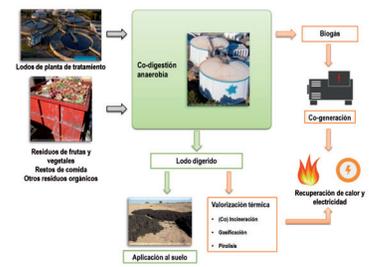


Aspectos tecnológicos y de gestión de la co-digestión anaerobia de lodos de depuradora con desechos orgánicos y de vegetales

Technological and management aspects of the anaerobic co-digestion of sewage sludge with vegetable and organic wastes



Patricio Neumann-Langdon¹, Claudia Oviedo-Silva², Alvaro Suazo-Schwencke³, Francisco Ramis-Lanyon⁴ y Pamela Delgado-Neira⁴

Universidad del Bío Bío. Departamento de Ciencias Básicas¹, Departamento de Química², Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental³ y Departamento de Ingeniería Industrial⁴. Avda. Collao 1202. Casilla 5 - Concepción, Región del Bío-Bío (Chile).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9079> | Recibido: 07/01/2019 • Inicio Evaluación: 10/01/2019 • Aceptado: 08/02/2019

ABSTRACT

- Sewage treatment plants (STPs) sanitize wastewater so that it can be discharged into natural watercourses. As a result of this treatment, biosolids or sludge are generated. Sludge disposal is a potential source of soil and water pollution, and its management can account for up to 50% of the operational costs of wastewater treatment facilities. On the other hand, the management of other sources of organic wastes such as fruit and vegetable waste (FVW) represent a challenge and an opportunity, due to their high volumes and potential energy valorization through biological and thermal processes. In this article, we review the main reports regarding anaerobic co-digestion of sewage sludge with FVW and similar residues. Only pilot and full-scale experiences were included in our search, in an attempt to provide a realistic assessment of the degree of technology adoption in industrial plants. Additionally, we review the current Chilean, European and American regulations regarding final disposal or elimination of sludge, with emphasis on those that involve waste energy valorization, such as incineration in cement plants.
- **Key Words:** Co-digestion, Fruit and vegetable waste, Energy valorization, Anaerobic Digestion, Sewage sludge.

RESUMEN

Las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) desinfectan las aguas residuales para que puedan verterse en los cursos de agua naturales. Como resultado de este tratamiento, se generan lodos o biosólidos. La eliminación de lodos es una fuente potencial de contaminación del suelo y del agua, y su gestión puede representar hasta el 50% de los costes operativos de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales. Por otro lado, la gestión de otras fuentes de residuos orgánicos como los residuos hortofrutícolas (RHF) representa un reto y una oportunidad, debido a sus altos volúmenes y a la potencial valorización energética a través de procesos biológicos y térmicos.

En este artículo se revisan los principales reportes sobre la co-digestión anaeróbica de lodos de depuradora con RHF y residuos similares. Sólo se incluyeron en nuestra búsqueda experiencias piloto y a gran escala, en un intento de proporcionar una evaluación realista del grado de adopción de la tecnología en las plantas industriales. Adicionalmente, revisamos las regulaciones chilenas, europeas y americanas vigentes en materia de disposición final o eliminación de lodos, con énfasis en aquellas que involucran su valorización energética, como la incineración en plantas cementeras.

Palabras clave: Co-digestión, residuos de frutas y verduras, valorización energética, digestión anaeróbica, lodos de depuradora.

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento y gestión de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS) es un problema importante, que representa hasta el 50% de los costos operativos de las instalaciones de depuración [1, 2]. A fin de lograr una gestión sostenible de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, es necesario tener en cuenta las tecnologías disponibles, así como las reglamentaciones ambientales e impactos socioeconómicos.

Entre los tratamientos para estabilizar los lodos, la digestión anaerobia es una alternativa ventajosa debido a la producción de biogás, con una alta concentración de metano [3, 4, 5]. La electricidad obtenida a partir del biogás puede ser utilizada para el suministro de las instalaciones de tratamiento o vendida si existe un excedente. La co-digestión es una estrategia de gestión para optimizar el proceso de digestión de lodos anaerobios en PTAS, e implica la digestión de residuos como los lodos con otros desechos orgánicos, lo que podría aumentar la fracción de materia orgánica biodegradable y mejorar las condiciones de la digestión, lo que conduce a una mayor producción de biogás [6].

Por otra parte, los residuos de frutas y verduras (RFV) generados en los centros de distribución y suministro representan una importante fuente de residuos orgánicos en Chile. En estos centros (mayoristas y minoristas), actividades tales como el almacenamiento, transporte, procesamiento y empaque se realizan de manera conjunta. Diariamente, estos centros se enfrentan a las dificultades asociadas con la generación de grandes volúmenes de desechos orgánicos. Debido a su composición, los RFV también pueden ser convertidos en biogás mediante procesos de digestión anaerobia, con rendimientos potenciales de metano de 0.1 a 0,7 L g⁻¹ de sólidos volátiles (VS) añadido, dependiendo del desecho en particular [7]. Además, los RFV pueden utilizarse para balancear la relación C/N cuando son mezclados con los lodos de depuradora en un proceso de co-digestión, lo que resulta en una mejora en la producción de biogás [8].

El objetivo de este artículo es ofrecer una visión general de la co-digestión anaerobia de lodos de depuradora con RFV y desechos orgánicos similares, centrándose en los estudios realizados en piloto o instalaciones de gran escala. Se presenta una discusión de los principales hallazgos técnicos, así como los aspectos legis-

lativos y tecnológicos necesarios para la valorización y eliminación sustentable de estos residuos.

2. MÉTODOS

Se realizó una revisión de estudios acerca de la co-digestión de lodos de depuradora y RFV en escala piloto e instalaciones industriales. Sólo artículos revisados por pares, en idioma inglés fueron considerados para su inclusión en este artículo. La comparación entre los diferentes informes se basó en dos criterios principales: (1) Condiciones operacionales de la digestión, y (2) efectos principales de la co-digestión sobre la operación de los digestores y la producción de biogás.

Además, el principal documento normativo sobre la gestión y disposición final de lodos de depuradora en Chile (D.S. N° 4/2009) fue comparado con las reglamentaciones vigentes en EE.UU. y Europa. Los siguientes criterios de comparación fueron utilizadas: objetivo, objeto de protección, alternativas de disposición final y contenido principal. Se incluye además un análisis de las alternativas existentes para la valorización energética de los lodos residuales de la digestión anaerobia, con foco en su incineración en plantas cementeras debido a la viabilidad de esta opción en el contexto chileno.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE BIOSÓLIDOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La digestión anaerobia es el proceso en el cual la materia orgánica de los biosólidos es degradado por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. Este proceso se produce en condiciones estrictamente anaerobias, con valores de potencial redox ambientales bajo -200 mV [9]. Como consecuencia de este proceso, se reduce el volumen de lodos y una gran parte de los gérmenes patógenos son eliminados, facilitando la gestión de los biosólidos.

La digestión anaerobia se ve influenciada por diversos factores que afectan la eficiencia del proceso en mayor o menor medida y que, por lo tanto, regulan el rendimiento y la producción global de metano. De hecho, la configuración del reactor, las condiciones en las que este opera (temperatura, pH y tiempo de retención, entre otros), y el tipo de desecho tratados son factores clave que determinan la eficiencia del proceso [9]. Las reacciones bioquímicas que tienen lugar durante la digestión anaerobia se clasifican en cuatro grupos principales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis [9]. Como consecuencia de estas reacciones, una parte importante de la materia orgánica biodegradable se transforma en biogás, formado principalmente por metano y dióxido de carbono [9]. El biogás producido a partir de los lodos puede ser utilizado como combustible para ayudar a satisfacer la demanda de energía del proceso de depuración [9].

El biogás producido en la digestión anaerobia se compone de un 60 - 70% de metano, 30 - 40% de dióxido de carbono y porcentajes más bajos (1 - 5%) de otros gases como H_2S , H_2 , NH_3 y otros. La composición del biogás depende del material digerido, mientras que el valor calorífico del biogás con un contenido de metano de 65% es de aproximadamente 21 a 25 MJ m^{-3} [9]. El lodo digerido contiene en promedio entre un 50 y un 70% de materia orgánica y un 30-50% de componentes inorgánicos, dependiendo del proceso de estabilización [10]. El valor calorífico del lodo crudo es de aproximadamente 17 MJ kg^{-1} , mientras que el de fangos activados es de alrededor de 15 MJ kg^{-1} y el de los lodos estabilizados es de alrededor de 11 MJ kg^{-1} [11].

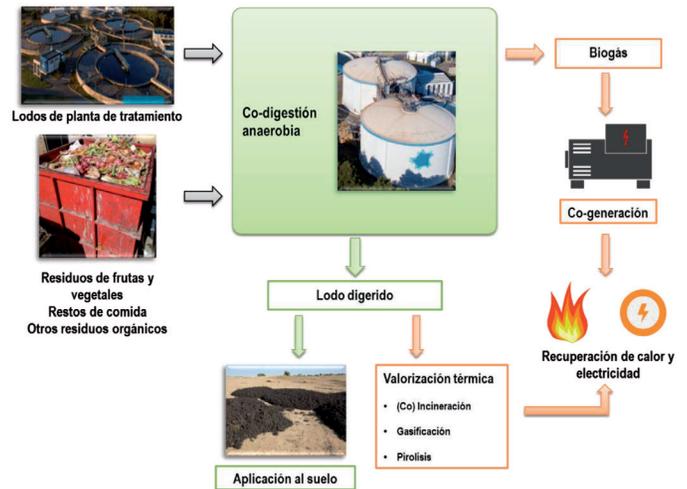


Fig. 1: Representación esquemática de la co-digestión anaerobia de lodos de depuradora

La mayoría de los sistemas de digestión de lodos anaerobios son construidos con un exceso de capacidad, tomando en consideración el futuro crecimiento demográfico. Además, normalmente operan con bajas velocidades de carga orgánica (VCO; $kgVS < 4,0 m^{-3} día^{-1}$) debido al bajo contenido de sólidos del lodo entrante (20 - 40% p/p de sólidos totales) [12]. De esta forma, la producción de biogás puede mejorarse añadiendo material biodegradable junto al lodo, lo que permitiría aumentar la carga del digestor en un proceso conocido como co-digestión de residuos [9, 13] (Fig. 1).

3.2. CO-DIGESTIÓN DE BIOSÓLIDOS DE AGUAS RESIDUALES Y RESIDUOS ORGÁNICOS

La co-digestión anaeróbica de residuos orgánicos es una tecnología creciente para el tratamiento simultáneo de varios desechos orgánicos sólidos y líquidos en los países europeos. Sus principales ventajas son un aumento en el rendimiento de metano debido al suministro de nutrientes y un uso más eficiente de los equipos al procesar varios flujos de residuos en una sola instalación [6].

En particular, Zahan *et al.* [14] reportan que una de las estrategias para mejorar la eficiencia de la digestión anaerobia en las PTAS es la co-digestión de lodos con otros desechos orgánicos, debido a que esta estrategia aumenta la materia orgánica biodegradable y proporciona materia prima con una relación C/N óptima para el proceso. La relación C/N influye en la producción de biogás debido a que el carbono es la fuente de energía para los microorganismos y el nitrógeno es fundamental para el crecimiento de nuevas células. La mayoría de los valores reportados para la relación C/N se encuentran en el rango de 20/1 a 30/1 [15]. Sin embargo, el valor óptimo varía según el tipo de residuos que se tratan. Diversos estudios describen el tratamiento de distintos co-residuos junto a lodos de depuradora, incluyendo: la fracción orgánica de residuos sólidos municipales (FORM) [16, 17], glicerol [18], residuos de la producción de café soluble [19], residuos de trampas de grasa de plantas de transformación de carne [20, 21] y residuos de frutas y vegetales [22].

3.3. ESTUDIOS DE CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS Y RFV EN ESCALA PILOTO E INDUSTRIAL

En general, existen pocos estudios a escala industrial que examinen la co-digestión anaerobia de lodos de PTAS con desechos orgánicos de alimentos. La Tabla 1 compara las principales condiciones operacionales reportadas en los artículos revisados. La operación de los digestores difiere de una planta de tratamiento a otra.

Autores	PTAS*	Co-sustrato	TRS (d)	Temp. (°C)
Koch <i>et al.</i> (2016) [23].	GarchingAlz., Alemania	Residuos de alimentos	40	33
Bolzonella <i>et al.</i> (2006) [24].	Treviso, Italia	FORM	19.8	36.8
Zupancic <i>et al.</i> (2008) [25].	Velenje, Eslovenia	Residuos orgánicos	20	-
Parck <i>et al.</i> , (2011) [13].	Prince George, Canadá	RFV	35 – 40	32
Nghiem <i>et al.</i> , (2017) [26].	Rovereto, Italia	Residuos de alimentos	45	35
	East Bay, EE.UU.	Residuos de comida y grasa	18	35

Tabla 1: Condiciones operativas de digestión anaerobia reportados en los artículos revisados

*PTAS: Planta de tratamiento de aguas residuales; FORM: fracción orgánica de los residuos sólidos municipales; RFV: residuos de frutas y verduras; TRS: Tiempo de retención de sólidos

Autores	Masa de co-sustrato	SST co-sustrato	SSV co-sustrato (% de tss)	Incremento en la VCO (%)	Incremento en yBG (%)	Incremento en Y _{CH4} (%)
Koch <i>et al.</i> (2016) [23].	10% (w/w)	18%	88.4	-	-	18
Bolzonella <i>et al.</i> (2006) [24].	3 t/día	-	76	20	24	-
Zupancic <i>et al.</i> (2008) [25]	1.5 - 3 t/lote	196 g/L	94	33	54	-
Parck <i>et al.</i> (2011) [13].	4,9 t/día	11.4 %	86.2	-	17	-
Nghiem <i>et al.</i> (2017) [26].	10 ton/día	-	12 post-dilución	10	-	-
	40 - 120 t/día	-	-	1.5 - 4.5	-	-

Tabla 2: Estrategias de Co-digestión y sus efectos sobre el rendimiento de la digestión anaerobia

*VCO: Velocidad de carga orgánica (kgVSS/m³d), SST: Sólidos suspendidos totales; SSV: Sólidos suspendidos volátiles; Y_{BG}: rendimiento de biogás (m³/kg); VSS YCH₄: Rendimiento de metano (m³CH₄/ kg VSS).

	DS N°4 /2009 – Chile [27]	Código 40 CFR Parte 503- EE.UU. [28]	Directiva 86/278/CEE Unión Europea [29]
Objetivo	Regular la gestión de los lodos procedentes del tratamiento de las plantas de tratamiento de aguas servidas	Proporcionar normas técnicas para el uso y disposición de lodos derivados del tratamiento de las aguas residuales domésticas	Regular el uso de los lodos de depuradora en los suelos agrícolas
Objeto de protección	Salud humana, medio ambiente y suelos	Salud humana y medio ambiente	Suelo, Flora, Fauna y salud humana
Disposición final	Monorelleno, relleno sanitario y suelos	Monorelleno, incineración y suelos	Monorelleno, rellenos sanitarios, incineración y suelos
Contenido	Clasificación sanitaria de los lodos, requisitos mínimos para su gestión, restricciones, requisitos, condiciones técnicas (concentraciones) para la eliminación de lodos en determinados suelos y una serie de requisitos de tratamiento para reducir la atracción de vectores potenciales y la presencia de patógenos	Límites de contaminantes, prácticas de gestión y normas operacionales para el uso final o la eliminación de los lodos de depuradora. Normas para el destino final de los lodos de depuradora aplicados al suelo o en un incinerador. Tratamientos para reducir los patógenos, requisitos para los lodos aplicados al suelo o en el sitio de disposición final	Requisitos de calidad para el uso de los lodos en la agricultura. Calidad del suelo en el que el lodo será utilizado, limitaciones de la aplicación de lodos con fines determinados y en determinados periodos de tiempo. Rango de concentración de metales pesados en el suelo

Tabla 3: Cuadro comparativo de los reglamentos chilenos, de la Unión Europea y EE.UU.

Sin embargo, los residuos que se utilizaron en todos los estudios fueron similares (una mezcla de desechos de alimentos) y sólo en el estudio realizado por Park *et al.* [13] se utilizaron específicamente residuos de frutas y hortalizas. Todos los estudios revisados fueron realizados en condiciones mesofílicas de 32 - 37 °C y con tiempos de retención de sólidos (TRS) que oscilan entre 18 y 45 días, correspondientes a los parámetros de funcionamiento convencional para la digestión anaerobia en reactores de alta carga [12].

La Tabla 2 muestra algunos de los principales efectos observados sobre las condiciones operacionales y rendimiento de la digestión debido a la adición de un co-sustrato. Zupancic *et al.* [25] realizaron un aumento gradual de la VCO hasta un 25%, mientras que Bolzonella *et al.* [24] realizaron un incremento del 20% y Koch *et al.* [23] un incremento de 30%. En el estudio descrito por

Park *et al.* [13], 12% de SST fueron añadidos (87% volátiles) y se obtuvo un 17% mayor rendimiento de biogás en comparación con el proceso sin co-digestión. Asimismo, Bolzonella *et al.* [24] observaron un aumento del 24% en el rendimiento de biogás utilizando FORM como co-sustrato, mientras Zupancic *et al.* [25] reportaron hasta un 54% mayor rendimiento de biogás debido a co-digestión de lodos de depuradora con residuos orgánicos.

Por lo tanto, en todos los informes las estrategias de co-digestión estudiadas permitieron un aumento en la producción de biogás. Koch *et al.* [23] sugiere que el incremento fue causado por un cambio favorable en la relación C/N en el sustrato debido a la adición de los residuos de alimentos. Bolzonella *et al.* [24] propone que los procesos de co-digestión pueden ser aplicados con éxito en la PTAS existente para mejorar el rendimiento del digestor y

mejorar su balance energético. En ninguno de los estudios revisados se observó un cambio relevante en el pH u otros parámetros físico-químicos dentro de los digestores.

3.4. LEGISLACIÓN RELATIVA A LA GESTIÓN DE LODOS DE DEPURADORA

Actualmente, las PTAS en Chile disponen los lodos estabilizados en rellenos sanitarios o suelos en cumplimiento con las regulaciones vigentes (DS N° 4) [27]. Si el digestato no cumple con las normativas actuales o estas se vuelven más estrictas en el futuro, otras alternativas de disposición final tales como la incineración en hornos de cemento deben ser analizadas.

La Tabla 3 compara las regulaciones vigentes en Chile sobre la gestión de lodos de PTAS con los reglamentos correspondientes de los Estados Unidos (EEUU) y la Unión Europea (UE). En términos de la Directiva Europea 86/278/CEE, existen varios límites de concentración permitida para los países de la CEE. Algunos han adoptado los límites de esta Directiva, mientras que otros han adoptado valores límite más estrictos.

Werle et al. [11] realizaron un estudio sobre las prácticas de manejo en Polonia y encontraron un alto contenido de metales pesados en los lodos de depuración, lo que reduciría la posibilidad de uso agrícola. Por lo tanto, una alternativa de manejo sería utilizar el valor calorífico de los lodos mediante procesos térmicos.

En Chile, el Artículo 4 del DS N°4/2009 define el tratamiento de lodos como "cualquier proceso de tratamiento destinado a modificar las características físicas, químicas y/o biológicas de los lodos, como la estabilización, el saneamiento y la incineración". Aunque el tratamiento por incineración es mencionado, no se define un procedimiento para su implementación. Por otra parte, el DS N°29 del Ministerio de la Secretaría General de la Presidencia proporciona regulaciones acerca de los procesos de incineración, principalmente en términos de estándares de emisión y control.

3.5. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE BIOSÓLIDOS A TRAVÉS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

La aplicación de procesos térmicos permitiría potencialmente la recuperación de energía y la reducción del volumen y peso de los lodos [30]. Algunos de los procesos térmicos utilizados en la gestión de lodos procedentes de PTAS son: la incineración, la pirólisis y la gasificación. La incineración utiliza rangos térmicos desde 500 a 1450 °C (horno de Clinker), resultando en la destrucción del material orgánico, la concentración del material inorgánico, la destrucción térmica de los patógenos, minimización de olores, y la consiguiente recuperación de energía. En efecto, la incineración es uno de los métodos de tratamiento térmico utilizado actualmente para la recuperación de energía a partir de los lodos. El porcentaje de lodo que se incinera varía entre países. Por ejemplo, Dinamarca incinera el 24% de los lodos producidos, Francia 20%, Bélgica un 15%, Alemania 14%, EEUU 25% y en Japón el porcentaje ha alcanzado valores tan altos como 55% [29]. Lamentablemente, los compuestos emitidos a través de este tipo de tecnología incluyen gases contaminantes como los NOx y sustancias que afectan directamente a la salud humana (hidrocarburos halogenados, dioxinas y furanos) debido a que son considerados como mutágenos, carcinógenos y/o agentes que causan alteraciones en el sistema reproductivo, inmunológico y endocrino [31]. Sin embargo, nuevas tecnologías para el control de las emisiones gaseosas pueden minimizar los riesgos [30]. La otra desventaja de la incineración es que la ceniza obtenida de este proceso puede constituir un residuo peligroso, debido a su elevado contenido en metales pesados. Por lo tanto, costos adicionales son necesarios para el manejo de las cenizas. Sin embargo, existen ins-

talaciones de producción de cemento y centrales térmicas de carbón que utilizan lodos de depuradora como combustible alternativo y ceniza como material de construcción [30, 32].

La pirólisis, por otro lado, es un proceso endotérmico donde la descomposición de los materiales se realiza en una atmósfera inerte en ausencia de oxígeno y a una temperatura de 300 a 900 °C [33], lo que resulta en la producción de una fracción líquida, compuesta principalmente de aceites, agua y compuestos orgánicos, y una fracción sólida (coque pirolítico) que incluye sustancias inertes y partículas con un importante contenido de metales pesados [11, 30]. Gases como el hidrógeno, metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono, junto con otros de menor importancia también son producidos. El gas producido a partir de la pirólisis puede ser utilizado como combustible para la calefacción del reactor, mientras que el aceite puede ser utilizado como materia prima para las industrias químicas y también como combustible [33]. La pirólisis a baja temperatura (300 °C) produce un gas que está desprovisto de metales pesados, ya que quedan atrapados en los residuos carbonosos resultantes [30].

La gasificación es el proceso térmico durante el cual el contenido carbonoso de los lodos de PTAS se convierte en gas combustible y cenizas, usualmente en un reactor con un nivel controlado de oxígeno, aire o vapor. La gasificación de lodos de PTAS conduce a un gas inflamable de alta calidad (syngas), compuesto principalmente por hidrógeno, metano y monóxido de carbono y que puede ser utilizado para generar electricidad o calor para procesos como el secado de los lodos. El valor calorífico del gas obtenido tras el proceso de gasificación es de alrededor de 4 MJ m⁻³. Un aspecto importante del proceso de gasificación de lodos es la producción de hidrógeno. Existen muchas aplicaciones y tecnologías para el proceso de gasificación. Por ejemplo, la tecnología Krupp Uhde PreCon® toma el lodo de la PTAS después de la separación de los componentes inorgánicos y metálicos y seca el material triturado a un contenido de humedad del 10% y posteriormente se introduce en el reactor a una temperatura de 700-1.000 °C [30].

3.6. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS POR LAS INDUSTRIAS DEL CEMENTO EN CHILE

Una de las alternativas de valorización y disposición final que puede ser utilizada para los lodos involucra su co-combustión con combustibles tradicionales. El objetivo principal de esta estrategia de valorización energética es el uso de residuos industriales como un sustituto de la energía no renovable. Empresas chilenas de cemento como Cemento Polpaico [34], Cementos Bío-Bío [35] y Cemento Melón [36] utilizan combustibles no-tradicionales para la producción de cemento.

Cemento Polpaico [34], a través de Coactiva, está equipada con una infraestructura y tecnología para recibir, analizar, almacenar y tratar los residuos antes del co-procesamiento en hornos de cemento. Reciben distintos tipos de residuos, clasificados como: líquidos, sólidos, lodos y residuos especiales. Los lodos de depuradora se clasifican como sólidos, bajo el sub-ítem de polvos y granulados. Cemento Polpaico tiene la autorización sanitaria para co-procesar residuos en los hornos de cemento y utilizarla en sus procesos de producción y como sustituto del combustible. La empresa de Cementos Bío-Bío [35], por otro lado, utiliza combustibles sólidos procedentes principalmente de la industria agrícola. Ellos incorporan alrededor de un 9,4% de combustibles alternativos para la fabricación de cemento, y un 17% de combustible alternativo para la producción de cal. La empresa Cemento Melón [36] utiliza un proceso de sustitución de los combustibles fósiles con otras alternativas para el consumo de energía en hornos de clinker (en este caso, la empresa

no menciona específicamente los lodos). Los desechos que pueden ser utilizados como combustibles alternativos son sólidos (por ejemplo, neumáticos viejos, plásticos y textiles) o líquidos (por ejemplo, aceites minerales, disolventes, pinturas, barnices, residuos de hidrocarburos, entre otros). A finales de 2017, la tasa de sustitución térmica para combustibles alternativos en el horno de clinker fue del 15%, y de este porcentaje la mayoría correspondían a la sustitución por combustibles líquidos alternativos. En conjunto, la información anterior muestra que el uso de combustibles no tradicionales por empresas cementeras abre nuevas avenidas para la eliminación de lodos digeridos por la PTAS en Chile.

4. CONCLUSIONES

Este estudio muestra que la co-digestión de residuos orgánicos tales RFV es una alternativa viable para aumentar la producción de biogás en digestores actualmente operativos para el tratamiento de lodos de depuradora. Con respecto a la oportunidad de utilizar los residuos como combustible en plantas de cemento, los resultados indican que existen empresas de cemento en Chile que cada año están aumentando gradualmente el uso de diferentes combustibles no tradicionales. Por lo tanto, el uso de lodos de depuradora debería ser evaluado como una fuente de combustible para las compañías de cemento y como una alternativa de disposición final de los lodos de depuradora, considerando la creciente generación de estos en PTAS.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Corfo por el financiamiento, Proyecto de Ingeniería 2030/ Código 14EN12-26866-ID 15-07.

REFERENCIAS

[1] L Appels, Lauwers Degrève J, J, et al. "La digestión anaerobia en la producción de bioenergía global: el potencial y los desafíos de la investigación". *Renovar mantener la energía*. 2011. Vol.15-9 p.4295-301. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.121

[2] Julio-Guerrero I, Peláez-Jaramillo C, Molina-Perez F. "Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos". *Ion*. 2016. Vol.29-1 p.63-70. DOI: https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005 2016.

[3] Edelmann W, K, Schleiss Joss A. "ecológico, energético y comparación económica de digestión anaerobia con diferentes tecnologías competidoras para tratar residuos biogénicos". *La ciencia y la tecnología del agua*. 2000. Vol. 41-3 p.263-273. DOI:https://doi.org/10.2166/wst.2000.0080

[4] C Gallert, Henning un invierno, J. "escalado de la digestión anaeróbica de los residuos biológicos fracción de residuos domésticos". *Water Research*. 2003. Vol.37-6 p.1433-1441. DOI:https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00537-7

[5] Fricke K, Santen H, Wallmann R. "Comparación de determinados procedimientos aeróbicos y anaeróbicos para MSW tratamiento". *La gestión de los residuos*. 2005. Vol.25-8 p.799-810. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.018

[6] Alatríste-Mondragón F, Samar P, Cox H, et al. "Codigestión anaerobia de municipales, industriales y agrícolas, desechos orgánicos: un estudio de la literatura reciente". *Water Environment Research*. 2006. Vol.78-6 p.607-636. DOI: https://doi.org/10.2175/106143006X111673

[7] Gunaseelan VN. "Metano bioquímica potencial de frutas y hortalizas los feedstocks de residuos sólidos". *Biomasa y bioenergía 2004*; Vol.26 P.389-399. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.006

[8] Lahdheb Bouallagui H, H, E Romdan Ben, et al. "Mejora de las frutas y hortalizas, la digestión anaeróbica de desechos de rendimiento y estabilidad con co-sustratos además". *J. Environ. Administrar*. 2009; Vol.90 p.1844-1849. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.002.

[9] L Appels Degrève Baeyens, J, J, et al. Los principios y las posibilidades de la digestión anaeróbica de los desechos de lodos activados. *Prog. Quemar energía*. *Sci* 2008;34:755-781. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002

[10] Kacprzak M, Neczaj Fijałkowski E, K, et al. "Lodos de estrategias para el desarrollo sostenible". *La investigación sobre el medio ambiente*. de 2017. Vol.156 p.39-46. DOI:https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010

[11] Werle , Wilk R. "una revisión de los métodos para la utilización de los lodos de depuradora térmica: la perspectiva polaca". *Energía renovable*. 2010. Vol.35-9 p.1914-1919. DOI:https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.01.019

[12] Tchobanoglous G, Burton F, D. Stensel Metcalf & Eddy, Inc. - *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento y reutilización*. Cuarto. Nueva York: McGraw-Hill; 2003.

[13] El Parque N, Thring R, Garton R, et al., "el aumento de la producción de biogás

en una planta de tratamiento de aguas residuales por co-digestión anaerobia de residuos de frutas y hortalizas y de lodos de alcantarillado - un estudio a escala completa". *La ciencia y la tecnología del agua*. de 2011. Vol.64-9 p 1851-1856. DOI:https://doi.org/10.2166/wst.2011.753

[14] Zahan Z, Othman M, Rajendram codigestión anaerobia W. " planta municipal de tratamiento de aguas servidas de lodos con residuos alimenticios: un estudio de caso". *Investigación biomédica internacional*. 2016. p.1-13. DOI:http://dx.doi.org/10.1155/2016/8462928

[15] Un Khalid, Arshad M, Anjum M, et al., "La digestión anaeróbica de los residuos orgánicos sólidos". *La gestión de los residuos*. 2011. Vol.31-8 p.1737-1744. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021

[16] P Sosnowski, Wiczorek , Ledakowicz S. "co-digestión anaerobia de los lodos de depuradora y la fracción orgánica de los residuos municipales". *Los avances en la investigación sobre el medio ambiente*. 2003. Vol.7-3 p.609-616. DOI: https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00049-7

[17] Gómez X, Cuetos M, CARA A, et al. "Co-digestión anaerobia de fangos primarios y la fruta y la fracción vegetal de los desechos sólidos municipales: Condiciones para la mezcla y la evaluación de la tasa de carga orgánica". *Las energías renovables*, 2006. Vol.31-12 p.2017-2024. DOI:https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.029

[18] Fountoulakis M, I, Manios Petousi T. "Co-digestión de lodos de depuradora con glicerol para impulsar la producción de biogás". *Los residuos Manag.t* 2010. Vol.30-10 p.1849-1853. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.011

[19] Neves, L, R, Oliveira Alves M. "co-digestión anaerobia de café y los lodos de depuradora". *La gestión de los residuos*, 2006. Vol.26-2 p.176-181. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.022

[20] Davidsson Å Lövestedt C, la Cour Jansen J, et al. "Co-digestión de lodos de trampa de grasa y lodos de depuración". *La gestión de residuos de 2008*. Vol.28-6 p.986-992. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.024

[21] Luostariinen S, Luste Sillanpää S, M. "el aumento de la producción de biogás en plantas de tratamiento de aguas servidas a través de co-digestión de lodos de depuradora con trampa de grasa los lodos procedentes de una planta de procesado de carne". *Bioresource Technology*. 2009. Vol.100-1 p.79-85. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.029

[22] Di Maria F, Sordi, Cirulli G, et al. "La cantidad de energía recuperable a partir de un digestor de lodos existente con la co-digestión de residuos en frutas y verduras reduce el tiempo de retención". *Applied Energy*. 2015. Vol.150 p.9-14. DOI:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.146

[23] Koch Plabst K, M, Schmidt A, et al. "Co-digestión de residuos alimenticios en una planta municipal de tratamiento de aguas residuales: Comparación de las pruebas por lotes y experiencias a escala completa". *La gestión de los residuos*. 2016. Vol. 47 p.28-33. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.022

[24] D Bolzonella Battistoni Susini, P, C, et al. " Codigestión anaerobia de residuos lodos activados y form: Las experiencias de Viareggio y plantas de Treviso (Italia)". *La ciencia y la tecnología del agua* 2006. Vol.53-8 p.203-211. DOI:https://doi.org/10.2166/wst.2006.251

[25] El Sr. Zupancic Uranjek-Zevart G, N, Ros M. "a plena escala de codigestión anaerobia de residuos orgánicos y lodos municipales". *Biomasa y bioenergía*. 2008. Vol.32-2 p.162-167. DOI:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.07.006

[26] Nghiem LD, Koch Bolzonella K, D, et al. Escala completa co-digestión de lodos de aguas residuales y desechos de alimentos : Los cuellos de botella y posibilidades. *Renovar. Sostener. Energía Rev*. 2017 Vol.72 P.354-362. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.062.

[27] el Reglamento para el manejo de lodos generados en pantas de tratamiento de aguas servidas. Ministerio Secretaría General de la presidencia. 2009. Disponible en Internet: <URL://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1007456>

[28] Código Electrónico de Reglamentos Federales, parte 503-estándar para el uso y eliminación de lodos sweage. Disponible en internet: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr503_main_02.tpl

[29] Informe de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones. Disponible en Internet: <URL: //Eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52013D0006>

[30] Samolada Zabaniotou M, A. "evaluación comparativa de la incineración de lodos de aguas residuales municipales, gasificación y pirólisis de lodo para un desarrollo sostenible de la gestión de la energía en Grecia". *La gestión de los residuos*. 2014. Vol.34-2 p.411-20. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.003

[31] T Murakami, Suzuki y Nagasawa, H, et al. "Las características de combustión de lodos de depuradora en una planta de incineración para recuperación de energía". *Tecnología de procesamiento de combustible*. 2009. Vol.90-6 p.778-783. DOI:https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.03.003

[32] Cyr Coutand M, M, P. Clastres "Tecnológico y el comportamiento ambiental de los lodos de depuradora en cenizas (SSA) en materiales a base de cemento". *Cemento y Concreto de Investigación*, 2007. Vol.37-8 p.1278-1289. DOI:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.003

[33] A. Zabaniotou Fytilli D, "la utilización de lodos de depuradora en la UE la aplicación de viejos y nuevos métodos -un examen". *Energía renovable y sostenible comentarios*. de 2008. Vol.12-1 p.116-140. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.014

[34] Informe de desarrollo sustentable de la empresa Cementos Polpaico. Disponible en Internet: <www.polpaico.cl>

[35] Informe de desarrollo sustentable de la Empresa de Cementos Bio-Bio. Reportes y documentos. Disponible en Internet:<www.cementosbiobio.cl>

[36] Informe de desarrollo sustentable de la Empresa de Cementos Melón. Sostenibilidad. 11/09/2017. Disponible en internet:<www.melón.cl>