

# COMPOSTOS OBTIDOS COM A PIRÓLISE RÁPIDA DE LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO E POSSÍVEIS APLICAÇÕES

S. T. S. VERAS<sup>1</sup>, I. A. T. A. RIBEIRO<sup>2</sup>, J. C. NERIS<sup>1</sup> e J. G. A. PACHECO FILHO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Química

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Biológicas

E-mail para contato: shyrlane\_veras@hotmail.com

**RESUMO** – Existem várias técnicas para o aproveitamento do lodo de esgoto, embora nem todas permitam um uso adequado deste resíduo e/ou apresentam limitações. Como o lodo de esgoto possui grande quantidade de matéria orgânica em sua composição, ele pode ser utilizado como fonte de energia ou como matéria-prima na obtenção de novos produtos. O foco deste trabalho foi analisar os principais compostos obtidos com a micropirólise rápida de lodo anaeróbio a 450 °C, 600 °C e 750 °C, comparando com os produtos pirolíticos reportados na literatura. As pirólises do lodo de esgoto geraram compostos como hidrocarbonetos, alcoóis, cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos, nitrilas, fenóis, aromáticos nitrogenados e, em menor quantidade, amidas, ésteres, éteres e aminas. Estes compostos podem ser convertidos em hidrocarbonetos e destinados para biocombustíveis como é o caso dos alcoóis, éteres e ésteres, ou podem ser removidos e aplicados na fabricação de novos produtos como fármacos, solventes, resinas, entre outros.

## 1. INTRODUÇÃO

Entre as alternativas emergentes para o aproveitamento de resíduos orgânicos, a pirólise tem atraído atenção por fornecer a possibilidade de otimizar as condições do processo visando a obtenção de produtos desejados (DOMÍNGUEZ *et al.*, 2008). A pirólise do lodo de esgoto fornece uma mistura de compostos que normalmente são identificados através da cromatografia gasosa associada à espectroscopia de massa (GC/MS). Como o lodo é constituído principalmente de materiais orgânicos não-digeridos (ex. celulose), compostos inorgânicos e constituintes microbiológicos (proteínas, carboidratos, lipídeos e ácidos nucleicos), sua degradação térmica permite a obtenção de produtos como: hidrocarbonetos (alifáticos e aromáticos), compostos fenólicos, ácidos carboxílicos, nitrilas, aminas, cetonas, alcoóis, aldeídos, ésteres e éteres (SANCHEZ *et al.*, 2009; TSAI *et al.*, 2009).

A pirólise é um processo endotérmico e de posse da matéria orgânica contida no material juntamente com a energia inicial requerida, fornece três frações de produtos: gasosa, líquida e sólida. Zhang *et al.* (2011) mostraram que a parte gasosa é composta principalmente por: H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e, em menor quantidade, hidrocarbonetos leves (C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>), os quais são destinados a produção de calor e geração de energia. De acordo com Sánchez *et al.* (2009), esses gases também podem ser aplicados para produzir energia no próprio processo ou promover a secagem de matérias-primas. A produção de

hidrogênio é destacada em alguns estudos assim como sua produção associada ao monóxido de carbono na forma de gás de síntese. Eles ressaltam a utilização da energia proveniente do hidrogênio em substituição à dos combustíveis fósseis, visto que o mesmo apresenta energia em torno de 2,75 vezes maior que a dos hidrocarbonetos (TYAGI; LO, 2013).

A fração líquida é representada pelo bio-óleo, que por sua vez apresenta uma mistura complexa de compostos. Ele pode ser facilmente armazenado, transportado e empregado como combustível líquido ou diesel e aplicado em diversos fins como: fornos, caldeiras e motores para produção de calor e energia (POKORNA *et al.*, 2009). Além disso, o produto líquido pode ser destinado para produção de adesivos, resinas, açúcares anidro como o levoglucosan, que é utilizado na fabricação de fármacos, surfactantes e polímeros biodegradáveis; substituição de fenol petroquímico ou fracionado para dar origem a novos produtos químicos (fertilizantes, ácidos, etc.) (BU *et al.*, 2012).

A fração sólida obtida pelo processo de pirólise apresenta grande quantidade de metais e compostos inorgânicos. Como ela é rica em carbono, alguns trabalhos encontrados na literatura citam sua aplicação como adsorvente e materiais de construção. Segundo Chen *et al.* (2013), as propriedades das cinzas resultantes dos processos térmicos com lodo de esgoto são semelhantes as do cimento.

Desta forma, pesquisas vêm sendo desenvolvidas no intuito de aproveitar o máximo possível os compostos obtidos na pirólise tanto de lodo de esgoto como de outros resíduos orgânicos para utilizá-los como matéria-prima compensando os gastos com o tratamento dos resíduos (CAO *et al.*, 2010; ZUO *et al.*, 2013). Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi analisar os principais produtos pirolíticos obtidos por meio da micropirólise rápida do lodo de esgoto anaeróbico em três temperaturas distintas visando observar o efeito da temperatura sobre esses produtos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Lodo Anaeróbico

Para os testes pirolíticos, foi utilizada uma amostra de lodo de esgoto anaeróbico com partículas em torno de 0,125 mm de diâmetro, 4 % de umidade e 96 % de sólidos, sendo 43 % de material volátil (AGRAFIOTI *et al.*, 2013; ASTM D2216-98, 2005). Os percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre da amostra foram determinados através da análise elementar em um analisador automático CE Instruments – Modelo EA110 e podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Percentual de C, N, H e S na amostra de lodo

	% N	% C	% H	% S
<b>Amostra</b>	2,46	20,86	3,25	2,50

### 2.2. Experimentos Pirolíticos

O estudo do processo de pirólise foi feito através da micropirólise rápida do lodo de esgoto, realizada em um micropirolisador CDS Pyroprobe 5200, acoplado a um cromatógrafo a gás com

espectrômetro de massa Shimadzu GC/MS QP 2010 Plus, usando como gás de arraste o hélio, coluna DB-5MS com espessura de 0,25  $\mu\text{m}$ , 30 m de comprimento e diâmetro de 0,25 mm; a qual foi submetida a uma temperatura inicial de 40 °C por 5 min, seguida de uma rampa de aquecimento sob uma taxa de 5 °C  $\text{min}^{-1}$  até atingir 300 °C, na qual permaneceu por 30 min. A fonte de íons foi mantida a 230 °C e a interface a 250 °C, sendo a análise realizada no modo scan adquirindo massas no intervalo de 25-533 m/z. A pirólise foi realizada nas temperaturas de 450 °C, 600 °C e 750 °C, numa taxa de aquecimento teórica de 10 °C. $\text{ms}^{-1}$  e um tempo total de aquecimento de 40 s. A interface do pirolisador foi aquecida a 110 °C por 1 min, para secar a biomassa, aumentando-se para 325 °C por 4 min. A linha de transferência foi mantida a 325 °C. Os produtos de reação foram identificados com ajuda da biblioteca de compostos NIST de espectros de massa. As análises foram feitas em duplicata e considerados apenas os picos com percentual de área igual ou superior a 0,5 %.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme citado por Cao *et al.* (2010), Pokorna *et al.* (2009) e Sánchez *et al.* (2009), a distribuição dos produtos pirolíticos apresentou hidrocarbonetos ( $\text{C}_5 - \text{C}_{27}$ ), cetonas, aldeídos, alcoóis, ácidos carboxílicos, aromáticos oxigenados e nitrogenados, aminas, nitrilas e em menor quantidade: éteres, ésteres e amidas, como mostra a Figura 1. Os compostos obtidos estão descritos em detalhes nas próximas seções.

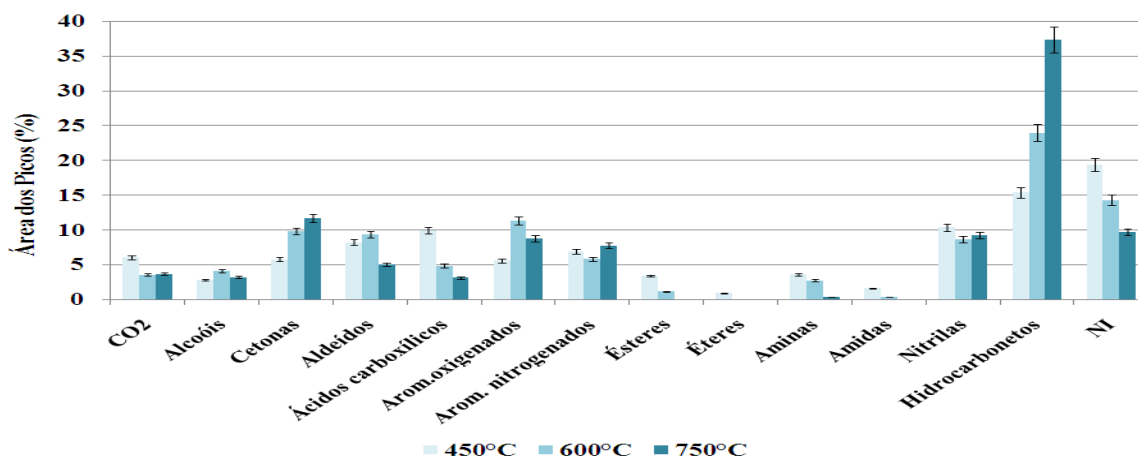


Figura 1 – Distribuição dos produtos da pirólise rápida de lodo de esgoto anaeróbio a 450 °C, 600 °C e 750 °C. Sendo NI = Não identificados.

#### 3.1. Compostos Nitrogenados

Entre os compostos obtidos inclusos neste grupo, estão as amidas, aminas, nitrilas e aromáticos, sendo estes dois últimos produzidos em maior quantidade durante as pirólises, conforme reportado por Zhang *et al.* (2013) e como pode ser observado na Figura 1. A produção destes compostos é atribuída aos aminoácidos, principais constituintes das proteínas e, geralmente são responsáveis pela produção de gases HCN e  $\text{NH}_3$  durante o processo. Na Tabela 2 estão reunidos os principais compostos nitrogenados juntamente com o tempo de retenção médio obtidos neste estudo em comparação com os reportados pela literatura.

Tabela 2 – Principais compostos nitrogenados obtidos

tr <sub>m</sub> (min)	Composto	F.M.	Área (%)			Ref.
			450 °C	600 °C	750 °C	
4,1	Metil butano nitrila	C <sub>5</sub> H <sub>9</sub> N	N.I.*	0,50	0,86	[4]
4,4	Metil 1H-Pirrol (isômeros)	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> N	1,15	0,77	0,69	[4], [5]
4,7	Piridina	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	N.I.*	0,50	0,51	[2], [5], [7]
4,8	Pirrol	C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N	2,37	2,27	1,89	[7]
6,3	Acetamida	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NO	0,52	0,50	N.I.*	[1]
7,1	Metil piridina	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	N.I.*	N.I.*	0,8	[6]
19,1	Benzeno nitrila	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N	N.I.*	0,52	0,89	[6]
22,0	2-Acetil-1,4,5,6-tetrahidropiridina	C <sub>7</sub> H <sub>11</sub> NO	0,50	1,08	N.I.*	[5]
22,4	Benzeno-propano nitrila	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> N	N.I.*	0,76	0,50	[4], [5]
24,0	Indol	C <sub>8</sub> H <sub>7</sub> N	2,36	1,38	1,86	[3], [6]
26,8	3-metil 1H-Indol	C <sub>9</sub> H <sub>9</sub> N	0,50	1,03	0,96	[4]
39,2	Pentadecano nitrila	C <sub>15</sub> H <sub>29</sub> N	3,44	2,53	3,35	[1]
40,1	5,10-Dietóxi-2,3,7,8-tetrahidro-1H,6H- dipirrol [1,2-a;1',2'-d] pirazina	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub> O	1,55	0,66	N.I.*	[8]
40,7	Hexadecano nitrila	C <sub>16</sub> H <sub>31</sub> N	0,70	0,5	N.I.*	[2]
44,7	Hexadecano amida	C <sub>16</sub> H <sub>33</sub> NO	1,19	N.I.*	N.I.*	[4]

Sendo: N.I.\* = Não Identificado, [1] Cao *et al.* (2010), [2] Domínguez *et al.* (2005), [3] Jindarom *et al.* (2007), [4] Sánchez *et al.* (2009), [5] Tsai *et al.* (2009), [6] Zhang *et al.* (2011), [7] Zhang *et al.* (2013), [8] Zuo *et al.* (2013).

De acordo com Cao *et al.* (2010), Pokorna *et al.* (2009), Zuo *et al.* (2013) os compostos nitrogenados, inclusive os heterocíclicos, produzidos a partir da pirólise do lodo de esgoto, podem ser removidos do bio-óleo, já que são considerados contaminantes, purificados e utilizados como matéria prima para obtenção de novos produtos, compensando os gastos com o tratamento deste resíduo.

### 3.2. Cetonas e Aldeídos

As análises permitiram a identificação de cetonas cíclicas como metil-ciclopentanona e 3-metil 1,2-ciclopentanodiona, conforme citado por Zuo *et al.* (2013). Compostos derivados de açúcares anidros também foram encontrados como a levoglucosenona, que é formada pela desidratação do levoglucosan e pode ser empregada na confecção de polímeros (BU *et al.*, 2012; LU *et al.*, 2011). Entre os aldeídos obtidos em maior quantidade estão os compostos de baixo peso molecular como o 2-metil propanal, pentanal, 2-butenal e isômeros do metil butanal. Em geral, a variedade de produtos pertencentes às cetonas e aldeídos foi baixa. A modificação observada foi apenas a área percentual dos compostos com a temperatura, sendo linear com a mesma no caso das cetonas. Para os aldeídos, as áreas percentuais dos compostos foram maiores a 600 °C e menores a 750 °C (Figura 1).

### 3.3. Alcoóis, Éteres e Ésteres

Em geral, foram obtidos alcoóis na faixa de C<sub>4</sub> – C<sub>20</sub>, sendo o 3,7,11-trimetil dodecanol (C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>O) e o octadecanol (C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>O) produzidos em maior quantidade. Já os éteres obtidos neste

estudo e os reportados na literatura estão em sua maioria ligados a grupos fenólicos como os isômeros do metóxi-fenol e dimetóxi-fenol. A amostra produziu a 450 °C o éter heterocíclico 1,4-dioxano, que geralmente é obtido da desidratação do dietileno glicol. Por último, os ésteres gerados em maior quantidade foram o metil hexadecanoato e o metil octadecanoato com 17 e 19 átomos de carbono, respectivamente; conforme encontrado nos trabalhos de Domínguez *et al.* (2005) e Jindarom *et al.* (2007). Esses três grupos orgânicos são conhecidos como pré-combustíveis, pois podem ser transformados em hidrocarbonetos através de reações simples como desidratação.

### 3.4. Compostos Aromáticos Oxigenados

Conforme citado por Zhang *et al.* (2011), como uma parte do lodo é constituída por celulose, foi possível observar a presença de produtos pirolíticos derivados da mesma, principalmente fenóis (e derivados), furfural (derivado do furano), como pode ser observado na Tabela 3. Segundo Sánchez *et al.* (2009) além das possíveis reações de Diels-Alder, os compostos fenólicos podem contribuir para a formação de hidrocarbonetos poliaromáticos durante as transformações secundárias do processo de pirólise.

Alguns trabalhos como o de Bu *et al.* (2012), citam que compostos fenólicos produzidos apresentam alto valor agregado, até porque produtos industriais que utilizam esses compostos em seu processo de produção estão associados a custos relativamente altos. Além disso, os fenóis obtidos podem ser empregados para a síntese de resinas polifenólicas (em substituição aos fenóis derivados do petróleo), solventes e fármacos.

Tabela 3 – Principais compostos aromáticos oxigenados obtidos

tr <sub>m</sub> (min)	Composto	F.M.	Área (%)			Ref.
			450 °C	600 °C	750 °C	
3,7	Dimetil-furano (isômeros)	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	N.I.*	1,31	0,95	[7]*
7,7	Furfural	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	0,93	1,09	0,95	[4]*
13,6	Fenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	1,05	1,99	1,51	[1]*, [3], [8]-[10]
17,1	Metil-fenol (isômeros)	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	1,16	2,01	1,64	[2], [3], [5]-[10]
20,1	Etil-fenol (isômeros)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	0,85	0,99	0,97	[1]*, [7]*
21,9	2,3 dihidro-benzofurano	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	N.I.*	0,71	0,66	[6], [7]*
24,6	2-metóxi 4-vinilfenol	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0,90	0,97	N.I.*	[7]*
25,6	2,6 dimetóxi fenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	0,91	N.I.*	N.I.*	[1]*, [10]
28,4	2-metóxi 5-(1-propenil) fenol	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	0,71	0,74	N.I.*	[1]*, [7]*

\* Trabalhos com pirólise de biomassa vegetal. Sendo: N.I.\* = Não Identificado, [1]\* Bu *et al.* (2012), [2] Domínguez *et al.* (2005), [3] Jindarom *et al.* (2007), [4]\* Lu *et al.* (2011), [5] Sánchez *et al.* (2009), [6] Tian *et al.* (2011), [7]\* Tsai *et al.* (2006), [8] Tsai *et al.* (2009), [9] Zhang *et al.* (2011), [10] Zuo *et al.* (2013).

### 3.5. Hidrocarbonetos

Entre os hidrocarbonetos obtidos estão os alcanos, alcenos (em menor quantidade), aromáticos e esteróides como o colesteno e colestadieno. Pela Tabela 4, foi possível observar que a pirólise rápida do lodo de esgoto forneceu uma maior quantidade de hidrocarbonetos de cadeia linear em relação a

esses trabalhos, contribuindo para um melhor aproveitamento dos produtos pirolíticos e reduzindo custos associados à quebra de ligações para obtenção de hidrocarbonetos lineares, por exemplo. Com o aumento da temperatura, foi possível observar um maior percentual de hidrocarbonetos e redução na quantidade de alguns compostos oxigenados e nitrogenados (Figura 01).

Tabela 4 – Principais hidrocarbonetos obtidos

$t_{r_m}$ (min)	Composto	F.M.	Área (%)			Ref.
			450 °C	600 °C	750 °C	
3,6	Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	N.I.*	1,14	1,54	[2], [4]
5,4	Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	2,22	4,44	5,78	[1] – [5]
8,8	Etil-benzeno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	N.I.*	0,99	0,94	[1], [3], [4]
9,1	p-Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	1,04	0,85	1,07	[2], [3]
10,0	Estireno	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	N.I.*	2,45	2,26	[1] – [4]
14,0	Deceno	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	N.I.*	1,06	1,16	[1], [2]
17,6	Undeceno	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	0,73	1,07	1,19	[1], [2]
20,7	Naftaleno	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	N.I.*	N.I.*	0,85	[2] – [4], [6]
20,9	Dodeceno	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	0,74	1,01	1,29	[1] – [3]
24,3	Tridecano	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	0,62	0,83	1,02	[1], [2], [4]
26,9	Tetradecano	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	0,58	1,03	1,49	[1] – [5]
27,1	Pentadeceno	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>	0,95	0,96	1,69	[1] – [3], [5]
29,6	Pentadecano	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	N.I.*	0,91	0,65	[1] – [5]
29,7	Hexadeceno	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>	0,85	0,74	0,96	[1] – [3], [5]
29,8	Hexadecano	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	0,85	1,05	0,62	[3], [4]
32,1	Octadeceno	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>	1,08	1,24	1,37	[1] – [3]
32,3	Octadecano	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	0,86	1,18	0,71	[1], [2], [4]
34,6	Eicoseno	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>	0,96	1,06	1,00	[2]
45,1	Heneicosano	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	N.I.*	0,55	N.I.*	[4]
54,3	Colesteno	C <sub>27</sub> H <sub>46</sub>	1,00	1,88	1,70	[1] – [3]
56,5	Colestadieno	C <sub>27</sub> H <sub>44</sub>	1,10	N.I.*	N.I.*	[1] – [3]

Sendo: N.I.\* = Não Identificado, [1] Domínguez *et al.* (2005), [2] Jindarom *et al.* (2007), [3] Sánchez *et al.* (2009), [4] Tian *et al.* (2011), [5] Tsai *et al.* (2009), [6] Zhang *et al.* (2011).

### 3.6. Ácidos Carboxílicos

Assim como os compostos nitrogenados, os ácidos carboxílicos possuem valor agregado. Eles podem ser aplicados na produção de novos produtos químicos ou transformados em hidrocarbonetos por meio de reações de descarboxilação. Esterificação também é outra opção. O ácido acético se faz presente em grande quantidade como produto resultante da parcela celulósica da biomassa, embora a maior quantidade de ácidos produzidos foi de cadeia longa, normalmente de C<sub>12</sub> – C<sub>18</sub>, conforme descrito na literatura (POKORNA *et al.*, 2009; SANCHÉZ *et al.*, 2009; TSAI *et al.*, 2009). Juntos, eles são responsáveis pela acidez do bio-óleo produzido do lodo. Neste estudo, as maiores áreas percentuais foram obtidas para ácidos a partir de 11 átomos de carbono (C<sub>11</sub>), como mostra a Tabela 5.



Tabela 5 – Principais ácidos carboxílicos obtidos

tr <sub>m</sub> (min)	Composto	F.M.	Área (%)			Ref.
			450 °C	600 °C	750 °C	
2,5	Ácido acético	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	2,00	0,90	1,09	[4]*, [6]
9,6	Ácido 2-metil butanóico	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0,80	N.I.*	N.I.*	[6]
20,5	Ácido octanóico	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	0,82	0,88	N.I.*	[6]
28,9	Ácido undecanóico	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	0,84	1,08	0,83	[2]
31,4	Ácido dodecanóico	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	1,53	1,48	N.I.*	[5]
36,1	Ácido tetradecanóico	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	1,68	1,70	0,71	[1], [3], [5]
40,5	Ácido pentadecanóico	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	2,79	1,91	1,13	[3], [5]
44,4	Ácido octadecanóico	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	2,39	0,99	1,09	[2], [5]

\* Artigo com pirólise de biomassa vegetal. Sendo: N.I.\* = Não Identificado, [1] Do mínguez *et al.* (2005), [2] Jindarom *et al.* (2007), [3] Sánchez *et al.* (2009), [4]\* Tsai *et al.* (2006), [5] Tsai *et al.* (2009), [6] Zuo *et al.* (2013).

## 4. CONCLUSÃO

O processo de pirólise de lodo de esgoto anaeróbico forneceu compostos pertencentes a vários grupos orgânicos para as três temperaturas analisadas, sendo o maior percentual de hidrocarbonetos obtido a 750 °C. Esse aumento da temperatura pode ter favorecido a ocorrência de reações durante a pirólise contribuindo também para a redução no percentual de alguns compostos como ácidos carboxílicos, aminas, amidas e aldeídos. Além disso, reações de gaseificação poderiam ser intensificadas, interferindo no processo. Com isso, pode-se dizer que a pirólise de lodo apresenta-se como uma alternativa em potencial para a questão da destinação desse resíduo, visto que foi possível obter compostos com alto valor agregado e que podem ser aplicados como fonte de energia renovável ou como matéria-prima para diversos fins nas indústrias. O emprego desta técnica poderia reduzir os custos com a destinação e disposição do lodo de esgoto, uma vez que os produtos obtidos apresentam valor agregado e podem ser reutilizados.

## 5. REFERÊNCIAS

- AGRAFIOTI, E.; BOURAS, G.; KALDERIS, D.; DIAMADOPOULOS, E. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, v. 101, p. 72-78, 2013.
- ASTM D2216-98, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, ASTM, USA, 2005.
- BU, Q.; LEI, H.; REN, S.; WANG, L.; ZHANG, Q.; TANG, J.; RUAN, R. Production of phenols and biofuels by catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technol.*, v. 108, p. 274-279, 2012.
- CAO, J. P.; ZHAO, X. Y.; MORISHITA, K.; WEI, X. Y.; TAKARADA, T. Fractionation and identification of organic nitrogen species from bio-oil produced by fast pyrolysis of sewage sludge. *Bioresource Technol.*, v. 101, p. 7648-7652, 2010.

- CHEN, M.; BLANC, D.; GAUTIER, M.; MEHU, J.; GOURDON, R. Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction. *Waste Manage.*, v. 33, p. 1268-1275, 2013.
- DOMÍNGUEZ, A.; FERNANDÉZ, Y.; FIDALGO, B.; PIS, J. J.; MENÉNDEZ, J. A. Bio-syngas production with low concentrations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from microwave-induced pyrolysis of wet and dried sewage sludge. *Chemosphere*, v. 70, p. 397-403, 2008.
- DOMÍNGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J. A.; INGUANZO, M.; PIS, J. J. Investigations into the characteristics of oils produced from microwave pyrolysis of sewage sludge. *Fuel Process. Technol.*, v. 86, p. 1007-1020, 2005.
- JINDAROM, C.; MEEYOO, V.; KITTYANAN, B.; RIRKSOMBOON, T.; RANGSUNVIGIT, P. Surface characterization and dye adsorptive capacities of char obtained from pyrolysis/gasification of sewage sludge. *Chem. Eng. J.*, v. 133, p. 239-246, 2007.
- LU, Q.; YANG, X. C.; DONG, C. Q.; ZHANG, Z. F.; ZHANG, X. M.; ZHU, X. F. Influence of pyrolysis temperature and time on the cellulose fast pyrolysis products: Analytical Py-GC/MS study. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, v. 92, p. 430-438, 2011.
- POKORNA, E.; POSTELMANS, N.; JENICEK, P.; SCHREURS, S.; CARLEER, R.; YPERMAN, J. Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges. *Fuel*, v. 88, p. 1344-1350, 2009.
- SÁNCHEZ, M. E.; MENÉNDEZ, J. A.; DOMÍNGUEZ, A.; PÍS, J. J.; MARTÍNEZ, O.; CALVO, L. F.; BERNARD, P. L. Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. *Biomass Bioenerg.*, v. 33, p. 933-940, 2009.
- TIAN, Y.; ZUO, W.; REN, Z.; CHEN, D. Estimation of a novel method to produce bio-oil from sewage sludge by microwave pyrolysis with the consideration of efficiency and safety. *Bioresource Technol.*, v. 102, p. 2053-2061, 2011.
- TSAI, W. T.; LEE, M. K.; CHANG, J. H.; SU, T. Y.; CHANG, Y. M.. Characterization of bio-oil from induction-heating pyrolysis of food-processing sewage sludges using chromatographic analysis. *Bioresource Technol.*, v. 100, p.2650-2654, 2009.
- TSAI, W. T.; LEE, M. K.; CHANG, Y. M. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, v. 76, p. 230-237, 2006.
- TYAGI, V. K.; LO, S. L. Sludge: A waste or renewable source of energy and resources recovery? *Renew. Sust. Energ. Rev.*, v. 25, p. 708-728, 2013.
- ZHANG, B.; XIONG, S.; XIAO, B.; YU, D.; JIA, X. Mechanism of wet sewage sludge pyrolysis in a tubular furnace. *Int. J. Hydrogen Energ.*, v. 36, p. 355-363, 2011.
- ZHANG, J.; TIAN, Y.; CUI, Y.; ZUO, W.; TAN, T. Key intermediates in nitrogen transformation during microwave pyrolysis of sewage sludge: A protein model compound study. *Bioresource Technol.*, v. 132, p. 57-63, 2013.
- ZUO, W.; JIN, B.; HUANG, Y.; SUN, Y. LI, R.; JIA, J. Pyrolysis of high-ash sewage sludge in a circulating fluidized bed reactor for production of liquids rich in heterocyclic nitrogenated compounds. *Bioresource Technol.*, v. 127, p. 44-48, 2013.