema ICEAS (PTAR Manchay), la aireación extendida (PTAR Santa Clara) y el digestor anaerobio (PTAR San Jerónimo) previamente secados.
- Se propone la digestión anaerobia (previo análisis de potencial bioquímico de metano) como método de estabilización de lodos enfocado al aprovechamiento agronómico como biol y enmienda, y energético como biogás para los lodos de la cámara de retorno de lodos activados de aireación convencional (PTAR Cieneguilla).

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un mayor número de muestreos de lodos con la finalidad de realizar pruebas estadísticas y obtener resultados más representativos.
- Se recomienda muestrear los lodos de los lechos de secado de las PTAR una vez terminado el tiempo de permanencia de esta unidad con la finalidad de no sobreestimar los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.
- Es necesario centrifugar las muestras de lodos líquidos, previos al análisis proximal.
- Con fines comparativos y poseer más información que permita desarrollar escenarios más significativos para el tratamiento de los lodos, se recomienda determinar el PCI de los lodos estudiados a una concentración de 10 por ciento de humedad.
- Futuras investigaciones que lleven a cabo a escala piloto los métodos de estabilización propuestos deberán recomendablemente analizar la concentración de E. coli y huevos viables de helminto ante y después de los procesos en mención.
- Para mejorar las características agronómicas de los lodos, se recomienda mezclarlos con materiales de mayor concentración de carbono.
- Para mejorar las características energéticas de los lodos, se recomienda mezclarlos con residuos combustibles.
- Se recomienda realizar un análisis de potencial bioquímico de metano, previo espesamiento, a los lodos del sistema de lodos activados de aireación convencional, así como estudios de co-digestión que permitan mejorar dicho potencial.
- Se recomienda realizar balances energéticos para los métodos de aprovechamiento propuestos tales como incineración, pirólisis y secado térmico.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, Y. & Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. ICIDCA. 39:35-48. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- Ahmed, I.; Ofori-Amanfo, D.; Awuah, E.; Cobbold, F. (2019). A Comprehensive Study on the Physicochemical Characteristics of Faecal Sludge in Greater Accra Region and Analysis of Its Potential Use as Feedstock for Green Energy. Hindawi. 10:1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/8696058>
- Al Seadi, T.; Rutz D. & Janssen, R. (2013). Biomass Resources for Biogas Production. En: The Biogas Handbook: Science, production and applications, Wellinger, A., Murphy, J.D. and Baxter, D. (eds), Woodhead Publishing Limited (p. 19-49) Cambridge, UK.
- Alvarenga, P.; Mourinha, C.; Farto, M.; Santos, T.; Palma, P.; Sengo, J.; ... Cunha-Queda, C. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. ELSEVIER. 40:44-52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>
- Alves, A.; Mambeli, R.; Tiago, G.; Silva, I.; Martucelli, E. (2018). Analysis of biogas produced by the anaerobic digestion of sludge generated at wastewater treatment plants in the South of Minas Gerais, Brazil as a potential energy source. ELSEVIER. 41: 139-153. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.035>
- Andreoli, C.; Pegorini, E.; Fernandes, F.; Dos Santos, H. (2007). Land application of sewage sludge. En Vitorio, C.; Von Sperling, M. & Fernandes, F. Sludge Treatment and Disposal (vol. 6) (p. 162-205). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01092-6>
- Aragonéz, M.P. (2015). Análisis Termogravimétrico de la Pirolisis de Biosólidos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual El Salitre (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Recuperada de http://bdigital.unal.edu.co/48357/1/1032410813.2015_1.pdf

- Arauzo, J; Sanchez, JL; Ábrego, J; Gea, G. (2010). Pirólisis de biocombustibles sólidos. In Nogués, F; Garcia-Galindo, D; Rezeau, A. Energías renovables: Energía de la biomasa. 1 ed. Zaragoza, España, Prensas Universitarias de Zaragoza. v. 1, 557 p.
- Asses, N.; Farhat, A.; Cherif, S.; Hamdi, M.; Bouallagui, H. (2017). Comparative study of sewage sludge co-composting with olive mill wastes or green residues: Process monitoring and agriculture value of the resulting composts. ELSEVIER. 114:25-35. <https://doi.org/10.1016/j.jpsep.2017.12.006>
- BC Ministry of Agriculture Sustainable Agriculture Management Branch. (2010). Reference Guide: The Canada – British Columbia Environmental Farm Plan Program (6th ed). Canadá: BC Agricultural Research & Development Corporation.
- Bonmatí, A.; Viñas, M.; Cerillo M. (2018) Integración de los sistemas bioelectroquímicos con la digestión anaerobia para optimizar la recuperación de energía y nutrientes. En Chiva S.; Berlanga J.; Martínez, R.; Climent J. Castellón de la Plana, España: Publicacions de la Universitat Jaume I. <http://dx.doi.org/10.6035/UJI.FACSA.2018.2>
- Castrejón, A.; Barrios, A.; Jiménez, B.; Maya, C.; Rodríguez, A.; González, A. (2002) Evaluación de la calidad de lodos residuales de México. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería. Grupo de Tratamiento y Reúso. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsaidis/mexico13/061.pdf>
- Chan, W. & Wang, J. (2018). Characterisation of sludge for pyrolysis conversion process based on biomass composition analysis and simulation of pyrolytic properties. 72:274-286. Recuperado de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29158001>
- Cheunbarn, T. & Pagilla, K. (2000). Anaerobic thermophilic/mesophilic dual-stage sludge treatment. Journal of Environmental Engineering 126(9), 796-801. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2000\)126:9\(796\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:9(796))
- Colomer, F.; Carlos, M.; Herrera, L.; Gallardo, A.; Bovea, M. (2009). Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/61392110.pdf>
- Colomer, F.; Gallardo, A.; Robles, F.; Bovea, D.; Herrera, L. (2010). Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. Ingeniería. 14:177-190. Recuperado de <http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen14/opciones.pdf>

- Colón, J.; Alarcón, M.; Gerard, M.; Namli, A.; Dilek, F.; Taya, C.; Ponsá, S. (2017). Producing sludge for agricultural applications. En Lema, J. M. & Suarez, S (Ed.). *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment*. (p. 296-318). Londres, Reino Unido: IWA. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?id=aNYoDwAAQBAJ&pg=PA301&lpg=PA301&dq=Typical+solids+concentrations+in+raw+primary+sludge+from+settling+municipal+wastewater+are+6%25-8%25.+The+portion+of+volatile+solids+varies+from+60%25+to+80%25.&source=bl&ots=yTNgl3B3bT&sig=ACfU3U1LswkSAWtNKz7GDcLTBDJ11knKA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjfqSUuY_kAhXRwFkKHZ5pACwQ6AEwC3oECAsQAQ#v=onepage&q&f=false
- Cota, A. & Ponce, C. (2008). Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 24:161-170. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992008000400002
- Crombet, S.; Abalos, A.; Rodríguez, S.; Pérez, N. (2016). Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 18(1):49-56. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57715>
- Da Silva, S.; Fernandes, F.; Soccol, V.; Morita, D. (2007). Main contaminants in sludge. En Vitorio, C.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Sludge Treatment and Disposal* (vol. 6) (p. 31-47). Londres, Reino Unido: IWA.
- Dabbah, F.; Escudero, H.; Fernandez, M.; Hock, D. (2016). Sistema de saneamiento seco con separación de orina (Baño seco). Buenos Aires, Argentina. INTI. Recuperado de <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/2854>
- De Victorica, J. & Galván, M. (2003). Preliminary testing of a rapid coupled methodology for quantitation/viability determination of helminth eggs in raw and treated wastewater. *ELSEVIER*. 37(6), 1278-1287. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00477-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00477-3)

- Donado, R. (2013). Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los llanos en el departamento del META. (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana). Recuperada de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/13496/DonadoHoyosRoger2013.pdf?sequence=1>
- Doulaye, K. & Sylvie, P. (2008). Faecal Sludge Management (FSM). Dubendorf, Suiza: EAWAG. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/EAWAG%20SANDEC%202008%20Module%205%20FSM%20Lecture.pdf
- Drog, B.; Al Saedi, T.; Braun, R. & Bochmann, G. (2013). Analysis and Characterisation of Biogas Feedstocks. En Wellinger, A.; Murphy, J.D.; Baxter, D. (eds), The Biogas Handbook: Science, production and applications (p. 52-83). Cambridge, UK. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/4bd5/5be89767214cd46dec9a51130db35fda93b3.pdf>
- Du, W.; Jiang, J.; Gong, C. (2012). Primary research on agricultural effect of Sludge-impact of sludge application on crop seeds germination and seedling growth. ELSEVIER. 16:340-345. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.048>
- Fernandes, F.; Lopes, D.; Andreoli, C.; da Silva, S. En En Vitorio, C.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. Assessment of sludge treatment and disposal alternatives (vol. 6) (p. 149-161). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01092-6>
- Fijalkowski, K.; Rorat, A.; Grobelak, A.; Kacprzak, M. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. ELSEVIER. 203:1126-1136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.068>
- Fytily, D. & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. ELSEVIER. 12:116-140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014>
- García, D. & Rezeau, A. (2010). Introducción al aprovechamiento energético de biocombustibles sólidos. En Nogués, F. S.; García, D.; Rezeau, A. Energías renovables: Energía de la Biomasa (Vol. 1). (p. 27-73). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=P58rcPu5O90C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

- Gonçalves, R.; Ludovice, M.; Von Sperling, M. (2007). Sludge thickening and dewatering. En Vitorio, C.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. Sludge Treatment and Disposal (vol. 6) (p. 76-118). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01092-6>
- Gonzáles, I.C. (2015). Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR (Tesis doctoral, Universidad de Córdoba). Recuperada de <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13199/2016000001232.pdf?sequence=3>
- Hac Ko, J.; Wang, J.; Xu, Q. (2018). Characterization of particulate matter formed during sewage sludge pyrolysis. ELSEVIER. 224:210-2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.189>
- Hammeken, A. & Romero, E. (2005). Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula. (Tesis de licenciatura). Universidad de las Américas Puebla. Recuperada de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/
- Health and Human Services (HHS). (2005). Toxicological profile for zinc. Georgia, Estados Unidos. HHS. Recuperado de <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp60.pdf>
- Hoffmann, H.; Platzer, C.; Winker, M.; Von Muench, E. (2011). Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. Eschborn, Alemania: GIZ. Recuperado de file:///C:/Users/angel/Downloads/Technology_Review_Wetlands.pdf
- Ingallinella, A.; Sanguinetti, G.; Koottatep, T.; Strauss, M. (2002). The challenge of faecal sludge management in urban areas--strategies, regulations and treatment options. Water Science & Technology. 46:285-94. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.1686&rep=rep1&type=pdf>
- Jiménez, B.; Barrios, J.; Maya, C. (1999). Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería UNAM. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicana/R-0119.pdf>
- Jin, J.; Li, Y.; Zhang, J.; Wu, S.; Cao, Y.; Liang, P.; ... Christie, P. (2016). Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in

biochars derived from municipal sewage sludge. ELSEVIER. 320:417-426
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.050>

- Jin, Z.; Chang, F.; Meng, F.; Wang, C.; Meng, Y.; Liu, X.; Wang, K. (2017). Sustainable pyrolytic sludge-char preparation on improvement of closed-loop sewage sludge treatment: Characterization and combined in-situ application. ELSEVIER. 184: 1043-1053. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.029>
- Jönsson, H.; Richert, A.; Vinneras, B.; Salomon, E. (2004). *Lineamientos para el Uso de la Orina y Heces en la Producción de Cultivos*. Serie de Publicaciones ECOSANRES, Estocolmo, Suecia. Reporte 2004-2. 46 pp. Recuperado de http://www.ecosanres.org/pdf_files/Uso_Orina_Heces_Cultivos_2004-2.pdf
- Jordão, E. & Pessoa, C. (2006). Tratamento de esgotos domésticos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Rio de Janeiro, Brasil: Engenharia Sanitaria e Ambiental. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522006000100001>
- Julio, I.C.; Peláez, C.A.; Molina F.J. (2016). Anaerobic co-digestion of municipal sewage sludge with food waste. ION. 29(1), 63-70. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>.
- Karaca, C.; Sözen, S.; Orhon, D.; Okutan, H. (2018). High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery. ELSEVIER. 78:217-226. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.034>
- Knobelsdorf, J. (2005). Eliminación biológica de nutrientes en un ARU de baja carga orgánica mediante el proceso VIP. (Tesis doctoral, Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Recuperada de: <http://hdl.handle.net/2117/93224>
- Lema, J. & Suarez, S. (2017). Innovative Wastewater Treatment and Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment. Londres, Reino Unido: IWA. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=aNYoDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Innovative+Wastewater+Treatment+and+Resource+Recovery+Technologies:+Impacts+on+Energy,+Economy+and+Environment.&ots=yTNhn7C78Q&sig=I6OAXhyos7z5Nftl5n0SV14ho0Y#v=onepage&q=Innovative%20Wastewater%20Treatment%20and%20Resource%20Recovery%20Technologies%3A%20Impacts%20on%20Energy%2C%20Economy%20and%20Environment.&f=false>

- Limón, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o Recurso?. Guadalajara, México: Ingeniería Química. Recuperado de http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf
- Liu, H.T. (2016). Achilles heel of environmental risk from recycling of sludge to soil as amendment: A summary in recent ten years (2007 – 2016). *ELSEVIER*. 56:575-583. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.028>
- Loose, D. (2015). Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento (1a ed.). Lima. Perú: Tarea Asociación Gráfica Educativa. Recuperado de <https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf>
- López, D.; Castillo, C.; Diazgranados, D. (2010). El zinc en la salud humana – I. *Revista Chilena de Nutrición*. 2: 234-239. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182010000200013>
- López, E. & LLera, E. (2010). Caracterización de los biocombustibles sólidos. En Nogués, F.S.; García, D.; Rezeau, A. *Energías renovables: Energía de la Biomasa* (Vol. 1). (p. 125-134). Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza. Recuperado de <https://books.google.com.pe/books?id=P58rcPu5O90C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- López, J.; Ramírez, B.; Gomes, C.; Morgan-Sagastume, J. (2017). Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. (1a ed.). Ciudad de México, México: GIZ. Recuperado de <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2017/10/guia-lodos2017-dig.pdf>
- Ludovice, M. & Fernandes, F. (2007). Sludge transformation and disposal methods. En Vitorio, C.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Sludge Treatment and Disposal* (vol. 6) (p. 207-225). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01092-6>
- Ludovice, M. (2007). Sludge stabilisation. En Vitorio, C.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Sludge Treatment and Disposal* (vol. 6) (p. 48-67). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01092-6>
- Melo, W.; Delarica, D.; Guedes, A.; Lavezzo, L.; Donha, R.; De Araújo, A.; ...; Macedo, F. (2018). Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A

balance sheet on agricultural crops and environmental quality. ELSEVIER. 643: 1493-1501. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.254>

- Mendoza, C.; Carlos, C.; Herrera, L.; Gallardo, A.; Bonea, M. (2009). Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras. INGRES. 110:32-37 Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/61392110.pdf>
- Miglio, R. & Spittler, H. (Sin fecha). Saneamiento ecológico (ECOSAN) como instrumento para ahorrar agua en el transporte de excretas. Recuperado de [http://www.rotaria.net/peru3/rotaria/files/ponencias/SANEAMIENTO%20ECOL%203%20GICO%20\(ECOSAN\)%20COMO%20INSTRUMENTO%20PARA%20AHORRAR%20AGUA.pdf](http://www.rotaria.net/peru3/rotaria/files/ponencias/SANEAMIENTO%20ECOL%203%20GICO%20(ECOSAN)%20COMO%20INSTRUMENTO%20PARA%20AHORRAR%20AGUA.pdf)
- Ministerio de Ambiente (MINAM). (2019). Infraestructuras de disposición final de residuos sólidos: Listado de rellenos sanitarios. Lima, Perú: MINAM. Recuperado de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/352883/listado_de_rellenos__15-8-2019.pdf
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (MVCS). (2015). Norma técnica de edificación OS.090 Plantas de tratamiento de aguas residuales. Lima, Perú. MVCS. Recuperado de https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas_Legales/saneamiento/OS.090.pdf
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (05 de abril de 2017). Resolución Ministerial N° 128-2017-Vivienda. Aprueban Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición. El Peruano. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-condiciones-minimas-de-manejo-de-lodos-y-las-insta-resolucion-ministerial-no-128-2017-vivienda-1506028-3/>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (13 de marzo de 2018). Resolución Ministerial N° 093-2018-Vivienda. Aprueban el Protocolo de Monitoreo de Biosólidos. El Peruano. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-el-protocolo-de-monitoreo-de-biosolidos-resolucion-ministerial-no-093-2018-vivienda-1625694-1/>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (22 de junio de 2017). Resolución Ministerial N° 015-2017-Vivienda. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de

Tratamiento de Aguas Residuales. El Peruano. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-para-el-reaprovech-decreto-supremo-n-015-2017-vivienda-1536004-7/>

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (25 de enero de 2017). Resolución Ministerial N° 024-2017-Vivienda. Reglamento para el Reaprovechamiento de los Biosólidos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. El Peruano. Recuperado de <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/disponen-publicar-proyecto-de-reglamento-para-el-reaprovecha-resolucion-ministerial-n-024-2017-vivienda-1478484-1/>
- Moeller, C.; Ferat, C.; Lopez, R. (2002). Aplicación del procesamiento térmico y alcalino par la desinfección de lodos residuales. En Martínez, J. M. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, Brasil. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/i-169.pdf>
- Moeller, G.; Ferat, C.; López R. (2005). Aplicación de procesamiento térmico y alcalino para la desinfección de lodos residuales primarios un estudio comparativo. Montevideo, Uruguay: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS.
- Morán, S. (2018). Sludge characterization and treatment objectives. En An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design (p. 255-263). Oxford, Estados Unidos: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811309-7.00021-7>
- Murray, A.; Nakato, T.; Niwagaba, C.; Dione, H.; Kang, J.; Stupin, L.; ... Strande, L. (2014). Fuel potential of faecal sludge: calorific value results from Uganda, Ghana, y Senegal. IWA. 4:223-230. <https://doi.org/10.2166/washdev.2013.055>
- Nelson, K.L. & Darby, J.L. (2001). Inactivation of viable *Ascaris* eggs by reagents during enumeration. *Appl. Environ. Microbiol.*, 67(12), 5453-5459. 10.1128/AEM.67.12.5453-5459.2001
- Niwagaba, C.; Mbéguéré, M. & Strande, L. (2014). Faecal Sludge Quantification, Characterisation and Treatment Objectives. En Strande, L.; Ronteltap, M.; Brdjanovic, D. (Eds.). *Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation*. (p. 19-44). Londres, Reino Unido: IWA.
- Niwagaba, C.B. (2009). *Treatment Technologies for Human faeces and Urine*. PhD Thesis, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala, Suecia.

- Ordóñez, M.A. (2019). Determinación del proceso óptimo de pirólisis de lodos residuales, para la mayor eficiencia de product sólido. (Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador). Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17235/1/UPS-CT008221.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2002). Los Fertilizantes y su uso (4a ed.). Paris, Francia: IFA. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-x4781s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2013). Manual de Compostaje del Agricultor: Experiencias en América Latina. Santiago, Chile, ISBN. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Pinto, M. (2007). Pathogen removal from sludge. En Vitorio, C.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. Sludge Treatment and Disposal (vol. 6) (p. 120-148). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01092-6>
- Pöykiö, R.; Watkins, G.; Dahl, O. (2018). Characterization of primary and secondary wastewater treatment sludge from a pulp and board mill complex to evaluate the feasibility of utilization as a soil amendment agent and a fertilizer product. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 3(3):88-95. [10.21967/jbb.v3i3.174](https://doi.org/10.21967/jbb.v3i3.174)
- Prado, X. (2017). Tratamiento de los residuos sólidos generados en sanitarios ecológicos mediante el uso de microorganismos eficientes en un proceso de compostaje. (Tesis de Maestría). UNALM. Recuperada de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2823>
- Quiroz, P. A. (2009). Planta de tratamiento de aguas residuales para regadío en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. (Tesis de titulación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Recuperado de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/432/Quiroz_pp.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Raza, S.; Tariq, R.; Hameed, Z.; Ali, I.; Taqvi, S.; Naqvi, M.; ... Farooq, W. (2018). Pyrolysis of high-ash sewage sludge: Thermo-kinetic study using TGA and artificial neural networks. *ELSEVIER*. 233:529-538. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.089>
- Roig, N.; Sierra, J.; Martí, E.; Nadal, M.; Schuhmacher, M.; Domingo, J.L. (2012). Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effect on soil functioning. *ELSEVIER. Agriculture, Ecosystems and Environment*. 158: 41-48

- Rojas, O. & Cabirol, N. (2000). Remoción de indicadores patógenos y parásitos (coliformes fecales y huevos de helminto) en lodos municipales de tipo biológico por digestión anaerobia mesofílica y termofílica. Memorias del VI Taller y Seminario Latinoamericano de Digestión Anaerobia en Pernambuco, Brasil.
- Ronteltap, M.; Dodane, P.; Bassan, M. (2014). Overview of Treatment Technologies. En Strande, L.; Ronteltap, M.; Brdjanovic. Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation (p. 97-121). Londres, Reino Unido: IWA
- Rubio, C.; González, D.; Martín, R.; Revert, C.; Rodríguez, I.; Hardisson, A. (2007). El zinc: oligoelemento esencial. *Nutrición Hospitalaria*. 22: 101-107. Recuperado de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112007000100012
- Scholz, M. (2016). Sludge Treatment and Disposal. En *Wetlands for Water Pollution Control* (p. 157-168). Manchester, Reino Unido: ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00156-3>
- Siebielec, G.; Siebielec, S.; Lipski, D. (2018). Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. *ELSEVIER*. 187: 372-379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.245>
- Silva, E.; Galicia, P.; Quezada, M.; Villeda, E.; Rodríguez, I. (2007). Caracterización de biosólidos de diferentes fuentes y su uso potencial en la agricultura. *Universo de la Tecnología*. 7(20): 16-19. Recuperada de <http://132.248.9.34/hevila/Universodelatecnologica/2014-2015/no20/3.pdf>
- Silva, J.; Bedoya, D.; Torres, P. (2013). Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *SCIELO*. 2:207-214. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422013000200002>
- Singh, R.P. & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *ELSEVIER*. 28:347-358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- Solé-Budón, M.; Cucina, M.; Folch, M.; Tápia, J.; Gigliotti, G.; Garfi, M.; Ferrer, I. (2017). Assessing the agricultural reuse of the digestate from microalgae anaerobic digestion and co-digestion with sewage sludge. *ELSEVIER*. 586:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.006>

- Stenstrom, M. & Rosso, D. (2017). Aireación y mezclado. En: López, C.; Buitrón, G.; Garcia, H.; Cervantes, F. (ED). Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. (p. 273-304)
- Strande, L. (2014). The Global Situation. En Strande, L.; Ronteltap, M.; Brdjanovic. Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation (p. 1-14). Londres, Reino Unido: IWA. Recuperado de: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TILLEY%20et%20al%202014%20Compendium%20of%20Sanitation%20Systems%20and%20Technologies%202nd%20Revised%20Edition.pdf
- Strande, L.; Schoebitz, L.; Bischoffa, B.; Ddibab, D.; Okello, F.; Englund, M.; ... Niwagabab, C. (2018). Methods to reliably estimate faecal sludge quantities and qualities for the design of treatment technologies and management solutions. *ELSEVIER. Journal of Environmental Management* 223:898-907. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.100>
- Tilley, E.; Ulrich, L.; Luethi, C.; Raymond, P.; Zurbrugg, C. (2014) Compendium of Sanitation Systems and Technologies. 2nd Revised Edition, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Dübendorf (p. 1-178). Dübendorf, Suiza: IWA.
- Tomasi, M.; Leibold, H.; Richter, F.; Stapf, D.; Seifert, H. (2017). Screw pyrolysis technology for sewage sludge treatment. *ELSEVIER.* 73:487-495. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.049>
- Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Revista EIA.* 18:115-129. <https://doi.org/10.24050/reia.v9i18.264>
- Torres, P.; Madera, C.; Martinez, G. (2007). Estabilización alcalina de biosólidos compostados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para aprovechamiento agrícola. *SCIELO.* 61:4432-4444. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v61n1/a19v61n1.pdf>
- Torres, P.; Pérez, A.; Escobar, J.; Uribe, I.; Imery, R. (2007). Compostaje de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales. Jaboticabal. *Eng. Agríc.* 27:267-275. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v27n1/21>

- Uggetti, E.; Ferrer, I.; Nielsen, S.; Arias, C.; Brix, H.; García, J. (2012). Characteristics of biosolid from sludge treatment wetlands for agricultura reuse. *ELSEVIER. Ecological Enginnering* 40:210-216. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.030>
- United States. Environmental Protection Agency. (1995). A guide to the biosolids risk assessments for the EPA Part 503 rule. Washington, DC, Estados Unidos: US Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management. Recuperado de <https://www.csu.edu/cerc/researchreports/documents/PlainEnglishGuideEPAPart503BiosolidsRule1994.pdf>
- Urien, A. (2013). Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperada de http://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf
- Van Lier, J.; Mahmoud, N.; Zeeman, G. (2017). Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. En: López, C.; Buitrón, G.; Garcia, H.; Cervantes, F. (ED). Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. (p. 465-510)
- Van Oorschot, R.; de Waal, D.; Semple, L. (2000) Options for beneficial reuse of biosolids in Victoria. *Wat. Sci. Technol.* 41, 115–122. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0150>
- Vinnerås, B. (2002). Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine diversion. *Agraria 353, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, Sweden.
- Von Sperling, M. & Andreoli C.V. (2007). Introduction to sludge management. En Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F (Eds.), *Sludge Treatment and Disposal* (vol. 6) (p. 1-3). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.2166/9781780402130>
- Von Sperling, M. & Gonçalves, R. (2007). Sludge characteristics and production. En Vitorio, C.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. *Sludge Treatment and Disposal* (vol. 6) (p. 4-30). Londres, Reino Unido: IWA. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01092-6>
- Zhang, Q.; Hu, J.; Lee, DJ.; Chang, Y.; Lee, YJ. (2017). Sludge treatment: Current research trends. *EL SEVIER. Bioresource Technology* 234:1159-1172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.070>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Descripción de las PTAR y BES visitados

A. PTAR Huáscar

La PTAR Huáscar se encuentra ubicada en el distrito de Villa El Salvador de Lima Metropolitana. Fue diseñada para tratar un caudal de 170 l/s y una carga orgánica de 250 mg/l de DBO. Si bien originalmente esta planta sólo operaba a través de un sistema de lagunaje aeróbico, hoy en día cuenta con una laguna anaerobia. Esta modificación se llevó a cabo como consecuencia de la sobrecarga y limitación operativa de la planta.

Los componentes de tratamiento de esta planta son los siguientes:

a. Tratamiento preliminar

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento secundario

- Laguna Anaerobia.
- Laguna Aireada Mezcla Completa.
- Lagunas Aireadas Mezcla Parcial.
- Laguna de sedimentación
- Laguna de Pulimento

c. Línea de lodos

- Lechos de secado



Figura 13: Laguna anaerobia de la PTAR Huáscar



Figura 14: Toma de muestra en la válvula de escape de la laguna anaerobia de la PTAR Huáscar

B. PTAR San Bartolo

La planta se ubica en el distrito de San Bartolo de Lima Metropolitana. Fue diseñada para tratar 1700 l/s de aguas residuales con DBO de 250 mg/l provenientes de los distritos de Ate Vitarte, Santa Anita y La Molina bajo un sistema de lagunas aireadas de mezcla completa y parcial. Debido a la configuración y topografía del terreno la PTAR se dividió en dos zonas, norte y sur.

Los componentes de tratamiento de esta planta son los siguientes:

a. Tratamiento preliminar

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento secundario

- Laguna Aireada Mezcla Completa.
- Lagunas Aireadas Mezcla Parcial.
- Laguna de sedimentación
- Laguna de Pulimento

c. Línea de lodos

- Lechos de secado



Figura 15: Toma de muestra en la manga de purga de la laguna aerobia de la PTAR San Bartolo

C. PTAR Manchay

La PTAR Manchay se ubica en el distrito de Pachacámac de Lima Metropolitana. Esta planta trata un caudal de 60 l/s con tecnología ICEAS (Sistema de Aireación Extendida de Ciclos Intermitentes), una modificación de los reactores biológicos secuenciales que permite airear, sedimentar y decantar sus aguas en un mismo reactor.

Los componentes de la PTAR son los siguientes:

a. Tratamiento preliminar:

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento secundario

- Reactor biológico ICEAS
- Tanque ecualizador

c. Tratamiento terciario

- Filtros de arena

d. Línea de lodos

- Tanque espesador
- Tanque aireado
- Centrifuga



Figura 16: Lodos centrifugados de la PTAR Manchay

D. PTAR Cieneguilla

La planta se ubica en el distrito de Cieneguilla de Lima Metropolitana. Fue diseñada para tratar un caudal de 118 l/s, sin embargo, próximamente recibirá un nuevo afluente de 80-85 l/s que requerirá la ampliación de la PTAR. La tecnología de tratamiento de aguas residuales empleada es lodos activados de aireación convencional.

Los componentes de la PTAR son los siguientes:

a. Tratamiento preliminar:

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento secundario

- Reactor biológico de lodos activados de aireación convencional
- Sedimentador

c. Línea de lodos

- Cámara de bombeo
- Lechos de secados



Figura 17: Toma de muestra en el ingreso de los lodos de la cámara de retorno de la PTAR Cieneguilla



Figura 18: Lechos de secado de la PTAR Cieneguilla

E. PTAR Santa Clara

La PTAR Santa Clara se encuentra ubicada en el distrito de Ate Vitarte de Lima Metropolitana. Diseñada para depurar un caudal de 437.8 l/s proveniente de los desagües de las habilitaciones de Huaycán, Nicolas de Piérola, Santa Clara y anexos, emplea un sistema de lodos activados de aireación extendida.

a. Tratamiento preliminar:

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento secundario

- Reactor biológico de lodos activados de aireación extendida
- Clarificador

c. Tratamiento terciario

- Filtros de arena

d. Línea de lodos

- Espesador
- Centrífuga



Figura 19: Toma de muestra de la manguera de purga del clarificador de la PTAR Santa Clara



Figura 20: Toma de muestra de la válvula del espesador de la PTAR Santa Clara



Figura 21: Toma de muestra en la centrífuga de la PTAR Santa Clara

F. PTAR Totorá

La PTAR Totorá se encuentra en la provincia de Huamanga del departamento de Ayacucho. Inicialmente la planta, construida en el año 1974, fue diseñada tratar un caudal de 150 l/s empero, en el año 2004 se puso en marcha un proyecto de ampliación y mejoramiento que proponía incrementar la capacidad de tratamiento a 543 l/s. A la fecha, la PTAR depura un

aproximado de 355 l/s de aguas residuales con concentraciones de DBO de 310 mg/l y de coliformes fecales de 1.8×10^9 NMP/100 ml.

Los componentes de la PTAR son los siguientes:

a. Tratamiento preliminar:

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento secundario

- Tanques Imhoff
- Laguna facultativa
- Filtros percoladores
- Sedimentador secundario
- Laguna de maduración

c. Tratamiento de lodos

- Lechos de secado
- Pilas de composta

G. PTAR La Escalerilla

La PTAR La Escalerilla se encuentra en el distrito de Cerro Colorado, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa. Esta planta posee dos líneas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, debido a que sólo recibe aproximadamente un tercio de su caudal de diseño, actualmente sólo trabaja con una. Es la única planta en el país que cuenta con un secador solar, unidad capaz de reducir a 5%-10% la humedad de los lodos en un lapso de 24 horas.

Los componentes de la PTAR son los siguientes:

a. Tratamiento preliminar:

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento secundario

- Reactor biológico de aireación extendida
- Decantador

c. Tratamiento terciario

- Microfiltración
- Rayos UV

d. Tratamiento de lodos

- Espesador
- Centrífuga

- Lecho de secado convencional
- Secador solar



Figura 22: Secador térmico de la PTAR La Escalerilla



Figura 23: Lechos de secado de la PTAR La Escalerilla

H. PTAR San Jerónimo

La PTAR San Jerónimo se ubica en el distrito San Jerónimo, provincia de Cusco, departamento de Cusco. Está diseñada para tratar un caudal promedio de 446 l/s y un caudal máximo horario de 802 l/s. Es la única PTAR del país cuya línea de lodos cuenta con un digestor anaerobio mesofílico. La capacidad de esta unidad es de 570 m³ y cuenta con tiempos de retención de 20 a 21 días.

Los componentes de la PTAR son los siguientes:

a. Tratamiento preliminar:

- Rejas medias y finas.
- Desarenadores.

b. Tratamiento primario

- Sedimentador

c. Tratamiento secundario

- Filtros biológicos primarios y secundarios
- Sedimentadores secundarios

d. Tratamiento de lodos

- Espesador
- Digestor anaerobio
- Centrífuga



Figura 24: Digestor anaerobio de la PTAR San Jerónimo

I. X-RUNNER

La empresa X-Runner ofrece, a las familias, baños secos portátiles con separación de heces y orina. Las cámaras de recolección de heces cuentan con un volumen de 50 litros, aproximadamente. Debido a esta reducida capacidad, la remoción de lodos fecales debe ser semanalmente. Luego de cada deposición, los usuarios deben verter aserrín, como material secante, sobre sus excreciones. El servicio de X-Runner incluye el recojo domiciliario de los lodos. Si bien en un inicio estos se compostaban, actualmente son enviados a rellenos sanitarios ya que el tiempo de composta es muy amplio y las cantidades de lodos generados muy altas.



Figura 25: Baño seco de X-Runner



Figura 26: Lodos fecales de los baños secos

J. Arrebol

La empresa Arrebol ofrece dos tipos de baños secos. El primero cuenta con dos cámaras de almacenamiento de 500 litros de capacidad, el uso de estas debe ser alternante, es decir, sólo cuando una se llene se deberá usar la siguiente. Por lo general, el periodo de empleabilidad de cada cámara es un año. El segundo tipo de baño, denominado “Drymix”, posee una manivela que permite la mezcla de las heces con el aserrín previamente depositado. El tiempo de remoción de lodos en este baño es de 1 mes.

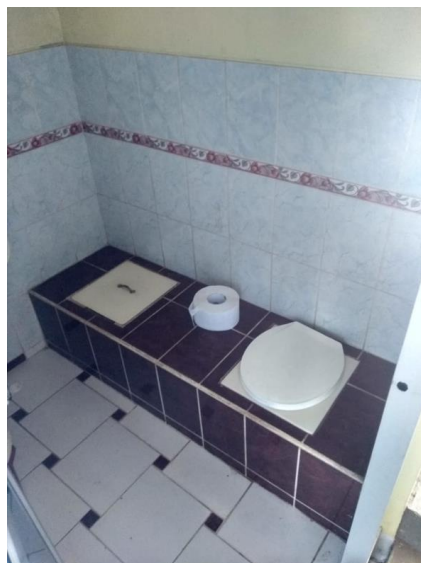


Figura 27: Baños secos fijos de doble cámara



Figura 28: Cámaras de baños fijos



Figura 29: Baños secos modelo Drymix



Figura 30: Interior del Drymix

Anexo 2: Análisis fisicoquímico

A. Análisis de sólidos

Tabla 48: Concentración de sólidos en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros			
				%Humedad	%ST	%SV (ST)	
DS-N°015-2017-VIVIENDA				60%			
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01	97.71	1.71	75.01
			Lecho de secado	LE-SS	10.56	88.76	59.8
			Secador solar	LE-ST	4.18	95.91	60.38
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional		CI-CR-01	99.5	0.5	57.93
				CI-CR-02	98.98	1.02	59.91
			Cámara de retorno	CI-CR-03	99.05	0.95	43.58
				CI-CR (promedio)	99.17	0.83	53.81
				CI-LS-01	96.23	3.77	62.4
				CI-LS-02	88.45	11.55	67.97
	Lecho de secado	CI-LS-03	87.22	12.78	65.16		
			CI-LS (promedio)	90.63	9.37	65.18	

Continuación...

			MA-TA-01	98.1	1.9	48.55	
			MA-TA-02	97.68	2.32	72.27	
		Tanque aireado	MA-TA-03	97.18	2.82	73.01	
			MA-TA (promedio)	97.65	2.35	64.61	
	Manchay	ICEAS	MA-CE-01	83.97	16.03	73.81	
			MA-CE-02	83.63	16.37	73.53	
		Centrífuga	MA-CE-03	84.23	15.77	73.64	
			MA-CE (promedio)	83.94	16.06	73.66	
PTAR LIMA			SB-LA-01	94.52	5.48	44.78	
			SB-LA-02	95.01	4.99	47.72	
	San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA-03	94.5	5.5	42.08
			SB-LA (promedio)	94.68	5.32	44.86	
				ST-CL-01	99.61	0.39	57.52
			ST-CL-02	99.49	0.51	56.8	
			ST-CL-03				
	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL-04			
				ST-CL-05	99.06	0.94	59.3
				ST-CL (promedio)	99.38	0.62	57.87

Continuación...

PTAR LIMA	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	ST-ES-01	96.03	3.97	64.99
				ST-ES-02	95.75	4.25	61.37
				ST-ES-03	94.75	5.25	61.62
				ST-ES-04	95.75	4.25	58.14
				ST-ES-05	95.66	4.34	61.98
			ST-ES (promedio)	95.59	4.41	61.62	
			Centrífuga	ST-CE-01	85.56	14.44	65.35
				ST-CE-02	82.05	17.95	61.7
				ST-CE-03	84.09	15.91	55.03
				ST-CE-04	86.2	13.8	60.85
				ST-CE-05	84.31	15.69	60.32
			ST-CE (promedio)	84.44	15.56	60.65	

Tabla 49: Concentración de sólidos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros			
				%Humedad	%ST	%SV (ST)	
DS-N°015-2017-VIVINDA						60%	
PTAR PROVINCIAS	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Espesador	SJ-ES-01 ^a	95.26	5.6	55.75
			Digestor anaeróbico	SJ-DA-01	96.87	3.3	52.29
			Centrífuga	SJ-CE-01	67.23	29.4	50.18
	Totorá	Tanques Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	90.86	9.14	44.73
			Lecho de secado	TO-LS-01	18.85	81.15	21.23
		Semi composta	TO-SC-01	50.78	49.22	39.27	
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN-01	91.17	8.83	58.2
				HU-LAN-02	90.63	9.37	51.89
				HU-LAN-03	88.85	11.15	52.52
				HU-LAN (promedio)	90.22	9.78	54.2

Nota: ^aLodo proveniente de filtro percolador

Tabla 50: Concentración de sólidos en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Código de campo	Análisis de sólidos		
			%HUMEDAD	%ST	%SV(ST)
DS-N°015-2017-VIVINDA					60%
X- Runner	Baños móviles	XR-BS-01	64.74	35.26	95.51
		XR-BS-02	63.29	36.71	94.96
		XR-BS-03	65.23	34.77	92.61
		XR-BS (promedio)	64.42	35.58	94.36
BAÑOS SECOS	Arrebol	AR-BS-01	15.54	84.46	81.83
		AR-BS-02	31.57	68.43	83.54
		AR-BS-03	62.19	37.81	78.27
		AR-BS -1año (promedio)	36.44	63.56	81.22
	Cámaras mensuales	AR-BS-04	59.51	40.49	89.95
		AR-BS-05	60.86	39.14	89.09
		AR-BS-1mes (promedio)	60.18	39.82	89.52

B. Análisis de metales pesados

Tabla 51: Concentraciones de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)										
				As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn			
DS-N°015-2017-VIVIENDA				40	40	1200	1500	400	17	400	2400			
PTAR PROVINCIAS	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01										
			Lecho de secado	LE-SS	4.6	1.4	334.3	145	52	0.6	14.8	674.3		
			Secador solar	LE-ST	4	1.3	265.8	135.9	56.6	0.7	16.7	629.3		
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional	Cámara de retorno	CI-CR-01	4.2	1	296.5	356.7	19.7	<0.262	12.4	483.1		
				CI-CR-02	5.5	1.5	351.1	500	29.9	0.4	16.3	666.1		
				CI-CR-03	4.6	1.2	287.1	462.9	24.8	0.4	15.6	612.4		
				CI-CR (promedio)	4.8	1.2	311.6	439.9	24.8	0.4	14.8	587.2		
				CI-LS-01	4.2	1	305	375.8	20	<0.262	11.9	509.2		
			Lecho de secado	CI-LS-02	4.3	1.4	340.7	466.9	25.1	0.4	15.9	624.7		
				CI-LS-03	13.2	1.4	277.7	452.7	63.5	0.5	15.1	612.1		
				CI-LS (promedio)	7.2	1.3	307.8	431.8	36.2	0.5	14.3	582		
			Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA-01	4.7	3	40.3	101.2	51.5	<0.262	28.2	571.2
						MA-TA-02	5.7	2.3	16.9	118.2	59.5	0.4	10	624.6

Continuación...

PTAR LIMA	Manchay	ICEAS	Centrífuga	MA-TA-03	4.6	1.4	13	98.3	56.2	0.3	9.8	488.9
				MA-TA (promedio)	5	2.2	23.4	105.9	55.7	0.3	16	561.5
				MA-CE-01	4.1	3.1	13.5	105.6	50.3	<0.262	11.9	595.2
				MA-CE-02	4.9	2.4	14.5	121.5	56.8	0.6	9.2	631.9
				MA-CE-03	4.8	1.5	15.5	111.3	65	0.4	9.3	538.7
				MA-CE (promedio)	4.6	2.3	14.5	112.8	57.3	0.5	10.1	588.6
	San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA-01	19	5.1	228.4	444.5	108.2	4.6	22.9	1754.1
				SB-LA-02	19.9	4.8	306.9	437.4	136.6	6.1	24.7	1410.7
				SB-LA-03	23.6	6.4	293	479.4	117	5.9	29.8	1810.6
				SB-LA (promedio)	20.8	5.4	276.1	453.8	120.6	5.5	25.8	1658.5
	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL-01	6.7	1.7	420.8	145	49.4	0.3	43.4	565.5
				ST-CL-02	9.1	3.4	528.5	187.2	77.3	1	53.8	734.5
				ST-CL-03	3.6	3.4	329.6	118.6	34.5	0.4	33.1	501.7
				ST-CL-04	5.7	3.8	502.5	172.3	47.5	0.5	56.4	546.2
				ST-CL-05	<2.857	<0.144	5.4	1.7	0.4	<0.262	0.5	7.1
			ST-CL (promedio)	6.3	3.1	357.3	125	41.8	0.6	37.4	471	
Espesador			ST-ES-01	6.8	1.9	472.1	157.6	55.1	0.4	39.4	603.6	
			ST-ES-02	8.4	3.3	529.9	190.2	69	0.8	51.1	739.1	
	ST-ES-03	5.2	4.3	420.9	155.4	50.3	0.7	42.9	717.1			
	ST-ES-04	5.1	4.4	594.1	206.8	61.9	0.8	57.5	644.7			

Continuación...

			ST-ES-05	9	6.3	705	207.7	75.9	0.7	73.7	956.9	
			ST-ES (promedio)	6.9	4	544.4	183.5	62.4	0.7	52.9	732.3	
PTAR LIMA	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Centrífuga	ST-CE-01	8.2	2	546.9	163.2	68.6	0.4	47.1	625.6
				ST-CE-02	6.8	5.4	415.9	152.2	51.7	0.7	48.3	673.5
				ST-CE-03	4	3.2	330.1	120.9	35.6	0.4	32.7	535.2
				ST-CE-04	5.4	4.5	581.8	199.8	56.3	0.7	58.3	633
				ST-CE-05	9.4	6	668.1	211.3	70.6	0.8	66.7	907
				ST-CE (promedio)	6.7	4.2	508.6	169.5	56.5	0.6	50.6	674.8

Tabla 52: Concentraciones de metales pesados en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros de toxicidad química (mg/kg ST)								
				As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn	
DS-N°015-2017-VIVIENDA				40	40	1200	1500	400	17	400	2400	
PTAR PROVINCIA	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Espesador	SJ-ES-01								
			Digestión anaerobia	SJ-DA-01								
			Centrífuga	SJ-CE-01	7.3	1	22	135.9	27.3	0.6	13.2	791.1
	Totora	Tanques Imhoff	Tanques Imhoff	TO-IM4-01	4.8	0.7	55.2	73.7	36.4	0.6	33.3	369.1
			Lecho de secado	TO-LS-01	7.4	1	36.7	70	37.6	0.8	24.7	447.5
			Semi composta	TO-SC-01	6.4	0.8	25.1	50	37.3	0.8	16.3	438.5
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN-01	8.4	3.4	123.6	197.7	33.3	0.7	92.1	1387.7
				HU-LAN-02	11.9	4.8	54.6	264.3	42.4	0.9	44.6	1842.6
				HU-LAN-03	10.5	3.3	56.7	249.2	38.2	1.5	51.5	1297.9
				HU-LAN (promedio)	10.3	3.8	78.3	237	38	1	62.7	1509.4

Tabla 53: Concentraciones de metales pesados en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros									
				As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn		
DS-N°015-2017-VIVIENDA				40	40	1200	1500	400	17	400	2400		
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS-01									
				XR-BS-02	<2.857	0.21	1.14	4.78	<0.346	<0.262	2.13	90.92	
				XR-BS-03									
				XRUNNER (promedio)	<2.857	0.21	1.14	4.78	<0.346	<0.262	2.13	90.92	
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras anuales		AR-BS-01								
					AR-BS-02	<2.857	0.62	1.92	26.71	5.84	0.34	2.96	336.79
					AR-BS-03								
			Cámaras mensuales		ARREBOL - 1año (promedio)	<2.857	0.62	1.92	26.71	5.84	0.34	2.96	336.79
					AR-BS-04	<2.857	0.77	1.81	24.61	1.17	<0.262	1.88	145.42
					AR-BS-05								
		AR-BS-m (promedio)	<2.857	0.77	1.81	24.61	1.17	<0.262	1.88	145.42			

C. Análisis elemental

Tabla 54: Análisis elemental de lodos aerobios de PTAR

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros							
				C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)			
PTAR DE PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01	31.56	5.43	5.69	1.39			
			Lecho de secado	LE-SS-01	29.01	4.83	5.18	1.63	14.8		
			Secador solar	LE-ST-01	30.94	4.94	5.51	1.39	12.59		
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional	Cámara de retorno	CI-CR-01	27.14	4.74	3.82	13.11			
				CI-CR-02	34.81	5.08	6.11	1.1			
				CI-CR-03							
			CI-CR (promedio)	30.97	4.91	4.97	7.11				
			Lecho de secado	CI-LS-01	28.32	5.26	4.4	1.14	31.79		
				CI-LS-02	30.16	5.06	4.6	1.08	32.42		
				CI-LS-03	30.54	4.91	4.88	1.3	27.34		
				CI-LS (promedio)	29.67	5.08	4.63	1.17	30.52		
			Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA-01	32.55	5.95	6.16	0.99	33.61
						MA-TA-02					
MA-TA-03	34.67	5.74				6.21	0.91	5.18			

Continuación...

			MA-TA (promedio)	33.6	5.8	6.2	1.0	19.4			
Manchay	ICEAS	Centrífuga	MA-CE-01	34.13	6.2	6.6	0.87	34.43			
			MA-CE-02	36.59	6.24	6.64	0.83	34.69			
			MA-CE-03	35.07	5.77	6.44	1.04	5.47			
			MA-CE (promedio)	35.26	6.07	6.56	0.91	24.86			
San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA-01	0.25	10.43	0.14	0.11				
			SB-LA-02	0.38	10.05	0.12	0.13				
			SB-LA-03	0.37	10.06	0.19	0.26				
			SB-LA (promedio)	0.33	10.18	0.15	0.17				
PTAR LIMA			ST-CL-01								
			ST-CL-02								
			ST-CL-03								
			Clarificador	ST-CL-04							
				ST-CL-05	32.97	4.81	5.7	1.78	32.97		
			Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida		ST-CL (promedio)	32.97	4.81	5.7	1.78	32.97
						ST-ES-01					
					Espesador	ST-ES-02					
						ST-ES-03					
						ST-ES-04					
ST-ES-05	30.04	5.33				5.03	1.27	31.3			

Continuación...

				ST-ES (promedio)	30.04	5.33	5.03	1.27	31.3	
				ST-CE-01	31.19	5.39	5.13	1.29	32.28	
				ST-CE-02	30.12	4.98	4.69	1.48	27.51	
				ST-CE-03						
PTAR	Santa Clara	Lodos activados	Centrífuga	ST-CE-04	30.34	4.83	4.74		25.01	
LIMA		de aireación		ST-CE-05	30.35	4.68	4.86	1.49	24.99	
		extendida		ST-CE (promedio)	30.5	5.0	4.9	1.4	27.4	

Tabla 55: Análisis elemental de lodos anaerobios de PTAR

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros					
				C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	
PTAR PROVINCIAS	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Espesador	SJ-ES-01	30.15	4.88	3.09	1.06	
			Digestión anaerobia	SJ-DA-01	25.57	4.19	2.74	1.22	
			Centrífuga	SJ-CE-01	29.15	4.98	3.12	0.9	13.03
	Totorá	Tanques Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	24.34	3.97	2.09	0.72	
			Lecho de secado	TO-LS-01	9.27	2.05	1.18	0.81	
			Semi composta	TO-SC-01	18.46	3.2	2.06	0.93	
PTAR LIMA	Huácar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN-01					
				HU-LAN-02					
				HU-LAN-03	30.91	4.61	2.58	1.55	4.73
				HU-LAN (promedio)	30.91	4.61	2.58	1.55	4.73

Tabla 56: Análisis elemental de los lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros					
				C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS-01	49.45	6.77	1.77	0.93	12.76
				XR-BS-02	46.53	6.29	1.28	0.27	5.74
				XR-BS-03	46.21	6.67	2.79	0.45	10.79
				XR-BS (promedio)	47.4	6.58	1.94	0.55	9.77
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras anuales	AR-BS-01	38.72	5.75	3.7	0.9	8.63
				AR-BS-02	39.63	5.58	2.56	0.59	9.81
				AR-BS-03	31.24	4.86	3.69	1.03	6.03
				AR-BS - 1 año (promedio)	36.53	5.4	3.32	0.84	8.16
			Cámaras mensuales	AR-BS-04	45.11	5.76	3.55	0.42	9.21
				AR-BS-05	46.59	5.95	2.01	0.24	10.65
				AR-BS-1mes (promedio)	45.85	5.85	2.78	0.33	9.93

D. Análisis de concentración de P y K

Tabla 57: Concentración de P y K en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
				P (%)	K (%)			
PTAR DE PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01				
			Lecho de secado	LE-SS-01	1.62	0.59		
			Secador solar	LE-ST-01	1.44	0.59		
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional	Cámara de retorno	CI-CR-01	0.87	0.25		
				CI-CR-02	1.37	0.34		
				CI-CR-03	1.01	0.21		
			CI-CR (promedio)	1.08	0.27			
			Lecho de secado	CI-LS-01	0.88	0.24		
				CI-LS-02	1.23	0.23		
				CI-LS-03	1.06	0.21		
				CI-LS (promedio)	1.05	0.23		
			Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA-01	1.37	0.73
						MA-TA-02	2.24	0.73
MA-TA-03	1.4	0.7						
MA-TA (promedio)	1.67	0.72						

Continuación...

PTAR LIMA	Manchay	ICEAS	Centrífuga	MA-CE-01	1.53	0.65
				MA-CE-02	1.69	0.43
				MA-CE-03	1.53	0.39
				MA-CE (promedio)	1.58	0.49
	San Bartolo	Laguna aireada	Laguna aireada	SB-LA-01	1.42	0.12
				SB-LA-02	1.53	0.14
				SB-LA-03	1.63	0.15
				SB-LA (promedio)	1.52	0.14
	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL-01	0.89	0.34
				ST-CL-02	1.2	0.27
				ST-CL-03	0.61	0.16
				ST-CL-04	0.86	0.55
				ST-CL-05	0.01	0.01
				ST-CL (promedio)	0.71	0.27

Continuación...

				ST-ES-01	0.93	0.25
				ST-ES-02	1.08	0.21
				ST-ES-03	0.92	0.22
			Espesador	ST-ES-04	0.95	0.32
				ST-ES-05	1.19	0.31
				ST-ES (promedio)	1.01	0.26
PTAR LIMA	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida		ST-CE-01	0.74	0.14
				ST-CE-02	1.21	0.5
				ST-CE-03	0.6	0.13
			Centrífuga	ST-CE-04	0.83	0.22
				ST-CE-05	1.12	0.25
				ST-CE (promedio)	0.9	0.25

Tabla 58: Concentración de P y K en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				P (%)	K (%)	
PTAR PROVINCIAS	San Jerónimo	Espesador	SJ-ES-01			
		Digestión anaerobia	SJ-DA-01			
		Centrífuga	SJ-CE-01	1.16	0.15	
	Totorá	Tanques Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	0.86	0.42
			Lecho de secado	TO-LS-01	0.77	0.39
			Semi composta	TO-SC-01	0.79	0.47
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	HU-LAN-01	0.76	0.15	
			HU-LAN-02	0.88	0.15	
			HU-LAN-03	0.7	0.13	
			HU-LAN (promedio)	0.78	0.14	

Tabla 59: Concentración de P y K en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				P (%)	K (%)	
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	XR-BS-01	0.51	0.48	
			XR-BS-02			
			XR-BS-03			
			XR-BS (promedio)			
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras anuales	AR-BS-01	0.83	1.53
				AR-BS-02		
				AR-BS-03		
			Cámaras mensuales	AR-BS - 1 año (promedio)	0.9	1.48
				AR-BS-04		
				AR-BS-05		
			AR-BS-m (promedio)	0.9	1.48	

E. Análisis termogravimétrico

Tabla 60: Análisis termogravimétrico de lodos aerobios de PTAR

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Base húmeda				
				Humedad (%)	MV (%)	Cenizas (%)	CF (%)	
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Lecho de secado	LE-SS-01	10.56	53.46	32.22	3.76
			Secador solar	LE-ST-01	4.18	58.3	32.99	4.53
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados	Lecho de secado	CI-LS-01	96.2	1.01	1.36	1.42
				CI-LS-02	88.36	6.52	4.54	0.58
				CI-LS-03	87.88	7.29	4.08	0.74
				CI-LS (promedio)	90.81	4.94	3.33	0.91
	Manchay	ICEAS	Centrífuga	MA-CE-01	83.71	11.73	5.48	0.43
				MA-CE-02	83.83	11.96	4.29	0.06
				MA-CE-03	84.07	11.7	3.98	0.24
				MA-CE (promedio)	83.87	11.8	4.58	0.24
	Santa Clara	Lodos activados aireación extendida	Centrífuga	ST-CE-01	85.23	9.29	5.1	0.38
				ST-CE-02	81.82	10.55	7.43	0.19
ST-CE-03				84.12	10.94	4.62	0.25	
ST-CE-04				85.97	8.26	5.15	0.62	
ST-CE-05				84.53	9.31	5.73	0.42	
			ST-CE (promedio)	84.33	9.67	5.61	0.37	

Tabla 61: Análisis termogravimétrico de lodos anaerobios de PTAR

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Base húmeda				
				Humedad (%)	MV (%)	Cenizas (%)	CF (%)	
PTAR PROVINCIAS	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Digestión anaerobia	SJ-ES-01	95.26	1.17	2.02	1.55
				SJ-DA-01	96.87	0.2	1.38	1.57
				SJ-CE-01	67.23	17.52	15.27	0
	Tоторa	Tanques Imhoff	Tanques Imhoff	TO-IM4-01	91.76	2.56	4.65	1.02
				TO-LS-01	18.5	19.55	62.02	0.08
				TO-SC-01	53.37	18.85	27.75	0.12
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaerobia	HU-LAN-01	91.82	4.1	3.05	1.03
				HU-LAN-02	92.61	2.58	3.78	1.03
				HU-LAN-03	89.32	5.35	4.13	1.21
				HU-LAN (promedio)	91.25	4.01	3.65	1.09

Tabla 62: Análisis termogravimétrico de lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Base húmeda				
				Humedad (%)	MV (%)	Cenizas (%)	CF (%)	
Baños secos	X-Runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS-01	67.07	29.26	1.34	2.34
				XR-BS-02	56.07	38.38	1.44	4.11
				XR-BS-03	62.74	32.56	2.75	1.95
				XR-BS	61.96	33.4	1.84	2.8
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras anuales	AR-BS-01	36.86	47.98	8.27	6.89
				AR-BS-02	30.08	53.69	9.24	7
				AR-BS-03	59.62	27.89	10.36	2.12
			Cámaras mensuales	AR-BS - 1año	42.19	43.19	9.29	5.33
				AR-BS-04	30.51	55.66	6.64	7.18
				AR-BS-05	61.4	32.27	3.44	2.89
			AR-BS-1mes	45.96	43.97	5.04	5.04	

F. Análisis de contenido energético

Tabla 63: Contenido energético de lodos aerobios de PTAR

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Lecho de secado	LE-SS-01	12.88	11.52
			Secador solar	LE-ST-01	13.52	12.95
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados de aireación convencional	Lecho de secado	CI-LS-01	13.05	0.5
				CI-LS-02	13.12	1.53
				CI-LS-03	12.81	1.55
				CI-LS (promedio)	12.99	1.19
	Manchay	ICEAS	Centrífuga	MA-CE-01	15.34	2.5
				MA-CE-02	19.9	3.22
				MA-CE-03	16.05	2.56
			MA-CE (promedio)	17.1	2.76	

Continuación...

				ST-CE-01	14.96	2.21
				ST-CE-02	12.01	2.18
				ST-CE-03	13.48	2.14
PTAR LIMA	Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Centrífuga	ST-CE-04	15.76	2.21
				ST-CE-05	15.51	2.4
				ST-CE (promedio)	14.34	2.23

Tabla 64: Contenido energético de lodos anaerobios de PTAR

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	
PTAR PROVINCIAS	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Centrífuga	SJ-CE-01	14.15	4.62
	Totorá	Tanques Imhoff	Lecho de secado	TO-LS-01	4.25	3.46
			Semi composta	TO-SC-01	7.74	3.61

Tabla 65: Contenido energético de lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros		
				PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	
BAÑOS SECOS	X-Runner	Baños móviles	Baños móviles	XR-BS-01	20.17	6.75
				XR-BS-02	20.06	8.78
				XR-BS-03	20.35	7.61
				XR-BS	20.19	7.71
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras anuales	AR-BS-01	17.45	12
				AR-BS-02	15.07	10.5
				AR-BS-03	12.85	4.94
			Cámaras mensuales	AR-BS - 1 año	15.12	9.15
				AR-BS-04	14	9.73
				AR-BS-05	14.65	5.65
AR-BS-1mes	14.32	7.69				

Anexo 3: Análisis microbiológico

Tabla 66: Concentración de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías aerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
				Coliformes Totales (UFC/g ST)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g ST)	Coliformes Termotolerantes (UFC/g ST)	#H.H./4gST	
DS-N°015-2017-Vivienda					<10 ³ NMP/1gST		<1	
PTAR PROVINCIA	La Escalerilla	Lodos activados de aireación extendida	Espesador	LE-ES-01	4.91E+02	2 x 10 ⁷	2.80E+07	6
			Lecho de secado solar	LE-ST-01	1.29E+10	5.00E+08	No crecimiento	10
			Lecho de secado térmico	LE-SS-01	5.00E+08	5.00E+07	No crecimiento	2
PTAR LIMA	Cieneguilla	Lodos activados convencional	Cámara de retorno	CI-CR-01	2.68E+09	1.06E+09	1.10E+09	28
				CI-CR-02	2.35E+10	1.16E+10	1.90E+10	15
				CI-CR-03	3.68E+10	1.16E+10	2.20E+10	<1
			CI-CR (promedio)	2.10E+10	8.09E+09	1.40E+10	22	
			Lecho de secado	CI-LS-01	2.27E+09	4.30E+08	8.00E+08	33
				CI-LS-02	1.80E+10	6.20E+09	7.00E+09	17
				CI-LS-03	2.50E+10	9.20E+09	1.90E+10	22
CI-LS (promedio)	1.51E+10	5.28E+09		8.93E+09	24			

Continuación...

Manchay	ICEAS	Tanque aireado	MA-TA-01	1.89E+10	4.60E+09	No crecimiento	<1		
			MA-TA-02	3.34E+10	6.50E+09	8.20E+09	<1		
			MA-TA-03	2.62E+10	1.44E+10	2.30E+10	<1		
			MA-TA (promedio)	2.62E+10	8.50E+09	1.56E+10	<1		
		Centrífuga	MA-CE-01	1.59E+10	3.90E+09	No crecimiento	<1		
			MA-CE-02	1.08E+10	2.60E+09	3.80E+09	<1		
			MA-CE-03	1.20E+10	3.00E+09	5.00E+09	<1		
			MA-CE (promedio)	1.29E+10	3.17E+09	4.40E+09	<1		
		San Bartolo	Laguna aerobia	Laguna aerobia	SB-LA-01	4.90E+09	1.00E+09	1.40E+09	27
					SB-LA-02	7.80E+09	1.30E+09	6.00E+09	45
SB-LA-03	8.50E+09				1.00E+09	6.00E+09	33		
SB-LA (promedio)	7.07E+09				1.10E+09	4.47E+09	35		
Santa Clara	Lodos activados de aireación extendida	Clarificador	ST-CL-01	1.63E+10	5.50E+09	6.00E+09	15		
			ST-CL-02	2.00E+10	6.20E+09	1.90E+10			
			ST-CL-03						
			ST-CL-04						
			ST-CL-05	9.60E+09	1.20E+09	4.00E+09	20		
		ST-CL (promedio)	1.53E+10	4.30E+09	9.67E+09	18			
		Espesador	ST-ES-01	7.05E+09	2.32E+09	3.80E+09	10		
			ST-ES-02	1.06E+10	1.60E+09	3.00E+09	10		

Continuación...

	ST-ES-03	1.03E+10	3.00E+09	8.00E+09	8
	ST-ES-04	4.60E+09	3.00E+09	1.50E+09	6
	ST-ES-05	5.40E+09	3.00E+08	3.00E+09	10
	ST-ES (promedio)	7.59E+09	2.04E+09	3.86E+09	11
Centrífuga	ST-CE-01	2.65E+09	6.90E+08	1.30E+09	
	ST-CE-02	1.24E+10	1.10E+09	2.00E+09	
	ST-CE-03	6.80E+09	1.00E+09	4.00E+09	18
	ST-CE-04	3.40E+09	5.00E+08	2.00E+09	13
	ST-CE-05	3.80E+09	9.00E+08	2.00E+09	11
	ST-CE (promedio)	5.81E+09	8.38E+08	2.26E+09	14

Tabla 67: Concentración de microorganismos patógenos en lodos provenientes de tecnologías anaerobias

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
				Coliformes Totales (UFC/g ST)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g ST)	Coliformes Termotolerantes (UFC/g ST)	H.H/4gST	
DS-N°015-2017-Vivienda					<10³		<1	
PTAR PROVINCIA	San Jerónimo	Digestión anaerobia	Espesador (lodo aerobio)	SJ-ES-01	8.80E+07	5.40E+06	3.20E+07	14
			Digestor anaerobio	SJ-DA-01	1.94E+08	1.38E+07	8.60E+07	8
			Centrífuga	SJ-DA	2.22E+08	7.50E+06	1.26E+08	15
	Totorá	Tanque Imhoff	Tanque Imhoff	TO-IM4-01	1.23E+10	6.53E+09	9.80E+09	11
			Lecho de secado	TO-LS-01	2.16E+09	9.60E+08	1.35E+09	7
			Semi composta	TO-SC	6.10E+09	2.70E+09	4.50E+09	18
PTAR LIMA	Huáscar	Laguna anaerobia	Laguna anaeróbica	HU-LAN-01				
				HU-LAN-02	5.40E+09	9.00E+08	3.00E+09	14
				HU-LAN-03	1.33E+10	2.40E+09	3.00E+09	26
				HU-LAN (promedio)	9.35E+09	1.65E+09	3.00E+09	20

Tabla 68: Concentración de microorganismos patógenos en lodos fecales de BES

Procedencia	Sistema de tratamiento	Unidad de tratamiento	Código de campo	Parámetros				
				Coliformes Totales (UFC/g ST)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/g ST)	Coliformes Termotolerantes (UFC/g ST)	H.H. / 4 g ST	
DS-N°015-2017-Vivienda				<10³ NMP/1gST				
BAÑOS SECOS	X-runner	Baños móviles	Cámaras semanales	XR-BS-01	2.30E+08	1.13E+08	1.87E+08	9333
				XR-BS-02	1.40E+08	8.90E+07	9.89E+07	
				XR-BS-03	1.90E+08	1.06E+08	1.34E+08	10500
				XR-BS (promedio)	1.87E+08	1.03E+08	1.40E+08	9917
	Arrebol	Baños fijos	Cámaras anuales	AR-BS-01	2.69E+05	1.35E+05		817
				AR-BS-02	3.51E+05	1.40E+05		817
				AR-BS-03	2.38E+05	1.01E+05		817
			Cámaras mensuales	AR-BS 1 año (promedio)	2.86E+05	1.25E+05		817
				AR-BS-04	5.62E+07	2.37E+07	4.01E+07	1517
				AR-BS-05	2.35E+07	7.98E+06	1.05E+07	350
				AR-BS 1 mes (promedio)	3.99E+07	1.58E+07	2.53E+07	933