

III-091 - AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS NAS FASES SÓLIDA E GASOSA ATRAVÉS DE MÉTODOS CONVENCIONAL E RESPIROMÉTRICO

Jorge Akutsu⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (DECiv-UFSCar).

Cali Laguna Achon⁽²⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) e Pós-doutora pelo Departamento de Engenharia Civil da UFSCar com bolsa FAPESP. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (DECiv-UFSCar) e Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da UFSCar (PPGEU/UFSCar).

João Eduardo Machado Perea Martins⁽³⁾

Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Mestre e Doutor em Física Aplicada na Área Computacional pela Universidade de São Paulo (IFSC-USP). Professor adjunto do Departamento de Computação, Faculdade de Ciências de Bauru, UNESP.

Erich Kellner⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Professor associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (DECiv-UFSCar).

Marina da Costa Ribeiro de Almeida⁽⁵⁾

Engenheira Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Mestranda em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Endereço⁽¹⁾: Rodovia Washington Luís, Km 235 - SP310 - UFSCar. São Carlos-SP - CEP:13565-905, Brasil. Tel: (16) 3351-9672. e-mail: jorge.akutsu@gmail.com.

RESUMO

A reciclagem de resíduos sólidos urbanos carece de controle e avaliação do processo. A avaliação do processo na fase gasosa é denominada método respirométrico. O objetivo deste trabalho foi analisar comparativamente os métodos de acompanhamento operacional do processo de compostagem de resíduos sólidos realizado de forma convencional em amostras sólidas e método respirométrico em amostra gasosa. Para tanto foi realizada em uma instalação piloto, composta por um reator, sopradores e sistema de aquisição de dados. O resíduo sólido ou substrato utilizado nessa pesquisa foi uma mistura de componentes orgânicos destinados a fabricação de ração animal, sendo utilizado por apresentar características mais homogêneas quando comparado ao resíduo sólido domiciliar. A quantidade total de resíduo sintético usado no ensaio foi de 4 Kg em base úmida. O tempo total de condução do experimento foi de 32 dias, sendo o tempo total de tratamento de 28 dias. Foram efetuadas e retiradas ao longo do processo um total de 6 (seis) amostras da fase sólida, durante o ensaio que teve duração total de 32 dias. Os parâmetros medidos na fase gasosa consistiram na determinação da evolução temporal do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂ sendo estes gases analisados e registrados no aparelho medidor de forma contínua ao longo do processo. Conclui-se que a maioria dos parâmetros avaliados nas amostras da fase sólida se mostrou inconsistente para avaliação do processo de compostagem, devido à heterogeneidade intrínseca dos resíduos sólidos e amostragem representativa. Os Sólidos Voláteis (SV), comumente utilizados como um dos parâmetros para avaliar os processos de compostagem, permaneceram praticamente invariáveis ao longo do ensaio, demonstrando que este parâmetro pode não ser um indicador representativo. Porém, alguns parâmetros tais como, umidade e DQO no final do processo são parâmetros importantes e relevantes para controle operacional e análise global do processo. O acompanhamento do processo de compostagem na fase gasosa elimina ou minimiza os possíveis erros de amostragem e permite uma avaliação mais efetiva e confiável. As análises realizadas na fase gasosa (método respirométrico) apresentam vantagens, tais como, precisão, representatividade e confiabilidade, por serem efetuadas em meio homogêneo.

Permite assim, que os parâmetros sejam determinados de forma contínua e em tempo real, fundamental para o acompanhamento operacional do processo e possíveis intervenções.

PALAVRAS-CHAVE: Respirometria, Compostagem, Controle operacional, Monitoramento de Processo, Parâmetros de Projeto.

INTRODUÇÃO

Segundo a Lei 13.305/2010 a destinação ambientalmente adequada de resíduos sólidos deve priorizar o reuso e a reciclagem e como última ordem de prioridade a disposição final de rejeitos em aterro. Uma das alternativas para reciclagem de resíduos sólidos urbanos é a compostagem, que no Brasil é ainda bastante incipiente. Este fato deve-se tanto ao aspecto econômico, como ao alto grau de empirismo associado ao projeto, controle e avaliação do processo.

Segundo Akutsu et al. (2009), a utilização de uma técnica que não dispõe de critérios, parâmetros e índices consolidados, no que se refere à avaliação de sua performance e controle operacional, apresenta incertezas e falta de confiabilidade, contribuindo para que não exista avanço de sua aplicação, principalmente em larga escala.

Tradicionalmente a avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos é realizada através do acompanhamento e monitoramento da fase sólida, que pode apresentar incertezas devido à heterogeneidade associada às amostras sólidas. Alternativamente, tem-se a avaliação do processo na fase gasosa, denominado método respirométrico, que é um procedimento para determinação dos parâmetros da fase gasosa associados à atividade respiratória do processo de degradação biológica de um substrato orgânico (AKUTSU et al., 2009).

O método respirométrico vem sendo utilizado na avaliação de processos de compostagem por diversas pesquisas recentes relatadas na literatura, principalmente internacional, tais como: ADANI et al. (2004); GEA et al. (2004); SCAGLIA et al. (2005); TREMIER et al. (2005); GÓMEZ et al. (2006); UBAY et al. (2007) e KALAMDHAD et al. (2008).

OBJETIVO

Analisar comparativamente os métodos de acompanhamento operacional do processo de compostagem de resíduos sólidos realizado de forma convencional em amostras sólidas e método respirométrico em amostras gasosas.

METODOLOGIA

A avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos foi realizada em uma instalação piloto, composta por um reator (tambor rotativo), sopradores e sistema de aquisição de dados.

O reator utilizado para compostagem dos resíduos consiste de um “tambor rotativo”, cujo corpo principal apresenta seção hexagonal com dimensões de 35 cm nas suas diagonais e 50 cm de comprimento, perfazendo um volume interno útil de 93 litros. Apresenta em uma de suas paredes, uma janela removível para manuseio das amostras. Possui em seu eixo uma tubulação em aço inox que serve como suporte para transmissão da rotação e ao mesmo tempo como tubulação de entrada e saída dos gases. Este eixo é assentado sobre dois mancais de suporte e sustentação e por um sistema de roldanas acoplado a uma correia acionada por um conjunto motor-reductor.

A instalação piloto dispõe de dois conjuntos de sopradores (bombas de ar), um destinado à alimentação do reator e outro destinado à recirculação. Conectados à linha de recirculação, a montagem piloto conta com sistema completo de coleta e análises *online* e automatizada dos gases O₂ e CO₂. A instalação é dotada de sistema *online* de aquisição de dados conectada a um computador, conforme ilustrado na Figura 1.



(a) Sistema completo



(b) Tambor rotativo e periféricos



(c) Aquisição de dados

Figura 1 – (a) Sistema completo (b) Tambor rotativo para processo de compostagem (c) e sistema automatizado de aquisição de dados e monitoramento.

O resíduo sólido ou substrato utilizado nessa pesquisa foi uma mistura de componentes orgânicos destinados a fabricação de ração animal. Tal substrato “sintético” foi utilizado por apresentar características mais homogêneas quando comparado, por exemplo, ao resíduo sólido domiciliar, sendo um material facilmente estocável e preservável, de manuseio mais simples e isento de riscos de contaminação ao operador, principalmente em um ambiente confinado. Como o objetivo da pesquisa foi comparar o processo de compostagem segundo a análise da fase gasosa (respirometria) e método convencional de análise da fase sólida, que é sujeita a grandes variabilidades decorrentes da heterogeneidade intrínseca associada aos resíduos sólidos reais, isto poderia dificultar sobremaneira a obtenção de amostras representativas para avaliação dos parâmetros da fase sólida, e resultados coerentes e confiáveis para confrontar com os resultados da análise da fase gasosa.

A quantidade total de resíduo (substrato) sintético usado no ensaio foi de 4 Kg em base úmida, conforme Tabela 1. Foram também determinadas as umidades naturais dos componentes para efeito de estimativa correta da quantidade de água inicial a ser adicionada à amostra composta com intuito de dar início ou partida do processo com umidade na faixa de 50 a 60% considerada adequada para a compostagem. Além da umidade, foi também efetuada, para cada componente e para a amostra composta do resíduo “sintético”, a determinação da DQO e COT expressos em mg/kg. A Tabela 1 apresenta esses valores.

Tabela 1- Umidade natural, DQO, COT e relação COT/DQO dos diferentes componentes e do resíduo.

Componentes	Umidade Natural (U%)	DQO (mg/kg)	COT(mg/kg)	COT/DQO
Casca moída de caroço de algodão	11,00	362.500	514.300	1,42
Polpa cítrica peletizada	18,85	337.500	508.700	1,51
Farelo de germe de milho	11,03	335.000	444.100	1,36
Ração especial para potros	18,38	522.500	-	-
Resíduo “sintético”	14,80	400.000	527.000	1,32

O aparelho medidor apresenta e registra em seu display os valores de concentração desses gases em termos percentuais (% O₂ e % CO₂), sendo que o aparelho apresenta opções de coleta e registro de dados em intervalos de 1s a 600s.

O ensaio realizado teve duração de 32 dias, sendo coletados e disponibilizados para esse experimento aproximadamente 41.760 dados da evolução temporal do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂.

O aparelho medidor de gases adquirido para o presente projeto de pesquisa apresenta faixa de medição (*range*) do parâmetro O₂ variando de 0% a 20% e do parâmetro CO₂ variando de 0% a 80%. O sistema de automação implementado no sistema de medição de gases permite regular os níveis mínimo e máximo (*range*) de O₂ desejado no ambiente gasoso do reator, conforme Martins et al. (2009). São apresentados na Tabela 2 os métodos e procedimentos laboratoriais utilizados para determinação dos parâmetros da fase sólida.

Tabela 2 – Métodos e equipamentos utilizados na realização de análises dos parâmetros da fase sólida.

Parâmetros	Método	Equipamentos
D.B.O.	Respirométrico	D.B.O. <i>Track</i>
D.Q.O.	Colorimétrico	DR 2500
Sólidos Voláteis	Gravimétrico	Balança Analítica / Mufla
pH	Potenciométrico	Órion A 310
Nitrogênio Total	Colorimétrico	DR 2500
Fosfato Solúvel	Colorimétrico	DR 2500
Umidade	Gravimétrico	Estufa / Balança Analítica

RESULTADOS

O tempo total de condução do experimento foi de 32 dias, sendo o tempo total de tratamento de 28 dias. Foram efetuadas e retiradas ao longo do processo um total de 6 (seis) amostras da fase sólida, durante o ensaio realizado que teve duração total de 32 dias.

Os parâmetros medidos na fase gasosa consistiram basicamente na determinação da evolução temporal do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂ sendo estes gases analisados e registrados no aparelho medidor de forma contínua ao longo do processo.

• Resultados da Fase Sólida

A Tabela 3 a seguir, apresenta os resultados gerais dos valores de parâmetros determinados segundo análises efetuadas nas amostras da fase sólida.

Tabela 3 - Resultados de parâmetros analisados nas amostras da fase sólida durante o processo.

Parâmetros	Tempo (dias)					
	0	3	9	16	28	32
DBO (mg/kg)	80.205	57.253	39.902	115.417	124.010	48.418
DQO (mg/kg)	641.642	750.068	897.790	687.211	606.035	516.462
NH₃ (mg/Kg)	50,0	127,8	181,6	406,0	182,2	180,8
NTK (mg/Kg)	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
PO₄ (mg/Kg)	4386,0	3966,0	1462,0	3068,0	2482,0	2094,0
P (mg/Kg)	1018,0	786,0	700,0	2040,0	684,0	1110,0
pH	-	-	-	7,51	-	6,28
Umidade (%)	60,41	37,62	53,48	70,72	64,91	61,38
Sólidos Voláteis (%)	-	-	94,71	93,40	92,79	92,80

Dos nove parâmetros avaliados considera-se que nem todos são passíveis de análise mais adequada ou aprofundada, pois apresentaram variações aleatórias ou não condizentes no decorrer do processo. Dentre os parâmetros considerados como não passíveis de avaliação condizente incluem-se a DBO, NH₃, NTK, PO₄ e P, conforme Tabela 3.

Para o parâmetro DBO, esperava-se, por exemplo, certa correlação com o parâmetro DQO, com valores decrescentes ao longo do processo, o que não ocorreu. Tais valores, ao contrário do que se podia esperar, apresentaram valores crescentes ou constantes ao longo do processo, impedindo, portanto uma análise mais apropriada.

Com relação ao parâmetro DQO, cabe salientar que os valores absolutos obtidos nos resíduos no início e final do processo se apresentaram condizentes com valores referenciais citados em literatura para resíduos sólidos domiciliares: KIEHL (1998) e VESPA (2006), ou seja; valores iniciais de DQO entre 650.000 mg/kg e 1.000.000 mg/kg e valores finais que denotam processo de bioestabilização entre 200.000 mg/kg e 500.000 mg/kg. O Gráfico da Figura 2 ilustra os valores de DBO, DQO, Umidade e Sólidos Voláteis determinados nas amostras da fase sólida.

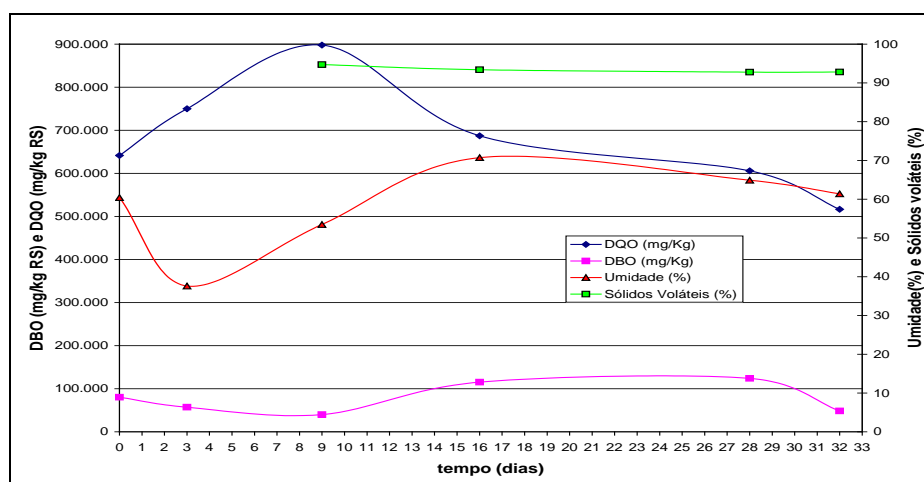


Figura 2- Variação dos parâmetros DBO, DQO, umidade e sólidos voláteis analisados nas amostras da fase sólida.

Uma avaliação global dos resultados constantes na Figura 2 e Tabela 3 permite constatar que os resultados da maioria dos parâmetros medidos na fase sólida a princípio não podem ser analisados de uma maneira direta e absoluta, merecendo cuidados de interpretação, pois apresentaram incongruências ou falta de lógica em sua evolução temporal. Por exemplo, com relação a DQO verificou-se acréscimo de seu valor até o nono dia, quando o esperado era o decréscimo deste parâmetro ao longo do processo. O parâmetro Sólidos Voláteis (SV), embora se verifique a lógica de decaimento, apresentou variação extremamente pequena ao longo do processo, não se constituindo como parâmetro relevante para avaliação da evolução da taxa de degradação do substrato e de bioestabilização do resíduo.

Diferentemente dos outros parâmetros, a umidade constitui-se como um parâmetro confiável e importante no acompanhamento do processo, pois influencia na taxa de consumo de O_2 como pode ser observado no diagrama respirométrico apresentado na Figura 3.

Devido principalmente a dificuldade em se realizar amostragens representativas na fase sólida, decorrentes da grande heterogeneidade associada aos resíduos sólidos, a maioria dos parâmetros não podem ser considerados representativos para avaliar e acompanhar o processo de compostagem.

• Resultados da Fase Gasosa

Na Figura 3 apresentam-se os resultados dos parâmetros obtidos na evolução temporal dos consumos percentuais de O_2 e geração de CO_2 analisados na fase gasosa, sendo os seguintes parâmetros analisados:

- taxa de variação de consumo percentual de O_2 no intervalo de tempo expressos em termos de $dO_2(\%)/dt$;
- taxa de variação de consumo volumétrico específico de O_2 no decorrer do tempo, expresso em termos de $L O_2 / kg RS. hora$;
- taxa de variação de consumo mássico específico de O_2 no decorrer do tempo, expressos em termos de $g O_2 / kg RS. hora$.

Considerando os parâmetros analisados, o termo “RS” refere-se à massa do resíduo sólido em base seca.

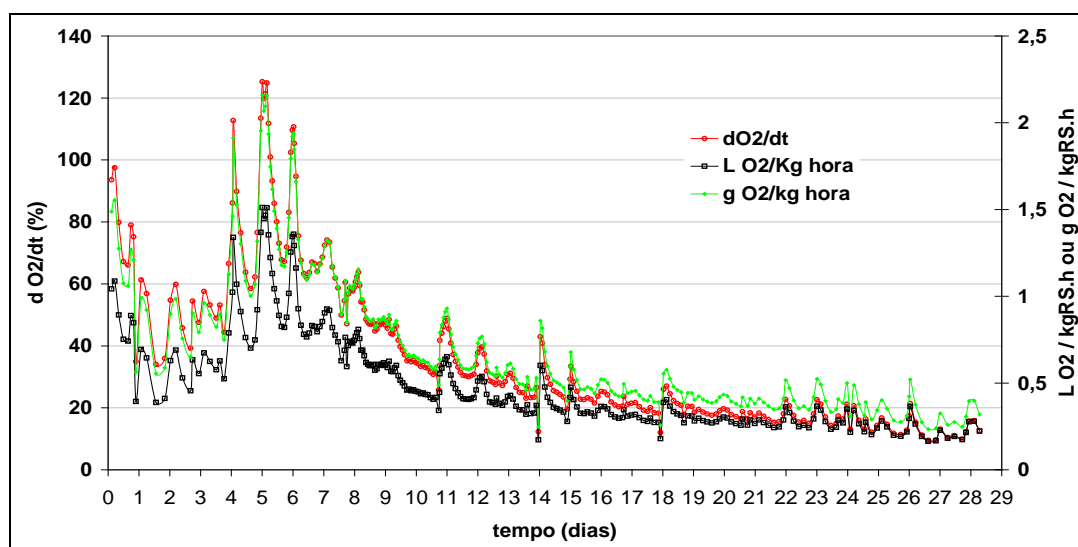


Figura 3 - Taxas de variação de consumo percentual de O₂, taxas de variação de consumo volumétrico específico de O₂ e taxas de variação de consumo mássico específico de O₂ no decorrer do processo.

Na Figura 3 nota-se que entre os dias 1 e 3 há uma queda no consumo de O₂ devido à baixa umidade de 37,62%, cujos valores ideais para compostagem é de 50 a 60%. Após a correção da umidade na amostra sólida houve acréscimo substancial no consumo de O₂, corroborando com a importância da umidade (Fase sólida) no acompanhamento do processo. Além disso, observa-se que a maior taxa de conversão (bioestabilização) ocorre até o sétimo dia. Nota-se que o resíduo ainda não estabilizou até o final do ensaio, porém as taxas de consumo de O₂ apresentaram valores baixos, conforme Figura 3.

CONCLUSÕES

A maioria dos parâmetros avaliados nas amostras da fase sólida se mostrou inconsistente para avaliação do processo de compostagem, devido à heterogeneidade intrínseca dos resíduos sólidos e amostragem representativa. Os Sólidos Voláteis (SV), comumente utilizados como um dos parâmetros para avaliar os processos de compostagem, permaneceram praticamente invariáveis ao longo do ensaio, demonstrando que este parâmetro pode não ser um indicador representativo do grau de estabilização dos resíduos sólidos. Porém, alguns parâmetros tais como, umidade e DQO no final do processo são parâmetros importantes e relevantes para controle operacional e análise global do processo.

Cabe acrescentar ainda que a grande dificuldade em se realizar amostragens representativas na fase sólida, decorrentes da grande heterogeneidade associada aos resíduos sólidos é que justifica cada vez mais a pesquisa da compostagem segundo a análise da fase gasosa (respirometria).

O acompanhamento do processo de compostagem na fase gasosa elimina ou minimiza os possíveis erros de amostragem e permite uma avaliação mais efetiva e confiável. Assim, as análises realizadas na fase gasosa (método respirométrico) apresentam vantagens, tais como, precisão, representatividade e confiabilidade, por serem efetuadas em meio homogêneo. Permitem também que os parâmetros sejam determinados de forma contínua e em tempo real, o que é fundamental para o acompanhamento operacional do processo e possíveis intervenções.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo FAPESP N° 2006/56.250-1, pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa. Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela concessão de bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADANI, F., CONFALONIERE, R., TAMBONE, F. *Dynamic Respiration Index as a Descriptor of the Biological Stability of Organic Wastes. Journal of Environmental Quality*, v.33, p. 1866-1876, 2004.
2. Akutsu, J., Martins, J.E.M.P., Castilho Filho, G.S., Renofio, A., Isa, M.M. Avaliação e Controle Operacional de Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos através de Método Respirométrico. In: XVI SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru. Anais. 2009.
3. GEA, T., BARRENA, R., ARTOLA, A., SANCHEZ, A. *Monitoring the Biological Activity of the Composting Process: Oxygen Uptake Rate (OUR), Respirometric Index (RI), and Respiratory Quotient (RQ)*. Wiley InterScience Periodical, Inc., Set. 2004.
4. GÓMEZ, R., LIMA, F., FERRER A. *The use of respiration indices in the composting process: a review*. *Waste Management and Research*. 24; 37, 2006.
5. KALAMDHAD, A., PASHA, M., KAZMI, A. *Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotary drum composter*. *Resources Conservation and Recycling*. v.54, p. 829-834, 2008.
6. KIEHL E. Manual de Compostagem, Maturação e Qualidade do Composto. Edição Própria Av. Brasil 910, PIRACICABA ,SP. 1998.
7. Martins, J.E.M.P., Akutsu, J., Kajino, H. S., Manfrinato, J. W. S., Castilho Filho, G.S. Desenvolvimento de um Sistema Computacional para automação e gerenciamento de processos de compostagem de resíduos sólidos. In: XVI SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru. Anais. 2009.
8. SCAGLIA, B., ERRIQUENS, F.G., GIGLIOTTI, G., TACCARI, M., CIANI, M., GENEVINI, P.L., ADANI, F. *Precision determination for the specific oxygen uptake rate (SOUR) method used for biological stability evaluation of compost and biostabilized products*. *Università degli Studi di Milano , Università di Perugia, Università Politecnica delle Marche*, p. 0-8, 2005.
9. TREMIER, A., GUARDIA, A., MASSIANI, C., PAUL, E., MARTEL, J. L. *A respirometric method for characterizing the organic composition and biodegradation kinetics and the temperature influence on the biodegradation kinetics, for a mixture of sludge and bulking agente to be co-composted*. *Bioresource Technology*. v.96, p. 169-180, 2005.
10. UBAY, E., OZDEMIR, S., KARAHAN, O., INSEL, G., ORHON, D. *Critical appraisal of respirometric methods for metal inhibition on activated sludge*. *Journal of Hazardous Materials*. B139, p. 332-339, 2007.
11. VESPA, I. C., LUCAS, J.; Características minerais e energéticas do lixo urbano em processos de compostagem em biodigestão anaeróbia. *Energ. Agric. , Botucatu* , v.21, n.2, p. 61-80, 2006.