

ESTUDIOS TÉRMICOS PRELIMINARES DE LODOS PRIMARIOS PROVENIENTES DE ACUICULTURA EN RECIRCULACIÓN

PRELIMINARY THERMAL STUDIES OF PRIMARY SLUDGES FROM RECIRCULATING AQUACULTURE

Yemall Alexander Maigual Enriquez., Amanda Alves Domingos Maia, Camilo Lenin
Guerrero Romero, Tsunao Matsumoto, Leandro Cardoso de Morais

Instituto de Ciencia y Tecnología – Departamento de Ingeniería Ambiental - Universidade Estadual Paulista, UNESP, Sorocaba, Brasil

Departamento de Recursos Hidrobiológicos – Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia

Departamento de Ingeniería Civil - Universidade Estadual Paulista, UNESP, Ilha Solteira, Brasil

RESUMEN

Los sistemas de recirculación para acuicultura han sido utilizados con el fin de disminuir la cantidad de residuos sólidos durante la producción. Sin embargo, son generadas cantidades de lodos tanto primarios como biológicos que deben recibir una adecuada disposición. Los lodos primarios por tener más cantidad de compuestos orgánicos pueden servir como una fuente alternativa de energía. Fueron realizados estudios de termogravimetría (curvas TG e DTG), energía de activación (E_a) y poder calorífico de dos lodos primarios de sistema de recirculación para tilapia nilótica y trucha arcoíris. Los dos lodos presentaron pérdida de agua hasta los 150°C y hasta 525°C casi la totalidad de material orgánico fue incinerado dejando únicamente la fracción inorgánica que aparece después de 600°C. Valores de E_a fueron mejores para el lodo primario seco de tilapia (LPSTil) comparado con el lodo primario seco de trucha (LPSTru) siendo aproximadamente el 58% y 64% para los modelos cinéticos de Ozawa-Flynn-Wall (OFW) y Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) respectivamente, siendo que LPSTil tiene características mejores para generar calor en caso de ser escogido como fuente alternativa de energía debido a su menor E_a . El poder calorífico de los lodos tanto para LPSTil y LPSTru es de 14,91 MJ/kg y 18,16 MJ/kg, parecido con los valores de biomásas ampliamente utilizadas como los restos de maderas y los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs), ambos con posibilidades de uso pero con restricciones para LPSTru por la grande cantidad de energía que se necesitaría para que este material genere calor que pueda ser utilizado inclusive dentro de la misma unidad productiva.

Palabras Clave: Ciclo Cerrado, Energía Alternativa, Lodo Bruto, Piscicultura, Combustible

Keyword: Closed Cycle, Alternative Energy, raw sludge, fish farming, Fuel

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de recirculación para acuicultura o SRA son sistemas de cultivo cerrados representando alternativas compactas para cultivo intensivo de especies (en altas densidades de siembra), diseñadas y adoptadas para minimizar la cantidad de agua utilizada, necesitando menos de 10% del agua y una proporción menor de terreno si comparados con otros sistemas para producir la misma cantidad de organismos, siendo necesario la reducción del costo de producción y tratamiento de sus efluentes (Lekang 2013; Van Rijn 2013).

Son sistemas de tanques con flujo libre de agua, compuesto por: tanque para cultivo, sistema para remoción de sólidos, filtro biológico, sistema de aeración, bombas, sistema

de distribución de agua e sistema de drenaje. Una pequeña porcentaje de agua es renovada diariamente (evaporación) entre 5 y 10% del volumen total del sistema (Timmons 2002; Van Rijn 2013).

Los lodos de piscicultura (material fecal de los peces + restos de alimento) se generan diariamente y habitualmente requiere ser sedimentados para su posterior extracción. Normalmente tienen muy altos contenidos de agua, con bajos niveles de materia seca, variable entre <1% hasta 12%, siendo más habituales los valores bajo 1% .

Los peces se alimentan en general en base a pellets de concentrados. Los pellets no consumidos, muy ricos en proteína y grasas, aportan especialmente nitrógeno, entre otros nutrientes (Timmons et al 2002).

La mayor proporción de nitrógeno disuelto se produce por pérdidas de amoníaco vía branquial. El fósforo proviene mayoritariamente de las fracciones sólidas (heces o fecas de los

peces), que provienen del proceso digestivo del pez (Lekang 2013).

En algunas situaciones, los lodos secos en lugares destinados para tal fin. Pueden encontrarse niveles de hierro elevados, que podrían limitar su uso en actividades agrícolas. Otros compuestos que se utilizan en los procesos deben ser analizados adecuadamente, como es el caso de antibióticos, cal, sal y otros. Asimismo, es necesario chequear presencia de eventuales patógenos (Ebeling & Timmons 2012).

Los residuos sólidos (ej. partículas de ración no consumida, heces y flocs del reactor biológico) deben ser rápidamente removidos del agua, es el proceso unitario más importante en SRA, porque tales partículas orgánicas comprometen la función de las branquias, propiciar un sustrato para el crecimiento de organismos patógenos y aquellos que competirán con las bacterias encargadas de la filtración biológica del efluente, contribuir al aumento de la DBO (Summerfelt & Penne 2005).

Segundo Timmons *et al* (2002), los sólidos en suspensión generados en SRA son originados con el alimento artificial suministrado. Manifestado de dos formas: a) alimento no consumido, y b) heces y flocs biológicos. Regularmente, puede ser adoptado que los sólidos suspensos totales o SST producidos corresponden a un 25% de la ración ofrecida en base seca. Adicionalmente, las concentraciones de SST en los SRA están en el intervalo de 10mg/L hasta 30mg/L (Timmons et al 2002)

Desde la perspectiva del control de sólidos, las características físicas más importantes de los SST en un SRA son la gravedad específica y distribución del tamaño de las partículas. La gravedad específica es determinada por la fuente de las partículas, y la distribución del tamaño por la combinación de factores que como el proceso de remoción de sólidos, fuente de las partículas, tamaño de los animales, temperatura del agua y turbulencia del sistema (Timmons et al 2002).

El valor medio de densidad da partícula mojada/densidad del agua, conocida como densidad aparente - (ρ_s) del material granular SRA es 1,19. Valores recomendables de ρ_s para heces de tilapia e 1,05 y para trucha de 1,005 (Timmons et al 2002).

Una vez suministrado el alimento artificial y este no ser consumido, da inicio a un proceso de desagregación; no en tanto, después de horas de permanencia en el agua y paso a través de las bombas, 97% de las partículas conservan tamaños mayores que 60 μ m y 73% mayores de 500 μ m. En SRA, el 90% de la masa de partículas totales son compuestos de partículas menores a 30 μ m (Timmons et al 2002).

Mecanismos de remoción dos sólidos

En SRA tres son los métodos utilizados en la remoción de los SS e sedimentables (Timmons et al 2002):

Separación por gravedad. Basado en el principio de sedimentación e velocidades de decantación.

- **Remoción por filtración.** Por medio de uno o varios de los mecanismos relacionados con la filtración: sedimentación, colado, movimiento Browniano e interceptación.

- **Remoción por flotación.** Las partículas son adheridas a las burbujas de aire y son separadas del agua. El proceso de flotación participan los procesos de sedimentación, difusión de Brown e interceptación.

Las técnicas de remoción de sólidos más utilizadas nos SRA son: tamices estáticos, tanques de sedimentación, decantadores de alta tasa por medio de placas o tubos, filtros de micro tamices, filtros de tambor rotativo, hidrociclones, filtros granulares de flujo descendente, filtros de medio granular presurizados, fraccionadores por espuma (sistemas de flotación) (Ebeling & Timmons 2012; Summerfelt & Vinci 2008; Lekang 2013).

Análisis térmico

Un conjunto de técnicas de análisis térmica estudian los cambios de las propiedades físicas y/o químicas de una sustancia o material (p.ej lodos, restos de podas), en función de la temperatura o del tiempo en cuanto el analito es sometido a una programación controlada de temperatura (Maia & Morais 2016; Li et al. 2011; Li et al. 2015).

El método termogravimétrico de determinación de los parámetros cinéticos consiste en incinerar una muestra de materia en un horno con temperatura (o tasa de calentamiento) controlada, midiéndose la pérdida de masa de esta muestra con una balanza de precisión acoplada al horno. La curva TG posibilita verificar la pérdida de masa de la muestra en función de la temperatura al tiempo que esta es calentada a una tasa de calentamiento conocida. La curva DTG posibilita verificar la tasa en que es perdida la masa a medida que la temperatura aumenta, y son bastante útiles para identificar el número de etapas que ocurren en las reacciones por el número de picos DTG observados (Magdziarz & Werle 2014; Magdziarz & Wilk 2013; Otero et al. 2008).

Análisis en atmosfera oxidante (aire) simula lo que sucede en el proceso de incineración, donde, a medida que gases combustibles son liberados en etapas iniciales de pirolisis y/o volatilización, estos mismos sufren combustión, acelerando el proceso de degradación de los demás productos orgánicos e inorgánicos presentes. La ventaja de esta técnica son entre otras su rápida evaluación del valor de poder de combustión y/o pirolisis, temperatura inicial y final del proceso, cantidad de cenizas y tiempo total del evento térmico (Magdziarz & Werle 2014; Gašparovič et al. 2011)

La utilización de biomasa con humedad superior al 65% no es viable, porque gran cantidad de energía será utilizada simplemente para evaporar agua. Puede ser seca naturalmente por incidencia de la radiación solar para después ser seca propiamente dicha. También el control de la homogeneidad de las partículas hace que la velocidad de reacción del proceso termoquímico sea estable verificándose en la eficiencia del proceso. Adensar es otra técnica importante para aumentar la densidad de la biomasa, para obtener mayores cantidades de energía por unidad de volumen (Cortez, Lora e Gómez, 2008).

Energía de activación (E_a)

Es la energía mínima que la materia a ser evaluada necesita para que inicie la reacción química. Esta energía mínima es necesaria para la formación del complejo activado. Cuanto mayor es el valor de E_a más lenta es la reacción porque la dificultad para que tal reacción ocurra es mayor. Con una E_a menor la barrera de energía, más colisiones efectivas y por tanto la reacción es más rápida. Entre los diversos métodos matemáticos utilizados para esta finalidad están Ozawa-Flynn-Wall (OFW) utilizando aproximación

de Boyle y Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) utilizando la aproximación de Coats-Redfer (Ceylan & Topçu 2014; Balogun et al. 2014).

Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor producido por su combustión a presión constante y bajo " condiciones 'normales' (es decir, a 25 ° C y bajo una presión de 1 atm). El proceso de combustión genera agua. (Otero et al. 2007; Demirel 2012)

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio térmico preliminar de los lodos generados en sistemas de producción acuícola de ciclo cerrado con posibilidades de reutilización.

OBJETIVOS

Obtener a través de técnicas de termogravimetría las curvas TG e DTG de los lodos primarios secos de dos sistemas de recirculación para acuicultura

Calcular energía de activación por los métodos de Ozawa-Flynn-Wall y Kissinger-Akahira-Sunose de los lodos primarios generados en dos sistemas de recirculación

Determinar el poder calorífico de los lodos primarios secos de dos sistemas de recirculación para acuicultura

MATERIAL E MÉTODOS

Los análisis de laboratorio de análisis térmica y poder calorífico fueron realizados en el laboratorio de bionería y tratamiento de efluentes del e de Água e Solos da UNESP Sorocaba, São Paulo (Brasil).

Los lodos fueron generados en dos SRA con tilapia nilótica (SRA-Til) (Laboratorio de Hidrología e Hidrometría, UNESP Ilha Solteira) y trucha arcoíris (SRA-Tru) (Laboratorio sistemas de recirculación, UDENAR, San Juan de Pasto). **Condiciones de cultivo.** SRA-Til abastecido por la red pública de agua, alimentada con ración comercial (30%), tasa de alimentación de 1,2% de la biomasa, densidad de cultivo aproximada de 17 kg.m⁻³, peso inicial aproximado 0,34 Kg. La colecta de LP de DCF_{AS} del SRA-Til de fue realizado por abertura de válvula tipo bola de 1".

SRA-Tru abastecido por la red pública de agua, alimentado con ración comercial (40%), tasa de alimentación de 1,0% de la biomasa, densidad de cultivo aproximada de 1,08 kg.m⁻³, peso inicial aproximado 0,0118 Kg. La colecta de LP fue realizada decantador convencional de flujo horizontal de sección rectangular por efecto sifón.

Del total de lodos obtenidos, fueron mezclados y separados aproximadamente 300ml. LP fue colocado recipiente de porcelana, posteriormente seco en estufa con circulación de aire a temperatura de 105°C hasta masa constante (aproximadamente 24 horas). El lodo primario seco (LPS), fue molido y las muestras fueron tamizadas (ASTM/ABNT n° 100). El material que paso por el tamiz fue colocado en bolsas plásticas y almacenado en lugar seco y oscuro para su posterior análisis.

Análisis térmico

Para el análisis del LPS de tilapia (LPSTil) y LPS de trucha (LPSTru) se fueron necesarios aproximadamente 1,50 mg de muestra, colocadas sobre un crisol de alúmina dentro del analizador térmico simultáneo SDTQ600 TGA-DSC para calcinación en atmósfera de aire, flujo de 100 mL.min⁻¹ a diferentes tasas de calentamiento constante de 7,5°C.min⁻¹, 10°C.min⁻¹ y 15°C.min⁻¹ desde temperatura ambiente de 25°C até 700°C. El "software" utilizado para la obtención de las curvas TG/DTG/ fue TA Instruments-Universal Analysis 2000 v.4.5A.

Energía de activación

Fueron utilizados los métodos de OFW y KAS que se describen a continuación

Método Ozawa Flynn Wall o OFW

Se aplicó el método cinético isoconversional a través de la ecuación 1 (Kim et al. 2010; Doyle 1962).

$$\ln(\beta) = C_{\alpha} - \frac{E_a}{R.T} \quad (1)$$

Donde β tasa de calentamiento; E_a energía de activación aparente; C_{α} función del grado de conversión α ; R constante universal de los gases 8.31 J/K mol⁻¹; T Temperatura absoluta (K).

Método Kissinger-Akahira-Sunose o KAS

Método isoconversional basado en la ecuación 2 (Coats AW 1964; Vyazovkin & Wight 1999).

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AE_a}{g(\alpha)R}\right) - \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

Donde E_a y A son energía de activación y factor pre-exponencial a un grado de conversión preestablecidos α , y una temperatura T donde se encuentra α a una tasa de calentamiento β . (Leroy et al. 2010).

Poder Calorífico

El poder calorífico de los LPSs fue calculado a través de bomba calorimétrica modelo IKA C-200, 1,0 g, con oxígeno 99,5% de pureza del laboratorio de Bioenergía de la Universidad Federal de Sao Carlos campus de Sorocaba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis térmico

Las curvas TG e DTG son presentadas en las Figuras 1 y 2

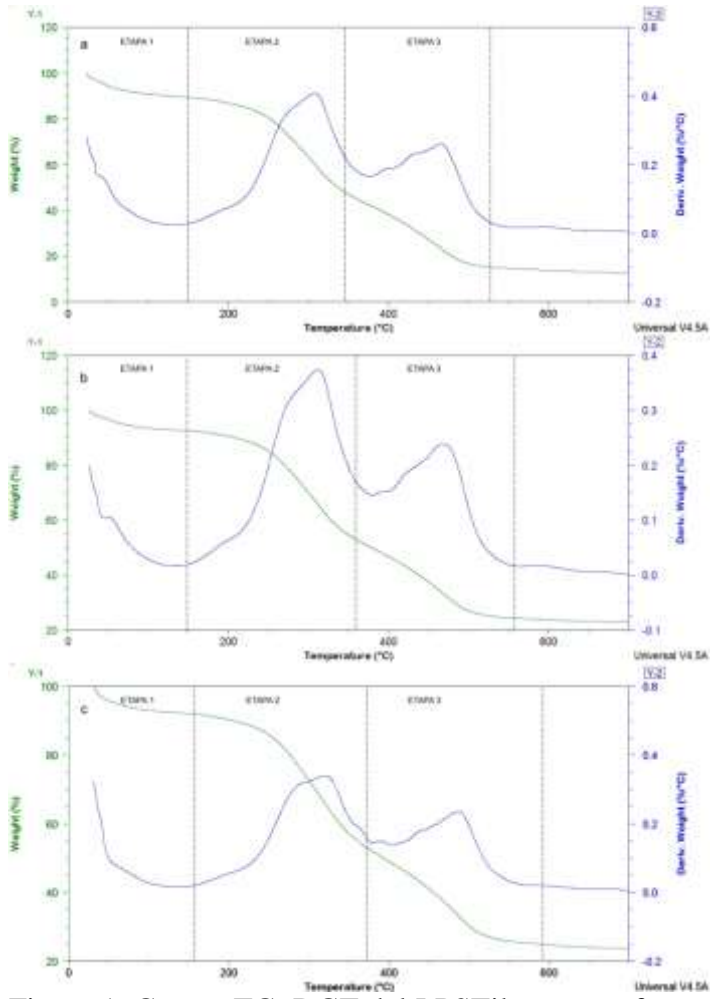


Figura 1. Curvas TG, DGT del LPSTil en atmosfera oxidante con tasa de calentamiento de 7,5, 10 e 15°C/min

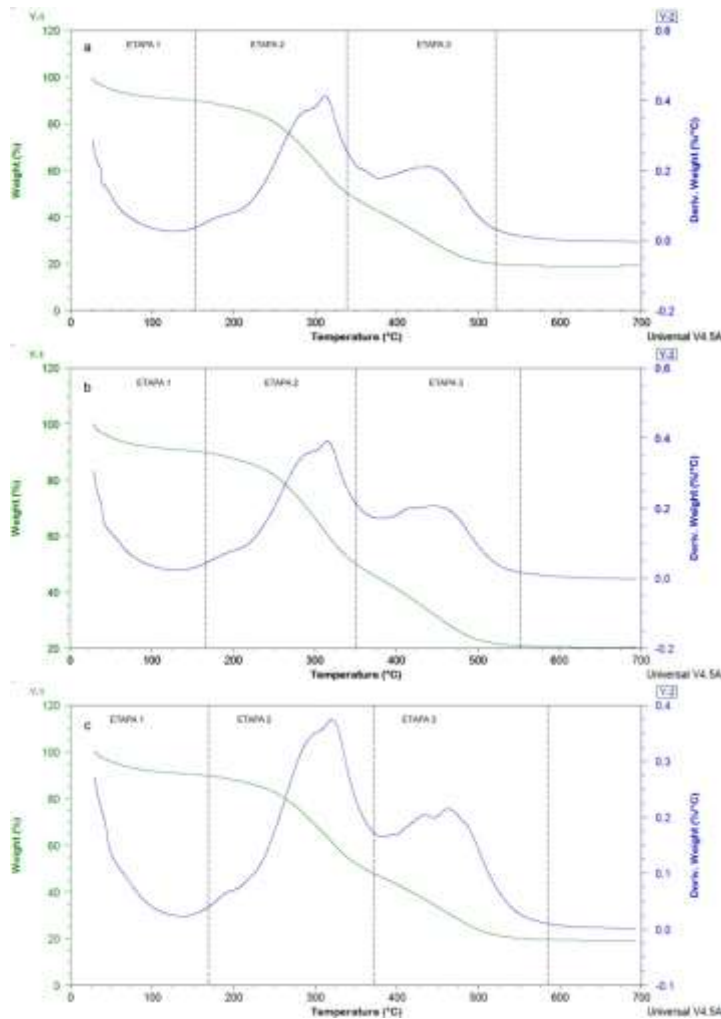


Figura 2. Curvas TG, DGT del LPSTru en atmosfera oxidante con tasa de calentamiento de 7,5, 10 e 15°C/min

La curva termogravimétrica (TG) da Figura 1 y2 en atmosfera de oxidante existe pérdida de masa relativa ligada a la humedad residual físicamente ligada que aun contienen los lodos secos hasta 150°C y compuestos volátiles de bajo peso molecular, etapa 1 (Pavlíkov et al. 2016; Hu et al. 2015). Las mayores pérdidas de masa se presentan a aproximadamente 330°C siendo evidente por la aparición de un pico en la curva DTG y etapa que va desde los 250°C hasta 360°C verificados en la curva TG. La degradación de materia orgánica (proteínas, carbohidratos y lípidos) produce alta liberación de calor por la quema de estos componentes. y seguido a este evento existe otra pérdida de masa en aproximadamente 480°C en estas podrían estar siendo degradados los residuos de ácidos grasos monoinsaturados comúnmente encontrados en acuicultura. Amonio y células bacterianas muertas también presentes en estos lodos presentan degradación entre 360°C hasta 525°C. Las mayores pérdidas de masa en el caso de los lodos, como comportamiento parecido a otros residuos como las de maderas se produce entre 250°C and 550°C caracterizados por tener una gran posibilidad de ser utilizados para bioenergía (Liu et al. 2013; Francioso et al. 2010; Unger & Brinker 2013; Mirzoyan et al. 2010; Tian et al. 2002; Alvarez et al. 2015).

Los lodos inician a tener una pérdida de masa constante a partir de los 540°C, teniendo menores variaciones cuando alcanzan una temperatura de 600°C donde la muestra presenta mayoritariamente compuestos inorgánicos como los carbonatos y como se trata de SRA con tratamiento biológico, es importante la participación de estos en los procesos

de nitrificación y desnitrificación para la síntesis celular (Lekang 2013; Gray 2010; Metcalf-Eddy et al. 2013; Magdziarz & Werle 2014) .

El desplazamiento hacia la derecha como que aumenta la tasa de calentamiento es debido al diferente comportamiento de las partículas en la degradación térmica de la muestra. La transferencia de calor y la cinética de descomposición era diferente que resulta en una degradación retardada de la biomasa (Williams & Besler 1996; Seo et al. 2010; Seo et al. 2011).

Valores de cenizas de aproximadamente 20% para los dos lodos, sugieren que podría mejorarse las unidades de tratamiento primario para disminuir tales cantidades y mejorar la calidad de este material granular.

Estudio cinético

En la tabla 1 y figura 3 son presentados los resultados de E_a para LPSTil y LPSTru

Tabla 1. Comparación de los modelos OFW y KAS de lodos para el cálculo de E_a

Grado de conversión (α)	OFW-TRU E_a (kJ/mol)	OFW-TIL	KAS-TRU	KAS-TIL
30	113,70	47,18	101,64	34,79
35	105,40	43,65	93,74	31,72
40	98,64	38,95	87,40	27,43
45	89,91	34,20	79,13	23,15
50	110,71	37,78	100,36	27,22
55	122,96	50,26	112,94	40,08
60	152,02	64,54	142,22	54,64
65	144,69	69,04	135,10	59,38
70	153,24	69,04	143,88	59,60
75	163,55	67,59	154,43	58,40
80	132,23	61,64	123,42	52,72
85	106,63	37,20	98,33	28,71
90	66,42	10,29	59,28	16,14
95	68,16	21,61	62,76	3,01

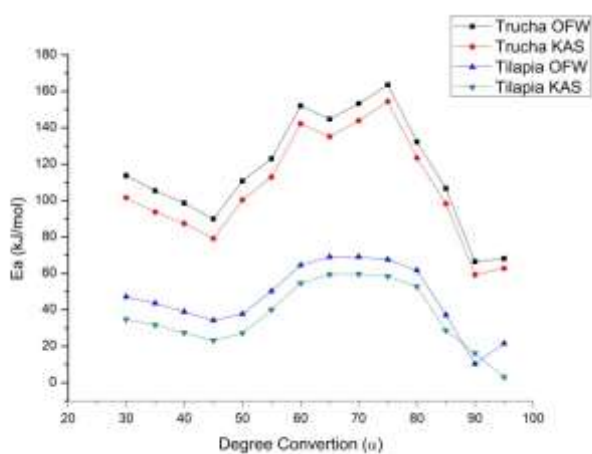


Figura 3. Modelos cinéticos de OFW y KAS para el cálculo de E_a en LPS

Se puede observar que los dos métodos ofrecen para la misma muestra un ajuste pudiendo ser utilizado para calcular E_a de este tipo de materiales particulados. Por otro lado los valores de E_a para LPSTil y LPSTru son diferentes. Tal comportamiento podría ser influenciado por la diferencia en la composición de las raciones. Tanto tilapia como trucha tienen requerimientos nutricionales diferenciándose por sus hábitos alimenticios omnívoro y carnívoro, tanto así que las heces de la tilapia presentan una envoltura de carbohidratos en tanto que los desechos metabólicos sólidos de la trucha no la presentan. Materiales como los LPS, con valores de E_a bajas necesitan menor cantidad de energía para ser activados, para desencadenar una reacción de liberación de calor. El LPSTil tiene E_a más bajas siendo un 58% y 64% según OFW y KAS respectivamente entre los α 30% y 80% en comparación a LPSTru.

Comparada con otros materiales hay similitudes. Estudios realizados con diferentes biomásas reportan valores de E_a entre 30 y 150 kJ/mol, para biomásas tan variadas como residuos de ajo, madera, lodo de estaciones de tratamiento de aguas residuales (ETARs) (Maia & Morais 2016; Otero et al. 2007; Biagini et al. 2002) en los valores de E_a como lo reportado por

Poder Calorífico

Los valores medios de poder calorífico del LPTil y LPTru fueron de 14,91 MJ/kg 18,16 MJ/kg. Residuos como la madera tienen valores próximos de 20 - 27 MJ/kg, algas de estaciones de ETARs de 28MJ/kg o lodo de ETARs entre 0,6 – 31 MJ/kg (Gašparović et al. 2012; Liu et al. 2013; Chen et al. 2014; Morais 2006). Con tales valores no podría ser descartado como una posible fuente de energía alternativa que lograría ser mejorada con un pre-tratamiento adecuado.

Los elementos combustibles de los lodos son carbono, azufre e hidrogeno, que existen como forma de lípidos, carbohidratos y proteínas (Luduvic y Fernandes 2001).

CONCLUSIONES

Tanto LPSTil y LPSTul presentan agua retenida en su interior que es liberada a aproximadamente 150°C, seguida de sustancias como proteínas, lípidos, carbohidratos hasta unos 525°C, teniendo después la presencia de sustancias inorgánicas que irán a constituir las cenizas de los lodos.

Presentan grande diferencia entre los valores de E_a , dando cierta ventaja al LPSTil que presenta valores más bajos, por lo tanto este material podría generar energía si alcanzar temperaturas menores con diferencias entre el 58% y 64% dependiendo del modelo cinético utilizado.

En cuanto al poder calorífico el LPSTru presenta mejores valores respecto a LPSTil con diferencia aproximada de 3 MJ/kg, siendo que su uso podría estar limitado por sus valores altos de E_a .

AGRADECIMIENTOS

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior - CAPES por la beca de doctorado concedida.

A CNPq, FAPESP por el apoyo financiero. Al ICT – UNESP, Sorocaba por el apoyo técnico FEIS – UNESP y UFSCar - Sorocaba por el apoyo técnico e infraestructura.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, J. et al., 2015. Sewage sludge valorization by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*, 273, pp.173–183. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.047>.

Balogun, A.O., Lasode, O.A. & McDonald, A.G., 2014. Devolatilisation kinetics and

- pyrolytic analyses of *Tectona grandis* (teak). *Bioresource Technology*, 156, pp.57–62. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.007>.
- Biagini, E. et al., 2002. Devolatilization rate of biomasses and coal-biomass blends: An experimental investigation. *Fuel*, 81(8), pp.1041–1050.
- Ceylan, S. & Topçu, Y., 2014. Pyrolysis kinetics of hazelnut husk using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 156, pp.182–188. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.040>.
- Chen, W.T. et al., 2014. Physical pretreatments of wastewater algae to reduce ash content and improve thermal decomposition characteristics. *Bioresource Technology*, 169, pp.816–820. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.076>.
- Coats AW, R.J., 1964. Kinetic parameters from thermogravimetric data. *Nature*, 201, pp.68–69.
- Cortez, L.A.B., Lora, E.E.S., Gómez, E.O., 2008. *Biomassa para energia*. Editora Unicamp: Campinas.
- Demirel, Y., 2012. *Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling* 2nd ed., London: Springer-Verlag.
- Doyle, C.D., 1962. Estimating isothermal life from thermogravimetric data. *Journal of Applied Polymer Science*, 6(24), pp.639–642.
- Ebeling, J.M. & Timmons, M.B., 2012. Recirculating Aquaculture Systems. In J. H. Tidwell, ed. *Aquaculture Production Systems*. Oxford: John Wiley & Sons, Inc, pp. 245–277.
- Francioso, O. et al., 2010. Chemical characterization of municipal wastewater sludges produced by two-phase anaerobic digestion for biogas production. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1–3), pp.740–746.
- Gašparovič, L. et al., 2011. Kinetic study of pyrolysis of waste water treatment plant sludge. *Chemical Papers*, 65(2), pp.139–146.
- Gašparovič, L., Labovský, J. & Markoš, J., 2012. Calculation of Kinetic Parameters of the Thermal Decomposition of Wood by Distributed Activation Energy Model (DAEM). , 26(1), pp.45–53.
- Gray, N.F., 2010. Physico-chemical Treatment Processes. In *Water Technology*. Elsevier, pp. 605–644. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856177054000071>.
- Hu, M. et al., 2015. Thermogravimetric study on pyrolysis kinetics of *Chlorella pyrenoidosa* and bloom-forming cyanobacteria. *Bioresource Technology*, 177, pp.41–50. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.061>.
- Kim, Y.S., Kim, Y.S. & Kim, S.H., 2010. Investigation of thermodynamic parameters in the thermal decomposition of plastic waste-waste lube oil compounds. *Environmental Science and Technology*, 44(13), pp.5313–5317.
- Lekang, O.I., 2013. *Aquaculture Engineering* 2nd ed. WILEY-BLACKWELL, ed., Oxford: WILEY-BLACKWELL.
- Leroy, V. et al., 2010. Kinetic study of forest fuels by TGA: Model-free kinetic approach for the prediction of phenomena. *Thermochimica Acta*, 497(1–2), pp.1–6.
- Li, M. et al., 2015. Consequences of sludge composition on combustion performance derived from thermogravimetry analysis. *Waste Management*, 35, pp.141–147. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.004>.
- Li, X.G. et al., 2011. Thermogravimetric investigation on co-combustion characteristics of tobacco residue and high-ash anthracite coal. *Bioresource Technology*, 102, pp.9783–9787.
- Liu, H.M. et al., 2013. Understanding the mechanism of cypress liquefaction in hot-compressed water through characterization of solid residues. *Energies*, 6(3), pp.1590–

1603.

Luduvic, M.; Fernandes, F. 2001 *Principais tipos de transformação e descarte do lodo*. En: Von Sperling, M.; Andreoli, C. V.; Fernandes, F. (ed.) *Lodo de esgoto: tratamento e disposição final*. DESA-UFMG: Belo Horizonte.

Magdziarz, A. & Werle, S., 2014. Analysis of the combustion and pyrolysis of dried sewage sludge by TGA and MS. *Waste Management*, 34(1), pp.174–179. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.033>.

Magdziarz, A. & Wilk, M., 2013. Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion. *Energy Conversion and Management*, 75, pp.425–430. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.016>.

Maia, A.A.D. & Morais, L.C. De, 2016. Kinetic parameters of red pepper waste as biomass to solid biofuel. *Bioresource Technology*, 204, pp.157–163.

Metcalf-Eddy et al., 2013. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* fifth. I. Metcalf & Eddy, ed., Mc Graw Hill.

Mirzoyan, N., Tal, Y. & Gross, A., 2010. Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture systems: Review. *Aquaculture*, 306(1–4), pp.1–6. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.05.028>.

Morais, L.C. de, 2006. *Caracterização, em escala de laboratório, do produto proveniente da calcinação do lodo de esgoto resultante do tratamento de águas residuárias*. Universidade de São Paulo.

Otero, M. et al., 2008. Co-combustion of different sewage sludge and coal: A non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis. , 99, pp.6311–6319.

Otero, M. et al., 2007. Effects of sewage sludge blending on the coal combustion: A thermogravimetric assessment. *Chemosphere*, 69(11), pp.1740–1750.

Pavlíkov, M. et al., 2016. Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements. , 112, pp.409–419.

Van Rijn, J., 2013. Waste treatment in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 53, pp.49–56. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010>.

Seo, D.K. et al., 2011. Study of coal pyrolysis by thermo-gravimetric analysis (TGA) and concentration measurements of the evolved species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 92(1), pp.209–216. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2010.05.008>.

Seo, D.K. et al., 2010. Study of the pyrolysis of biomass using thermo-gravimetric analysis (TGA) and concentration measurements of the evolved species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(1), pp.66–73. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2010.05.008>.

Summerfelt, R.C. & Penne, C.R., 2005. Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. *Aquacultural Engineering*, 33(3), pp.214–224.

Summerfelt, S.T. & Vinci, B.J., 2008. *Better Management Practices for Recirculating Aquaculture Systems*,

Tian, F. et al., 2002. Formation of NO_x precursors during the pyrolysis of coal and biomass. Part V. Pyrolysis of a sewage sludge. *Fuel*, 81, pp.2203–2208.

Timmons, M., Ebeling, J., Wheaton, F., Summerfelt, S., Vinci B., 2002. *Sistemas de recirculación para la acuicultura*. Fundación Chile: Chile

Unger, J. & Brinker, A., 2013. Floating feces: A new approach for efficient removal of solids in aquacultural management. *Aquaculture*, 404–405, pp.85–94. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.04.015>.

Vyazovkin, S. & Wight, C.A., 1999. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochimica Acta*, 340, pp.53–68.

Williams, P.T. & Besler, S., 1996. The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. *Renewable Energy*, 7(3), pp.233–250. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148196000067>.