

# USP

## Campus de São Carlos

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TAXA  
DE RECIRCULAÇÃO DE PERCOLADO NA  
DIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO  
ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
URBANOS.

Monique Toledo Salgado

Orientador: Prof. Tit. Jurandyr Povinelli

## UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



## ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Monique Toledo Salgado

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TAXA DE RECIRCULAÇÃO DE  
PERCOLADO NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 08/10/03

Ass.: ..... *Nozareth* .....

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100044270

Orientador: Prof. Titular Jurandyr Povinelli

São Carlos  
2003



Class. TECE-EESC  
Cutt. 5050  
Tombo TO17104  
Sysno 1257638

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S164i Salgado, Monique Toledo  
Influência da variação da taxa de recirculação de percolado na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos / Monique Toledo Salgado. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.  
Área: Hidráulica e Saneamento.  
Orientador: Prof. Tit. Jurandyr Povinelli.

1. Taxa de recirculação. 2. Biometanização.  
3. Inibição. 4. Resíduos sólidos urbanos. 5. Ácidos voláteis. I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidata: Engenheiro **MONIQUE TOLEDO SALGADO**

Dissertação defendida e julgada em 11-07-2003 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Tit. **JURANDYR POVINELLI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)


APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Assoc. **VALDIR SCHALCH**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Assoc. **MARIA OLÍMPIA DE OLIVEIRA REZENDE**  
(Instituto de Química de São Carlos/USP)

APROVADA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Doutor **MARCELO ZAIAT**  
Vice-Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia (Hidráulica e Saneamento), em Exercício

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **MURILO ARAUJO ROMERO**  
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação, em Exercício

**Dedico este trabalho:**

*A Deus.*

*Aos meus amados pais: José Sérgio Salgado e Maria Marta Toledo Salgado por me apoiarem em todos os momentos da minha vida, com muito amor, carinho e compreensão.*

*Ao meu querido irmão Sérgio Ricardo Toledo Salgado pelo amor e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Tit. Jurandy Povinelli por oferecer oportunidade de crescer profissionalmente.

Aos professores Antenor Barbosa e Jorge Adílio Penna da Escola de Minas (DECIV-EM-UFOP) por incentivarem a realização do mestrado.

Ao professor Luiz Antonio Daniel e professora Viviana Maria Zanta Baldochi pelas sugestões dadas na qualificação.

A professora Ruth de Gouvêa Duarte e ao professor Luiz Ramariz Duarte pela colaboração e por me adotarem durante a finalização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento (EESC-USP) pela atenção e conhecimentos dados.

Ao professor Marcelo Zaiat e professora Maria Bernadete A. Varesche Silva pela contribuição e apoio.

Aos técnicos do Laboratório de Saneamento (SHS-EESC\_USP): Júlio César Trofino, Maria Aparecida Peres Viudes e Paulo Fragiácomo pela amizade, apoio e auxílio na realização das análises físico-químicas, e por aturarem o “cheiro” do percolado.

A professora Beth Moraes e Maria Ângela Talarico (Janja) pelo apoio, carinho paciência e auxílio durante as realizações das análises cromatográficas. A Heloísa P. Gianotti pelo apoio nos exames microbiológicos.

A professora Maria do Carmo Calijuri pelo apoio e atenção.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento (EESC-USP), em especial Pavi, Rose, Sá e André.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e a Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto de pesquisa (processo no 2002/009671-4).

Aos amigos Anna Paola Bubel, Ezilma Cordeiro Dias, Geraldo Donizetti de Paula, Irahy Simões Maia, Jucélia Cabral Mendonça, Karina Querne de Carvalho e Marcela Paula Grobério sempre presentes na minha vida e por todo auxílio durante a realização deste trabalho. Não sei o que seria de mim sem vocês.

Aos queridos amigos Adelena, Ana Valéria, Dete, Jânio, Gláucio, Lara, Luciana Peixoto, Murilo, Patrícia, Sandra, Silvana, Simone, Thiago, Tibério, Virgínia pelo carinho e convivência.

Aos meus queridos amigos do Laboratório de Tratamento de Resíduos Orgânicos (LTR) Arthur Silva, Aurélio Pessoa Picanço, Leonardo Vieira Soares e Rita de Cascia Suassuna pela amizade, companheirismo e apoio.

Aos amigos do Laboratório de Processo Biológicos (LPB) e Laboratório de Saneamento: Dirlane, Edmar (Dick), Eduardo (Xuxu), Flávia, Luis Hamilton, Luis Ricardo, Luana, Rogers, Ronan, Sávia, Valquíria pela amizade conquistada no dia a dia. E a todos aqueles que de forma direta ou indireta colaboraram com a elaboração deste trabalho. Infelizmente não é possível citar o nome de todos. Muito obrigada!

## RESUMO

SALGADO, M. T. (2003) Influência da variação da taxa de recirculação de percolado na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A eficiência do processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos pode ser alterada com a recirculação do percolado. Considerado esse aspecto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a taxa da recirculação do percolado na eficiência do processo de digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Assim, foram montados reatores de 3,45 litros preenchidos com resíduo padrão (fração orgânica de resíduos sólidos urbanos padrão) e inóculo (percolado). O valor de referência foi o teor de sólidos totais de 13%. Analisou-se o desempenho dos reatores variando taxas de recirculação (10, 30 e 50 % em volume de inóculo). Foram realizadas análises físico-químicas e exames microscópicos em amostras de percolado para avaliar o desempenho desses reatores. Os resultados dessas análises indicaram inibição da fase metanogênica nos reatores com maiores taxas de recirculação (30 e 50%). O reator com taxa de recirculação de 10%, comparado aos demais reatores, obteve maior eficiência na partida, com elevada produção de metano e maior percentual de degradação de sólidos. Os exames microscópicos realizados em amostras de percolado desse reator revelaram predominância de organismos de morfologia com características de *Methanococcus*, enquanto nos demais reatores foi observada maioria de organismos com morfologia semelhante a fungos. Concluiu-se que a taxa de recirculação de percolado influenciou significativamente nos biorreatores degradando a matéria orgânica, e que altas taxas de recirculação podem levar à inibição total do ecossistema existente no reator.

Palavras-chaves: taxa de recirculação, biometanização, inibição, resíduos sólidos urbanos, ácidos voláteis.



## ABSTRACT

The performance of the anaerobic digestion process of organic solid residues can be modified by the leachate recirculation. Considering this aspect, the present paper aims to evaluate the leachate recirculation rate in the efficiency of the anaerobic digestion process of the organic fraction of urban solid residues. Thus, 3,45 liter reactors were constructed and filled with standard waste (standard organic fraction of urban solid residues) and seed (leachate), having the total solid content of 13% as a value of reference. The performance of the reactors was analyzed by varying recirculation rates (10, 30 and 50 % in volume of seed). Leachate samples from these reactors were examined through microscopic and physical-chemical analyses to evaluate their performance. The results of these analyses indicated an inhibition of the methanogenic phase in the reactors with larger rates of recirculation (30 and 50%). The reactor with 10% recirculation rate obtained larger efficiency in the start, methane production and percentage of solid degradation, compared to other reactors. The microscopic examinations in the leachate samples from this reactor presented a predominance of organisms with characteristic *Methanococcus* morphology, whereas in the other reactors most organisms presented a similar morphology to fungus. It was possible to conclude that the leachate recirculation rate has a significant influence on the degradation of the organic material from bioreactors and that high recirculation rates can lead to the total inhibition of the ecosystem existing in the reactor.

Key-words: recirculation rate, biomethanization, inhibition, urban solid waste, volatile acids.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resumo dos caminhos observados na decomposição dos resíduos com percolado recirculado.....	13
Figura 2: Produção de biogás acumulada para biorreator com recirculação e sem recirculação.....	18
Figura 3: Variação de pH ao longo da degradação de resíduos sólidos urbanos em biorreatores com recirculação e sem recirculação do percolado.....	18
Figura 4: Biorreator adaptado para a recirculação do percolado.....	21
Figura 5: Variação dos parâmetros ácidos voláteis e pH para os reatores ao longo da operação: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP.....	36
Figura 6: Variação dos ácidos voláteis totais ao longo do tempo em todos os biorreatores.....	38
Figura 7: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RAS.....	38
Figura 8: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RBS.....	39
Figura 9: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RA1.....	40
Figura 10: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RA3.....	41
Figura 11: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RB3.....	41
Figura 12: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RB5.....	42
Figura 13: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RC5.....	43
Figura 14: Variação da DQO em função do tempo de operação nos biorreatores.....	44
Figura 15: Evoluções temporais dos ácidos voláteis e DQO nos líquidos percolados dos biorreatores: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP.....	45
Figura 16: Variação temporal da alcalinidade nos biorreatores.....	46
Figura 17: Variação da porcentagem de gás metano no biogás dos biorreatores.....	48

Figura 18: Comportamento da DQO e produção de metano ao longo do tempo de operação nos reatores: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP. ....	50
Figura 19: Evolução temporal da composição do biogás durante a digestão anaeróbia da FORSup nos reatores: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP. ....	52
Figura 20: Decréscimo do teor de carbono dos biorreatores. ....	53
Figura 21: Percentagem de remoção da DQO sólida nos biorreatores. ....	54
Figura 22: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase da amostra do percolado empregado como inóculo (a) sarcinas; (b) sarcinas fluorescentes; (c) bacilos com diversas dimensões. Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25. ....	57
Figura 23: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RAS, RBS, RA1 e RBP com 125 dias de operação (a) bacilos com inclusões (RAS); (b) bacilos variados (RBS); (c) cocos (provavelmente Methanococcus) (RA1); (d) fluorescência cocos (RA1); (e) bacilos em cadeia (RA1); (f) cistos (RBP). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25. ....	60
Figura 24: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RA3, RB3, RB5, RC5 e RA1 com 125 dias de operação (g) bacilos e esporo de fungos (RA3); (h) bacilos e fungos (RB3); (i) bacilos (RB5); (j) células esporuladas (RC5); (k) cocos e bacilos (RA1); (l) cocos metanogênicos (RA1). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25. ....	61
Figura 25: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RA1 e RBP no final do ensaio (a) cistos de sarcina (RBP); (b) fluorescência do cistos de sarcina (RBP); (c) cocos (RBP); (d) fluorescência do cocos (RBP); (e) cocos (RA1); (f) fluorescência cocos (RA1). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25. ....	63
Figura 26: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RA3, RB3, RAS, RBS e RA1 no final do ensaio (g) bacilos (RA3); (h) leveduras (RB3); (i) hifa (RAS); (j) bacilos delgados (RBS); (k) cocos e bacilos (RA1). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25. ....	64
Figura 27: Microscopia de Varredura da amostra do percolado do biorreatores RA1 no final do ensaio (a) cocos; (b) e (c) cocos e alguns bacilos; (d) e (e) aglomerados de cocos .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição física dos resíduos sólidos urbanos de São Carlos e classificação dos componentes segundo o grau de biodegradabilidade .....	6
Tabela 2: Faixas características de concentrações do percolado em função dos graus de estabilização dos aterros sanitários estudados (convencionais e com recirculação do percolado).....	19
Tabela 3: Valores percentuais dos elementos utilizados na elaboração da FORSU.....	23
Tabela 4: Dados dos valores da FORSU, do inóculo, do tampão e dos volumes de recirculação utilizados na preparação dos biorreatores.....	26
Tabela 5: Valores dos parâmetros das análises realizadas na FORSU preparada para o meio de reação .....	33
Tabela 6: Valores das características físico-químicas do inóculo empregado no meio de reação .....	33
Tabela 7: Valores dos parâmetros analisados do meio de reação dos biorreatores empregados na pesquisa.....	34
Tabela 8: Reatores operados (siglas) conforme réplica e taxa de recirculação utilizada	35
Tabela 9: Características físico-químicas do percolado dos biorreatores no final do experimento .....	46
Tabela 10: Valores dos meios de reação dos biorreatores no final do experimento.....	55
Tabela 11: Valores finais da massa da FORSU e do volume de percolado dos reatores .....	55
Tabela 12: Observações microscópicas do percolado dos reatores com 125 dias de operação .....	59
Tabela 13: Observações microscópicas do percolado dos reatores no final do experimento .....	62
Tabela 14: Características da FORSU utilizada na primeira montagem dos biorreatores.....	67

**LISTA DE SIGLAS**

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AVT Ácido Volátil Total  
CLAE Cromatografia Líquida de Alta Eficiência  
DBO Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO Demanda Química de Oxigênio  
EESC Escola de Engenharia de São Carlos  
ETA Estação de Tratamento de Água  
ETE Estação de Tratamento de Esgoto  
FORSU Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos  
FORSUP Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Padrão  
HMDS Hexametildisilazane  
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IPT Instituto de Pesquisa Tecnológica  
LPB Laboratório de Processos Biológicos  
MEV Microscopia Eletrônica de Varredura  
NMP Número Mais Provável  
PNSB Pesquisa Nacional de Saneamento Básico  
RAS Reator controle A  
RBS Reator controle B  
RA1 Reator com taxa de recirculação de 10% A  
RB1 Reator com taxa de recirculação de 10% B  
RA3 Reator com taxa de recirculação de 30% A  
RB3 Reator com taxa de recirculação de 30% B  
RA5 Reator com taxa de recirculação de 50% A  
RB5 Reator com taxa de recirculação de 50% B  
RC5 Reator com taxa de recirculação de 50% C

RBP Reator branco

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

SHS Departamento de Hidráulica e Saneamento

ST Sólidos Totais

STV Sólidos Totais Voláteis

USP Universidade de São Paulo

**SUMÁRIO**

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE SIGLAS .....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 Conceituação e características dos resíduos sólidos.....	4
3.2 Fundamentos da digestão anaeróbia.....	7
3.2.1 Microbiologia da digestão anaeróbia dos resíduos sólidos.....	9
3.3 Efeitos na partida dos biorreatores inoculados empregando a recirculação do percolado para degradação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos .....	13
3.3.1 Efeitos da inoculação na partida dos biorreatores.....	14
3.3.2 Efeitos da recirculação na partida dos biorreatores.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	20
4.1 Instalações Experimentais.....	20
4.2 Meio de reação .....	21
4.2.1 Preparo do meio de reação.....	22
4.2.1.1 Quantidade de inóculo adicionado .....	24

4.3	Preparo e operação dos biorreatores.....	24
4.4	Análises e Exames.....	27
4.4.1	Análises.....	28
4.4.1.1	Análise cromatográfica gasosa.....	28
4.4.1.2	Análise Cromatográfica Líquida de Alta Eficiência.....	29
4.4.2	Exames Microbiológicos.....	30
4.4.2.1	Microscopia ótica.....	30
4.4.2.2	Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.).....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1	Caracterização da FORSU <sub>p</sub> e do inóculo.....	32
5.2	Monitoramento dos biorreatores tratando a FORSU <sub>p</sub> inoculada com percolado variando a taxa de recirculação.....	34
5.2.1	Análise dos parâmetros físico-químicos: pH, DQO, ácidos voláteis e alcalinidade.....	35
5.3	Eficiência dos biorreatores.....	47
5.3.1	Análise da Produção de gases.....	47
5.3.2	Degradação da matéria orgânica dos biorreatores.....	53
5.4	Exames Microbiológicos.....	57
5.5	Dificuldades Operacionais.....	66
5.5.1	Dificuldades na montagem dos biorreatores.....	66
5.5.2	Dificuldades na recirculação do percolado em batelada.....	68
6.	CONCLUSÕES.....	69
7.	SUGESTÕES.....	71
8.	REFERÊNCIAS.....	72



## 1. INTRODUÇÃO

A explosão demográfica contribui significativamente para a sempre crescente geração de resíduos sólidos, pois toda atividade humana, seja ela industrial, comercial ou agrícola produz rejeitos que precisam ser coletados, transportados e tratados adequadamente. Associada a isto, a elevação do poder aquisitivo das populações tem acelerado ainda mais a geração de grandes volumes de resíduos sólidos, notadamente nas grandes cidades.

Com vistas a minimizar problemas causados pelo grande volume de resíduos sólidos urbanos (RSU) têm sido levados a efeito um grande número de trabalhos que buscam novas formas de pré-tratamento, tratamento, operação e disposição dos RSU, várias delas, inclusive, já foram implantadas. Destacam-se como forma de tratamento no Brasil: incineração, compostagem, encapsulamento, secagem/desidratação, métodos de disposição como os aterros sanitários e ainda a reciclagem pela coleta seletiva.

De acordo com Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2000), no Brasil, são produzidas, diariamente, cerca de 230 toneladas de RSU, os quais, têm como disposição final:

- ✓ lixões a céu aberto;
- ✓ áreas alagadas (estas práticas submetem a população e o meio ambiente à grave risco sanitário e deterioração dos recursos naturais);
- ✓ aterros controlados,
- ✓ aterros sanitários.

Há ainda uma parcela tratada em usinas de reciclagem e compostagem antes da disposição final.

A disposição final de resíduos sólidos tem causado problemas comuns nas grandes cidades brasileiras densamente ocupadas. De acordo com o Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT) (2000) esses problemas são:

- ✓ escassez ou inexistência de áreas para a disposição final do lixo;

- ✓ conflitos de usos do solo, com a população estabelecida no entorno das instalações de tratamento, aterros e lixões;
- ✓ exportação de lixo a municípios vizinhos, gerando resistências;
- ✓ lixões e aterros operados de forma inadequada, poluindo recursos hídricos.

Para minimização destes problemas é necessário diminuir o volume de resíduos sólidos para disposição final, através de programas de pré-seleção, reciclagem e reutilização, ou seja, gerenciamento. Particularmente, a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos pode ser estabilizada por compostagem, disposição em aterro sanitário e biorreatores anaeróbios, entre outros processos.

Diversos estudos têm apontado o processo de digestão anaeróbia como atrativa alternativa para estabilização biotecnológica da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. Este método de tratamento baseia-se na atividade de microrganismos anaeróbios, que degradam a matéria orgânica e geram produtos combustíveis como gás metano e hidrogênio, com redução do volume dos resíduos. Além disso, a fração orgânica estabilizada pode ser utilizada como condicionador de solos, de onde possui valor econômico potencial.

A desvantagem da degradação biológica de resíduos sólidos, tanto em aterros sanitários quanto nos biorreatores anaeróbios, é o fato de nesses ecossistemas as condições de crescimento e equilíbrio adequados demorarem para ser atingidas - meses ou anos (BARLAZ, 1998). Algumas pesquisas (GARB, et al, 2000; LEE et al, 2001; QUASIM & CHIANG, 1994; SAN & ONAY, 2001) sugerem a recirculação do percolado como alternativa para acelerar o início da degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e aumentar a taxa de produção de metano. Porém, observa-se falta de informações nas características operacionais da recirculação do percolado nos biorreatores anaeróbios, como: taxa, frequência, formas de recirculação (contínua ou batelada).

Dentro desse contexto geral, a proposta deste trabalho foi avaliar os efeitos da recirculação do percolado, com variações nas taxas de recirculação sobre a degradação anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos padrão (FORSUp).

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo desta investigação foi verificar a influência da recirculação do percolado na digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos. A insuficiência de trabalhos neste campo, objetivou definir e ajustar as melhores taxas de recirculação do percolado em biorreatores operados em sistemas de uma só fase, com vistas ao aumento da eficiência do processo da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão da literatura buscou-se levantar resultados de pesquisas sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos que fornecessem subsídios para este trabalho.

As características dos resíduos sólidos produzidos no Brasil tornam necessárias pesquisas fundamentais para ampliar os conhecimentos das rotas metabólicas de degradação, a bioquímica e a microbiologia, com vistas a fornecer dados reais, aplicáveis à tecnologia da digestão anaeróbia de resíduos sólidos, coerentes com nossa realidade.

A revisão aborda informações sobre diversos aspectos relacionados à digestão anaeróbia de resíduos sólidos:

- ✓ Conceituação e características dos resíduos sólidos em geral;
- ✓ Fundamentos básicos da digestão anaeróbia e, mais especificamente, a microbiologia da digestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos;
- ✓ Experiências com biorreatores aplicados à fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) no que se refere à sua operação (partida, inoculação e recirculação).

Observou-se que, embora bastante comentada, utilizada e discutida, a recirculação do percolado ainda requer mais pesquisas para obtenção de mais precisas informações porque ainda não foi encontrada uma metodologia de operação rotineira e confiável.

#### 3.1 Conceituação e características dos resíduos sólidos

A NBR 10004 define resíduos sólidos como todos aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam da atividade da comunidade de origem, industrial,

doméstica, hospitalar, comercial, de serviços, de varrição ou agrícola. Incluem-se lodos de Estações de Tratamento de Águas (ETAs) e Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição e de efluentes líquidos que, em função de suas particularidades, não possam ser lançados na rede pública de esgotos (ABNT, 1987).

Os resíduos sólidos podem ser classificados, também, em função de sua origem e de sua possível degradabilidade.

Segundo sua origem os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- ✓ urbanos: em que se enquadram os residenciais, comerciais, de varrição, de feiras livres, de capinação e poda;
- ✓ industriais: onde se inclui um grande percentual de lodos provenientes do processo de tratamento de efluentes líquidos industriais, muitas vezes tóxicos e perigosos;
- ✓ serviços de saúde: que abrangem os resíduos sólidos de hospitais, de clínicas médicas e veterinárias, de centros de saúde, de consultórios odontológicos e de farmácias;
- ✓ radioativos: onde se inserem os resíduos de origem atômica,
- ✓ agrícolas: em que se agrupam aqueles resultantes dos processos de produção de defensivos agrícolas e de suas embalagens.

De acordo com seu grau de degradabilidade, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- ✓ facilmente degradáveis: é o caso da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de origem urbana;
- ✓ moderadamente degradáveis: papéis, papelão e material celulósico;
- ✓ dificilmente degradáveis: pedaços de pano, retalhos, aparas e serragens de couro, borracha e madeira;
- ✓ não degradáveis: incluem-se aqui os vidros, metais, plásticos, pedras, terra, entre outros. Na realidade são chamados não degradáveis ou recalcitrantes aqueles resíduos de demorada degradação, quase sempre com tempo não determinado.

A composição dos resíduos sólidos urbanos que formam o substrato de sistemas biológicos, varia de acordo com o município devido à influência de fatores diversos, como crescimento demográfico, nível educacional, hábitos e costumes da população, crescimento industrial e tipo de coleta praticada (GOMES, 1989).

Segundo Christensen e Kjeldsen<sup>1</sup> apud Baldochi (1997), é extremamente variada a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, podendo ser constituída por compostos orgânicos facilmente degradáveis, como resíduos alimentares, e por aqueles dificilmente degradáveis, como por exemplo a lignina. Essa diversidade influencia fortemente as taxas de degradação em sistemas biológicos, como o aterro sanitário. A composição dos resíduos afeta diretamente as taxas de produção e a concentração dos componentes do gás e do percolato produzidos no aterro sanitário.

De acordo com Baldochi (1990), as técnicas e equipamentos utilizados na coleta, transporte, processamento e disposição do RSU modificam suas características físicas como: tamanho da partícula, densidade e homogeneidade dos resíduos sólidos. A redução do tamanho da partícula por trituração em veículos de coleta ou em estações de transferência, acelera significativamente a reatividade do processo, devido ao aumento da área superficial de contato com o substrato disponível ao ataque enzimático de microrganismos.

Tabela 1: Composição física dos resíduos sólidos urbanos de São Carlos e classificação dos componentes segundo o grau de biodegradabilidade

Componente	Composição Média Final (%)	Grau de biodegradabilidade	
		Classificação	% Total
Matéria orgânica	56,7	Fácil/Degradável	56,7
Papel	21,3	Moderada/Degradável	21,3
Trapo	3,4	Difícilmente Degradável	5,7
Madeira, couro e borracha	2,3		
Vidro	1,4	Não Degradável	16,3
Plástico	8,5		
Metal	5,4		
Inertes	1,3		

Fonte: Gomes (1989)

<sup>1</sup> CHRISTENSEN, T. H.; KJELDEN, P. (1991) Basic biochemical processes in landfills. In: ED. T. H. CHRISTENSEN, R. COSSU E R. STEGMANN, *Sanitary Landfilling, process, Technology and Environmental Impact*.

Grande parcela do lixo brasileiro é formada por matéria facilmente biodegradável, cerca de 60%. A cidade de São Carlos enquadra-se na média brasileira, conforme pode se observar na Tabela 1, que apresenta resultados da pesquisa realizada por Gomes (1989) com resíduo sólido da cidade de São Carlos.

### 3.2 Fundamentos da digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia dos RSU pode ser definido como conversão da matéria orgânica em biogás - uma mistura de dióxido de carbono e metano com traços de outros constituintes - por um consórcio de bactérias que são sensíveis ou completamente inibidas pelo oxigênio dissolvido. A digestão anaeróbia pode ser aplicada para converter resíduos de plantas, “sobras” da agricultura, adubos, efluentes de indústrias de alimentação e de bebidas, papel e alguns resíduos de indústrias químicas. A degradação anaeróbia da matéria orgânica ocorre naturalmente em uma variedade de ambientes anaeróbios, como o trato intestinal de ruminantes e os sedimentos (ARCHER & KIRSOP, 1990).

O reator que processa a digestão anaeróbia é um ecossistema balanceado, no qual cada população de organismos exerce função especial e essencial. O número e tipos de populações presentes em reatores são dependentes do tipo do reator, de suas condições operacionais e da composição do resíduo a ser tratado (ARCHER & KIRSOP, 1990). As fases metabólicas que se processam nesse ecossistema são: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Algumas das comunidades microbiológicas envolvidas nesse ecossistema estão descritas a seguir.

#### ✓ Bactérias hidrolíticas e fermentativas:

Esses grupos de bactérias são responsáveis pelos dois primeiros estágios da digestão anaeróbia, hidrólise e acidogênese, produzem enzimas que, liberadas no meio, hidrolizam compostos como celulose, hemicelulose, pectina, amido e outros em materiais de estruturas menores. Esses são transportados para o interior da célula e fermentados em uma variedade de produtos, tais como etanol, butirato, acetato, propionato etc (NOVAES, 1986; BITTON, 1994; ARCHER & KIRSOP, 1990). No tratamento anaeróbio de águas residuárias, vários fatores influenciam o grau e a taxa em

que o substrato é hidrolisado: temperatura operacional do reator; tempo de residência do substrato no reator; composição do substrato; tamanho das partículas; pH do meio; concentração de íons amônio e concentração de produtos da hidrólise (SPEECE, 1996).

Segundo Corrêa (1999), a hidrólise, que é um processo lento, é considerada a etapa fundamental em relação à digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos porque pode ser sua etapa limitante, principalmente quando a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos contiver altos teores de celulose.

✓ Bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio e bactérias homoacetogênicas

As bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio são essenciais para a degradação anaeróbia pois catabolisam propionato e outros ácidos orgânicos de cadeia maior que o acetato, álcool e certos compostos aromáticos em acetato e CO<sub>2</sub> (NOVAES, 1986; BITTON, 1994).

Segundo Bitton (1994), para conversão dos ácidos orgânicos, esse grupo requer baixas pressões parciais de H<sub>2</sub>. Este fenômeno, denominado transferência de hidrogênio interespecies é extremamente importante para a biotecnologia anaeróbia, pois a oxidação do propionato e butirato é termodinamicamente favorável somente em baixas concentrações de hidrogênio (ZENDHER<sup>2</sup> *apud* BARLAZ, 1996).

De acordo com Speece<sup>3</sup> *apud* Corrêa (1999) a ação das metanogênicas quimiossintetizadoras de hidrogênio (hidrogeniobacterias), mantém a pressão parcial de hidrogênio extremamente baixa e impede que ácidos voláteis de cadeia longa, como o propiônico e o butírico acumulem-se no sistema. O acúmulo de ácidos ocasiona o consumo de alcalinidade do sistema o que, conseqüentemente, pode causar decréscimo do pH do meio (SPEECE, 1996) e, dessa forma, inibe as metanogênicas (BARLAZ, 1996).

Novaes (1986) enfatiza que as bactérias homoacetogênicas são passo importante na digestão anaeróbia, devido à sua importância no produto final, pois o acetato é

---

<sup>2</sup> ZEHNDER, A. J. B. (1978). Ecology of methane formation. In: Water Pollution Microbiology v2. R. Michel (ed).349-376

<sup>3</sup> SPEECE, R.E. (1983). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.*, 17: 416A-427A



descrito como principal precursor do metano (BARLAZ, 1996). Essas bactérias são caracterizadas como quimioautotróficas e utilizam  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  como substrato.

Dos produtos originados na fase acetogênica apenas o hidrogênio e o acetato podem ser diretamente utilizados pelas metanogênicas. A metanogênese, etapa final no processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, é efetuada pelas arqueas metanogênicas.

#### ✓ Arqueas metanogênicas

As arqueas metanogênicas são anaeróbias estritas, capazes de utilizar apenas alguns tipos de substrato, como acetato,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  (ARCHER & KIRSOP, 1990).

De acordo com Bidone & Povinelli (1999), no caso dos RSU as arqueas metanogênicas desenvolvem-se em meio ambiente no qual o potencial de oxiredução esteja em torno de  $-300\text{mV}$ . A faixa ideal de pH para a produção de metano está entre 6,8 e 7,2; as faixas de temperatura variam conforme descrito: 15 a  $40^\circ\text{C}$ , para microrganismos mesofílicos e 55 a  $65^\circ\text{C}$ , para microrganismos termofílicos (BITTON, 1994; BARLAZ, 1996). Veeken et al (1999), ressalta que as arqueas metanogênicas são mais sensíveis ao decréscimo de pH e variação de temperaturas do que as bactérias acidogênicas e fermentativas.

A partir do substrato que utilizam as arqueas metanogênicas são divididas em dois grupos principais: metanogênicas acetoclásticas que utilizam o acetato para formar metano e metanogênicas hidrogenotróficas que formam metano utilizando hidrogênio e dióxido de carbono (NOVAES, 1986).

Estudos demonstram que, em reatores para tratamento de águas residuárias, a fase metanogênica é considerada uma das etapas limitantes do processo de digestão anaeróbia (SPEECE, 1996).

### 3.2.1 Microbiologia da digestão anaeróbia dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos são fonte de vários substratos importantes para crescimento e sucessão da biodiversidade da comunidade microbiana. São exemplos de ecossistemas para desenvolvimento das comunidades microbianas complexas: aterros sanitários, compostagem e reatores anaeróbios.

Corrêa (1999) descreve os resíduos sólidos urbanos como nicho adequado para desenvolvimento microbiano de diversas espécies pela disponibilidade de compostos orgânicos e inorgânicos e, também, por oferecer umidades e temperaturas adequadas ao crescimento celular. Nutrientes típicos encontrados nos resíduos tais como papéis e restos de alimentos, por conterem celulose, amido, proteína e hemicelulose, fornecem substrato para o crescimento microbiano (JONES & GRAINGER<sup>4</sup> *apud* PALMISANO & BARLAZ, 1996; BARLAZ, et al, 1990).

Estudos de microbiologia realizados em aterros e reatores anaeróbios tratando a fração orgânica do resíduo sólido urbano (FORSU), ainda não tornaram conhecidas a composição microbiana quanto à espécies presentes e o número de espécies, portanto não fornecem subsídios quanto à composição microbiana da maioria dos reatores anaeróbios (ARCHER & KIRSOP, 1990).

Ainda de acordo com PALMISANO & BARLAZ (1996), na decomposição de resíduos, a otimização da atividade microbiana tem importantes implicações econômicas. Gerado nos aterros e reatores anaeróbios, o gás metano é produto final e pode ser utilizado como forma de energia. Além disso, formação de produtos benéficos minimizam a ação de compostos maléficos como ácidos voláteis ou substratos potencialmente tóxicos. Esses autores referem que os caminhos para a biodegradação de resíduos sólidos urbanos em digestores anaeróbios são similares àqueles observados em aterros e outros ambientes anaeróbios.

As comunidades microbiológicas presentes em aterros e biodigestores anaeróbios incluem bactérias hidrolíticas e fermentativas, acetogênicas e redutoras de sulfato, arqueas metanogênicas e protozoários (PALMISANO & BARLAZ 1996).

Vários fatores são determinantes no processo de biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, entre eles: temperatura, pH, potencial de oxirredução, tamanho das partículas, concentração de nutrientes, adição de inóculo. Por exemplo, a variação brusca da temperatura durante a digestão anaeróbia pode afetar o desempenho do reator (BARLAZ, 1996).

De acordo com Foresti (1996)<sup>5</sup> a temperatura pode provocar:

---

<sup>4</sup> JONES, K. L. & GRAINGER, K. M. 1983. The application of enzyme activity measurements to a study of factors affecting protein, starch and cellulose fermentation in a domestic landfill. *Eur. J. Appl. Microbiol Biotechnol.* 18: 181-185

<sup>5</sup> FORESTI, E. (1996) Apostila do curso "Processo anaeróbios de tratamento de despejos".

- ✓ desbalanceamento entre produção e consumo de produtos intermediários (principalmente ácidos voláteis);
- ✓ diminuição da taxa específica de utilização do substrato das populações metanogênicas, no caso de reatores operando com tempo de detenção celular próximo ao mínimo,
- ✓ diminuição brusca e significativa da taxa de hidrólise de proteínas, lipídios e particulados, com conseqüente diminuição da eficiência global do sistema.

A umidade é considerada um dos parâmetros mais críticos da degradação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (VAVILLIN et al 2003). Este parâmetro influencia o crescimento dos microrganismos que compõem o processo de degradação, além de facilitar o contato entre microrganismos, substrato e nutrientes.

Kasali et al (1990) estudaram a influência da umidade na degradação anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos e constataram haver maiores produções de metano em substratos com teores de umidade na faixa de 60 a 75%; observaram, porém, que o acréscimo da umidade no início do experimento acarretou aumento das concentrações dos ácidos acético, propiônico, butírico e isobutírico. Observaram, também, queda significativa na produção de metano quando a umidade do sistema foi aumentada para 80%.

Gurijala et al (1993) e Ham et al (1993) também observaram relação direta entre teor de umidade e produção de metano. Barlaz (1998) apontou teor de umidade e pH como os mais críticos parâmetros da degradação anaeróbia dos RSU. O autor afirma que adição de umidade no aterro sanitário promove a dissolução e mistura dos substratos solúveis, além de transportá-los para seu interior.

De acordo com Barlaz (1998) e Barlaz et al (1989) a degradação anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos pode ser dividida em fases, que são descritas a seguir:

- ✓ Fase I - fase aeróbia ou de transição - tem início logo após a deposição dos resíduos no aterro. Nesta fase, oxigênio e nitrato são consumidos. Todos os grupos - celulolíticos, acetogênicos e arqueas metanogênicas, necessários para ocorrência da metanogênese, estão presentes no resíduo fresco, contudo há entre eles pouca interação.
- ✓ Fase II - considerada fase anaeróbia ácida. São aceleradas as atividades dos microrganismos celulolíticos e acetogênicos da fase anterior é consideravelmente aumentada no meio a quantidade de ácidos carboxílicos. O pH decresce como resultado do desequilíbrio entre atividades fermentativas atividades acetogênicas e metanogênicas. Nesta fase, o pH fica na faixa de 5,7 e 6,2; ocorre hidrólise dos

compostos dos polímeros complexos (lipídios, proteínas, polissacarídeos) e formam compostos mais simples como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Ainda na fase anaeróbia ácida inicia-se a acidogênese que consiste em converter açúcares, aminoácidos e ácidos graxos em compostos intermediários como ácidos acético, propiônico, butírico, CO<sub>2</sub> e hidrogênio. As concentrações de CO<sub>2</sub> podem chegar a 90% da composição do biogás. Observa-se aumento da população metanogênica e começa a aparecer metano na composição do biogás.

✓ Fase III - fase de produção acelerada de metano; a taxa de produção de metano eleva-se gradualmente. São características desta fase: concentração de metano, em torno de 50-60% (vol/vol); decréscimo das concentrações de ácidos carboxílicos; aumento do pH para valores entre 6.2 e 7.9; aumento das bactérias celulolíticas e acetogênicas das arqueas metanogênicas. Ocorre também pouca hidrólise de sólidos. Os ácidos carboxílicos acumulados são os principais substratos utilizados pelas arqueas metanogênicas.

✓ A fase IV - denominada fase de produção desacelerada de metano. Nesta fase a concentração de metano, pH e de populações celulolíticas e metanogênicas permanecem similares às da fase III. As bactérias acetogênicas continuam a aumentar e as concentrações de ácidos carboxílicos diminuem. Simultaneamente, decresce a taxa de produção de metano. Nessa fase, a taxa de decomposição da celulose e hemicelulose é superior à das anteriores.

Os autores citados ressaltam que, nos aterros sanitários, há limitações para as quatro fases acima descritas. O tempo requerido para cada fase, assim como a qualidade e a quantidade de percolato e gás produzidos dependem de fatores como características químicas do resíduo, tamanho das partículas, disponibilidade de nutrientes, entre outros. A Figura 1 apresenta gráfico com resumo das tendências observadas na degradação anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos com percolato recirculado. Os ácidos carboxílicos totais foram expressos em equivalentes de ácido acético. Os resultados, expressos em NMP, das arqueas metanogênicas foram estimados pela média das populações consumidoras de acetato e H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>. Sólidos remanescentes foram calculados pela razão entre massas da celulose + hemicelulose removida no reator, pelas massa da celulose + hemicelulose adicionada ao reator no início do experimento. Os valores dos volumes de gás foram corrigidos por meio da temperatura e pressão padrão (BARLAZ et al, 1989).

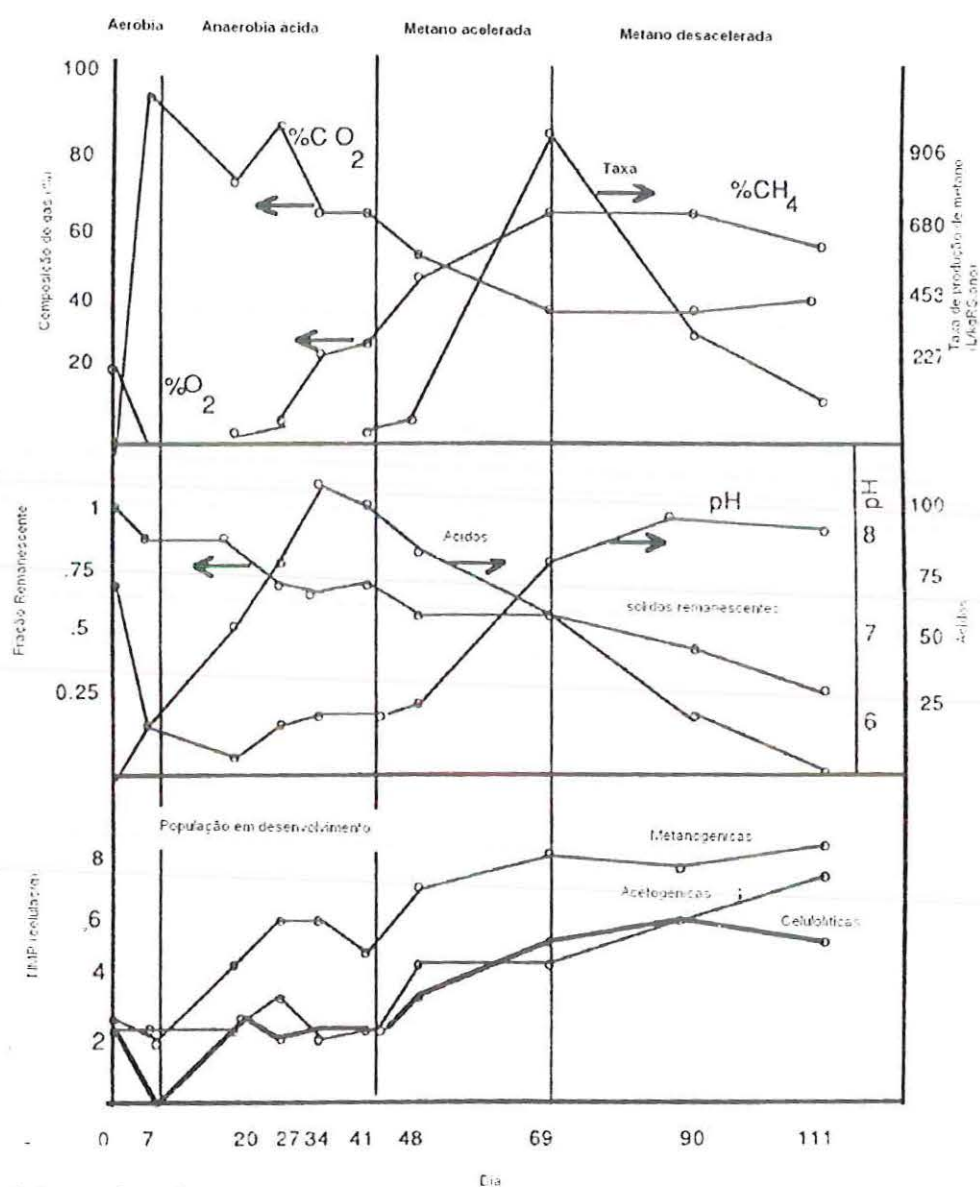


Figura 1: Resumo dos caminhos observados na decomposição dos resíduos com percolado recirculado.

Fonte: Adaptado de Barlaz (1989)

### 3.3 Efeitos na partida dos biorreatores inoculados empregando a recirculação do percolado para degradação da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos

### 3.3.1 Efeitos da inoculação na partida dos biorreatores

O RSU pode ser tratado em conjunto com outros resíduos: agrícolas, lodo de ETE e de fontes industriais e percolados de aterros sanitários.

De acordo com Leite (1997 a) a inoculação da fração orgânica dos RSU objetiva reduzir o tempo do processo de sua bioestabilização anaeróbia. Porém, é necessário conhecer a quantidade e qualidade do inóculo para assegurar o desempenho e estabilidade da fase metanogênica.

Segundo Leite et al (1997 b), utilizando lodo de esgoto sanitário como inóculo, o tratamento anaeróbio da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, favoreceu consideravelmente o desempenho do processo na redução do tempo de bioestabilização da matéria orgânica. A taxa de produção de CH<sub>4</sub> alcançou limite máximo quando foi adicionado ao substrato 20% em peso de inóculo; o mesmo não ocorreu com a taxa de produção de biogás. A redução do tempo de bioestabilização dos líquidos percolados foi diretamente proporcional à percentagem em peso de inóculo adicionado ao substrato. De acordo com os autores, o tratamento anaeróbio da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos inoculada com lodo de esgoto sanitário basicamente produz os seguintes efeitos:

- ✓ aumento do conteúdo de umidade;
- ✓ aumento do teor de elementos nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo;
- ✓ aumento do número de microrganismos metanogênicos,
- ✓ redução significativa do tempo de bioconversão.

Pinto (2000) testou três diferentes tipos de inóculos:

- ✓ percolado coletado em biorreator de 236 L, tratando a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos padrão, inoculado com percolado de um aterro sanitário com oito anos de idade, tamponado com bicarbonato de sódio e mantido a  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  por dois anos;
- ✓ lodo granular coletado em reator anaeróbio compartimentado (2a câmara) tratando esgoto sanitário;
- ✓ lodo granulado coletado em reator anaeróbio de fluxo ascendente tratando águas residuárias industriais de uma fábrica de papel.

A autora observou que a degradação anaeróbia da fração orgânica do resíduo sólido padrão apresentou partida mais rápida e com maior potencial metanogênico quando inoculada com percolado, em comparação com os demais inóculos avaliados. A

eficiência do percolado, como inóculo, pode ser atribuída à maior capacidade de transferência de massa entre o inóculo (em fase líquida) e a fração orgânica do resíduo sólido padrão, como também à adaptação ao resíduo sólido do ecossistema microbiológico presente no percolado.

### 3.3.2 Efeitos da recirculação na partida dos biorreatores

Segundo Maison et al (2000) o percolado é um produto resultante da degradação do resíduo (chorume) em combinação com a percolação da água de chuva. Wu et al (1988) descreveram o chorume como “o produto derivado da hidrólise dos compostos orgânicos e da umidade do sistema, com características que variam em função do tipo de resíduos sólidos, da idade do aterro, das condições meteorológicas, geológicas e hidrológicas do local do aterramento. Em geral, o chorume possui elevada carga orgânica, fontes de nitrogênio, como a amônia, metais pesados e grupos microbianos”.

As características do percolado variam de acordo com os tipos de resíduos depositados no aterro. Geralmente, o percolado apresenta altas concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como resultado do processo de decomposição biológica. Segundo Netto e Mota (1999), o percolado gerado a partir de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é um dos principais problemas de sua disposição final através dessa técnica. O percolado possui carga poluidora potencialmente maior que a de águas residuárias.

A recirculação do percolado no aterro sanitário é um dos vários métodos empregados para seu tratamento. Consiste na recirculação do percolado de elevada carga orgânica que volta ao aterro, para que ele possa novamente percolar pela massa de resíduos. De acordo com Kim & Pohland (1999), a recirculação aumenta a eficiência do aterro sanitário, promove o tratamento anaeróbio do percolado e a aceleração da degradação dos resíduos devido ao aumento do fluxo da umidade, o qual estimula a atividade microbiana por promover melhor contato entre substratos insolúveis, nutrientes solúveis e microrganismos.

O teor de umidade é um dos parâmetros mais críticos para a degradação da FORSU;mas ele pode ser controlado via recirculação do percolado. Recirculação do percolado tem ação estimulante porque o líquido se movimenta e distribui o inóculo,

minimiza locais carentes de nutrientes, e dilui toxinas (BARLAZ, 1990). Segundo Pavoni (1975), a recirculação do percolado resulta em umidade ótima e temperatura ideal para degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos nos aterros sanitários.

A recirculação do percolado pode promover:

- ✓ aceleração da estabilização dos resíduos no aterro;
- ✓ redução substancial nos componentes orgânicos do percolado;
- ✓ possível redução do volume devido a evapotranspiração;
- ✓ redução dos custos de tratamento do percolado (QUASIM e CHIANG, 1994; BARLAZ, et al, 1990; KIM & POHLAND, 1999).

Embora a recirculação apresente benefícios quanto à constante redução tanto da carga orgânica quanto do volume de lixiviado, o efluente final ainda não estará em condições de emissão nos cursos d'água receptores, porque pode ainda apresentar elevada DQO e, principalmente, amônia (ROBINSON & MARIS, 1985). A recirculação deve ser considerada como o primeiro estágio de um processo de tratamento mais amplo.

Lima (1988) testou várias opções de recirculação e obteve melhores resultados com a recirculação do percolado tratado anaerobiamente. A recirculação do percolado *in natura* causou a inibição do processo, principalmente da metanogênese, devido à produção de ácidos voláteis em grandes quantidades.

Baldochi (1997) afirmou que a inoculação e a recirculação com percolado metanogênico tamponado, podem ter sido os fatores responsáveis pelo favorecimento da digestão anaeróbia no experimento realizado com a FORSU.

Veeken et al. (2000) observaram que tratando FORSU, a taxa de recirculação de percolado *in natura* e o grau de mistura de resíduo e inóculo são importantes parâmetros na operação dos reatores anaeróbios mesofílicos; o aumento da taxa de recirculação e do grau de mistura resultam maior transporte de massa de ácidos voláteis de regiões dos resíduos para o inóculo. Segundo esses autores, a taxa de recirculação deve ser ativamente aumentada, com o processo da digestão, para prevenir a acidificação irreversível do inóculo e a inibição da hidrólise dos resíduos.

A recirculação do percolado promove umidade mais uniforme ao longo das camadas de resíduos aterrados (POHLAND & AL-YOUSFI 1994). Esses investigadores, em trabalhos de campo e experimental, encontraram resultados, confirmados com simulações do modelo utilizado, os quais indicaram que a



estabilização dos resíduos pode ser acelerada e alcançada pela recirculação do percolado *in situ* em tempo menor que o requerido para a prática convencional.

Estudos de Barlaz et al (1987) com reatores degradando resíduos sólidos urbanos sob várias condições, entre elas a recirculação do percolado, demonstraram que a recirculação estimula a produção de metano, quando o percolado é neutralizado pela adição de substância tampão.

San e Onay (2001) estudaram o impacto da recirculação do percolado em aterros sanitários, por meio de dois biorreatores construídos em PVC, com altura de 1 m e diâmetro de 0,35 m. Durante a realização do experimento fizeram variar o volume e a frequência da recirculação do percolado e concluíram que recirculação do percolado aumenta o grau de estabilização e a eficiência de remoção dos resíduos. O reator com recirculação apresentou maior produção de metano e o pH do reator sem recirculação permaneceu em torno de 5,5, ou seja, valores inadequados para condições metanogênicas. Os dados de produção de metano e pH obtidos nessa pesquisa estão apresentados na Figura 2 e Figura 3, respectivamente.

Reinhart e Al-Yousfi (1996) descreveram os impactos da recirculação do percolado nas características operacionais de aterros sanitários, com auxílio de estudos de casos realizado por Reinhart. (1996). Concluíram que os estudos em escala real confirmaram os dados obtidos em escala piloto e de laboratório: a recirculação do percolado promove aceleração dos processos de estabilização, possibilita o gerenciamento do percolado e aumenta a produção de gás. A Tabela 2 apresenta as faixas características do percolado dos aterros sanitários estudados, em função das fases da degradação anaeróbia.

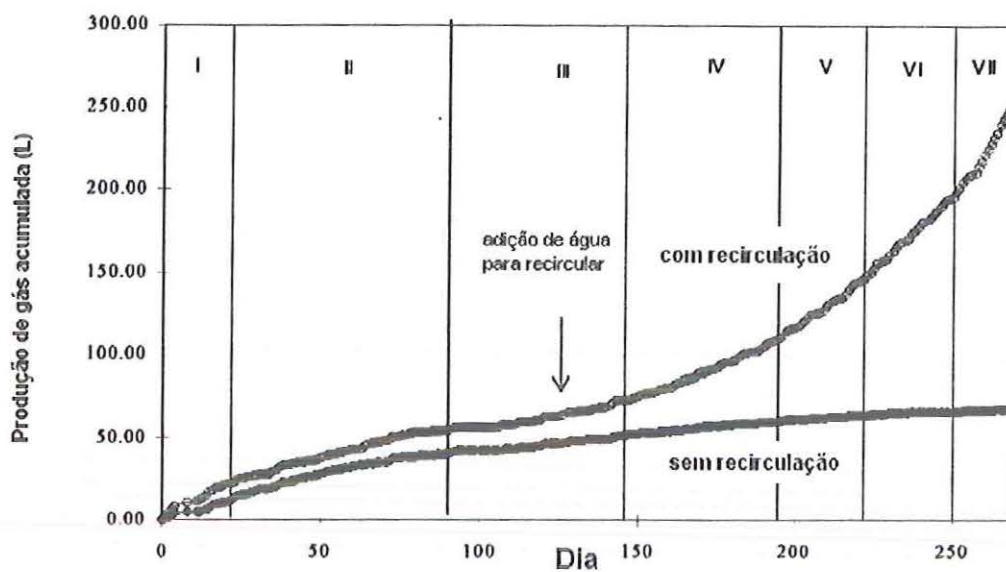


Figura 2: Produção de biogás acumulada para biorreator com recirculação e sem recirculação.

Fonte: adaptado de San e ONay, 2001

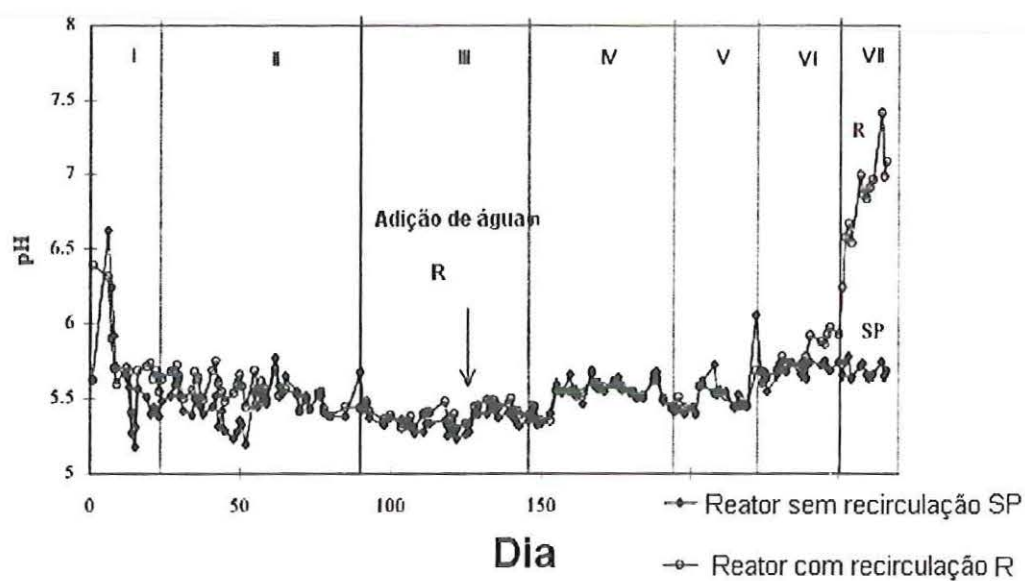


Figura 3: Variação de pH ao longo da degradação de resíduos sólidos urbanos em biorreatores com recirculação e sem recirculação do percolado.

Fonte: adaptado de San e ONay, 2001

Tabela 2: Faixas características de concentrações do percolato em função dos graus de estabilização dos aterros sanitários estudados (convencionais e com recirculação do percolato)

Parâmetros	Fase II		Fase III		Fase IV		Fase V	
	Transição		Formação de ácidos		Metanogênica		Maturação final	
	Convencional	Recirculação	Convencional	Recirculação	Convencional	Recirculação	Convencional	Recirculação
DBO (mgL <sup>-1</sup> )	100-1000	0-6893	1000-57700	0-28000	600-3400	100-10000	4-120	100
DQO (mgL <sup>-1</sup> )	480-18000	20-20000	1500-71000	11600-34550	580-9760	1800-17000	31-900	770-1000
AVT (mgL <sup>-1</sup> como ácido acético)	100-3000	200-2700	3000-18800	0-30730	250-4000	0-3900	0	—
DBO/DQO	0.23-0.87	0.1-0.98	0.4-0.8	0.45-0.95	0.17-0.64	0.05-0.8	0.02-0.13	0.05-0.08
Amônia (mgL <sup>-1</sup> N)	120-125	76-125	2-1030	0-1800	6-430	32-1850	6-430	420-580
pH	6.7	5.4-8.1	4.7-7.7	5.7-7.4	6.3-8.8	5.9-8.6	7.1-8.8	7.4-8.3

Adaptado: Reinhart e Al-Yousfi (1996)

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

A degradação da FORSup foi avaliada em reatores anaeróbios de pequeno porte (3450 mL), com recirculação do percolado a diferentes taxas, com vistas à obtenção de condições operacionais com maior rapidez de partida e degradação equilibrada. Para determinar-se o efeito da recirculação na degradação foi observada a atividade microbiana por meio de medidas do biogás produzido.

A descrição das instalações experimentais, a elaboração do meio de reação, os procedimentos de preenchimento e de operação dos biorreatores e os métodos analíticos empregados estão descritos a seguir.

##### **4.1 Instalações Experimentais**

Para desenvolvimento desta investigação foram usados biorreatores cilíndricos de PVC com capacidade de 3,45 litros.

Adaptados para armazenamento de biogás, amostragem e recirculação do percolado. Para o sistema de coleta e de recirculação do percolado à parte inferior de cada reator foram adaptadas cerca de 20 cm de mangueira de silicone. Às duas saídas da parte superior do reator foram acopladas, para cada uma delas, cerca de 20 cm de mangueira de silicone, vedadas com pinças: uma para amostragem do biogás produzido e outra para entrada do percolado retirado da parte inferior. A recirculação do percolado foi realizada por seringas de 60 mL marca Becton Dickinson, kitassato com volume graduado de 250 mL e bomba a vácuo marca IBAV – modelo BRD2 série 871073. A Figura 4 mostra o reator usado na pesquisa.



Figura 4: Biorreator adaptado para a recirculação do percolado

Os biorreatores foram incubados em cabine climatizada com temperatura de  $35^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.2 Meio de reação

O meio de reação foi constituído pela mistura da fração orgânica de resíduos sólidos urbano padrão (FORSUp) e inóculo. Optou-se pela FORSU<sub>p</sub> devido à diversidade de origem dos resíduos sólidos urbanos, diversidade que acarreta muitas variações quantitativas e qualitativas na composição dos RSU de diferentes locais e em diferentes momentos, o que limita suas aplicações para estudos.

Com o objetivo de minimizar problemas de reprodutibilidade entre experimentos, foi produzida em laboratório, a FORSU<sub>p</sub> utilizada nesta pesquisa, elaborada de acordo com metodologia desenvolvida por PINTO (2000).

A FORSU<sub>p</sub> foi caracterizada por meio de análises de sólidos totais, sólidos totais voláteis e umidade. Foram determinados os percentuais de H, C, S e N através do Analisador Elementar ES 1110 CHNS-O CE Inst, do Instituto de Química de São Carlos–USP.

O inóculo utilizado no meio de reação foi o percolado. O emprego do percolado, como inóculo, pode ser alternativa vantajosa por reduzir: o tempo necessário para degradação, os custos de tratamento e os riscos de poluição do meio ambiente (PINTO, 2000). O percolado usado como inóculo também acelera as atividades das arqueas metanogênicas e contribui para controlar o teor de umidade do substrato (LEITE, 1997a).

Foi utilizado percolado coletado em aterro sanitário com cerca de onze meses de atividade na cidade de Jaboticabal – SP. Esse percolado já havia sido selecionado por Mendonça (2003) por apresentar melhores resultados para adaptação aos resíduos e à atividade metanogênica. O percolado foi caracterizado por meio de análise de sólidos totais, sólidos totais voláteis, DQO, pH, alcalinidade total, ácidos voláteis e NTK.

#### **4.2.1 Preparo do meio de reação**

O meio de reação foi composto pela mistura da FORSU<sub>p</sub> com inóculo.

A preparação da FORSU<sub>p</sub> foi baseada na metodologia desenvolvida por PINTO (2000) para caracterização dos RSU doméstico da cidade de São Carlos –SP.

Na Tabela 3 são apresentados os percentuais de cada componente utilizado na formulação da FORSU<sub>p</sub>.

A FORSU<sub>p</sub> foi fracionada com facas e em triturador tipo Trapp e passada em peneira de 2,5cm. Os componentes arroz, feijão, queijo, tomate, carne e café foram pesados em separado dos demais, para não ficarem triturados demais (pastosos). Os resíduos de varrição (folhas verdes e secas) foram coletados diretamente de árvores e coletado nas ruas mantendo-se um padrão de folhagem.

Tabela 3: Valores percentuais dos elementos utilizados na elaboração da FORSU<sub>up</sub>

Categoria/Elemento	% em massa da categoria na FORSU <sub>up</sub>	% em massa do componente na FORSU <sub>up</sub>
<b>Frutas</b>	30	
Casca/bagaço de laranja		17,8
Casca banana		3,8
Pedaços de tomate		4,6
Casca melancia		3,8
<b>Legumes crus</b>	11	
Casca de batata		5,5
Casca/ pedaços de cebola		2,3
Casca de abobrinha		1,6
Casca/ pedaços de mandioca		1,6
<b>Legumes cozidos</b>	4,0	
Casca/pedaços batata		1,3
Pedaços de mandioca		2,7
<b>Hortaliças</b>	7,2	
Alface		3,8
Repolho		1,9
Couve-flor		1,5
<b>Pão/bolo</b>	3,0	
Pão		3,0
<b>Carne</b>	2,0	
Pele/pedaços de frango cru		1,3
Pedaços de carne de boi cru		0,7
<b>Café</b>	3,5	3,5
<b>Folhas</b>	10,8	
Seca		9,2
Verde		1,6
<b>Queijo</b>	0,4	0,4
<b>Arroz</b>	11,2	11,2
<b>Feijão</b>	4,7	4,7
<b>Macarrão</b>	2,2	2,2
<b>Ossos</b>	1,8	
Frango		1,8
<b>Outros</b>	8,2	
Papel úmido		5,0
Casca de ovo		3,2

Fonte: PINTO (2000)

A FORSU<sub>up</sub> foi preparada em quantidade excedente à necessária devido às perdas que ocorrem durante o processo de trituração. Depois de triturados todos os componentes foram misturados e estocados por 3 dias; a estocagem foi adotada com o

propósito de simular um tempo médio de armazenagem dos resíduos, até a coleta e processamento.

#### 4.2.1.1 Quantidade de inóculo adicionado

A quantidade de inóculo utilizada foi calculada em função dos sólidos totais do meio de reação, tendo como valor de referência a concentração de sólidos totais (ST) de 13%, que correspondeu ao melhor desempenho na partida dos reatores operados por PINTO (2000), compreendido na faixa de valores utilizados em pesquisas de digestão anaeróbia de resíduos sólidos com alta concentração de sólidos (CHYNOWETH & PULLAMMANAPPALLIL 1996; BALDOCHI, 1997; PINTO, 2000).

Para obtenção do volume de inóculo adicionado em cada reator para atingir a concentração de ST de 13% do meio de reação, foi usada a equação (I):

Equação I:

$$\%ST_{MRE} = \frac{(M_R * ST_R) + (M_I * ST_I)}{(M_R + M_I)}$$

Sendo:

- ✓  $M_I$  = massa do inóculo (g);
- ✓  $M_R$  = massa do resíduo (g);
- ✓  $ST_I$  = sólido total do inóculo (%);
- ✓  $ST_{MRE}$  = sólido total do meio de reação (%),
- ✓  $ST_R$  = sólido total do resíduo (%).

### 4.3 Preparo e operação dos biorreatores

Foram utilizados 10 biorreatores em PVC, com volumes totais de 3450 mL e volumes úteis de 2100 mL (30% de *headspace*), e preenchidos com mistura de FORSup e com percolado. Os biorreatores foram operados com diferentes fatores de



recirculação. Fatores de recirculação de 10%, 30% e 50%, calculados a partir do volume de inóculo do biorreator.

A quantidade de inóculo adicionada em cada biorreator, calculada em relação aos sólidos totais do meio de reação e fixada em 13% (equação 1), resultou em 1,600kg de FORSU<sub>p</sub> e 0,8 L de percolado. O meio foi tamponado com bicarbonato de sódio na relação de 0,06g de Na HCO<sub>3</sub> /kg de ST da mistura inóculo e FORSU<sub>p</sub>, conforme indicado por Baldochi (1997), resultando em 19 g de NaHCO<sub>3</sub>. Inicialmente o tampão (T) foi adicionado à FORSU<sub>p</sub>, conforme recomendações de Brumeller e Koster (1989), Baldochi (1997) e Pinto (2000), para evitar aumento de valores de pH acima de 9,0. A adição do inóculo à FORSU<sub>p</sub> foi realizada em bandeja plástica e a mistura transferida para os biorreatores.

Após as atmosferas dos biorreatores serem substituídas por nitrogênio, eles foram fechados e incubados a 35°C ±1°C.

Os biorreatores foram preparados em duplicata.

Dois reatores (RAS e RBS) foram operados sem recirculação, como controle.

Foi preparado um biorreator para controle da atividade metanogênica do inóculo utilizado (RBP), preenchido com as mesmas alíquotas de inóculo e tampão e complementado com 1,6L de água destilada, para igualar o volume de meio aos dos biorreatores com resíduo.

Os reatores com diferentes taxas de variação foram denominados de:

- ✓ RA1 e RB1 com taxa de recirculação de 10 %;
- ✓ RA3 e RB3 com taxa de recirculação de 30%;
- ✓ RA5, RB5 e RC5 com taxa de recirculação de 50%.

Na Tabela 4 são apresentados os valores da FORSU<sub>p</sub>, do inóculo e do tampão utilizados no preenchimento dos biorreatores e os volumes de recirculação usados na operação dos biorreatores.

Tabela 4: Dados dos valores da FORSup, do inóculo, do tampão e dos volumes de recirculação utilizados na preparação dos biorreatores

Reator	FORSup (g)	Inóculo (mL)	Tampão (gNaHCO <sub>3</sub> )	Fator de recirculação..	Volume de recirculação (mL)
RAS	1600	800	19	SR	—
RBS	1600	800	19	SR	—
RA1	1600	800	19	10%	80
RB1	1600	800	19	10%	80
RA3	1600	800	19	30%	240
RB3	1600	800	19	30%	240
RA5	1600	800	19	50%	400
RB5	1600	800	19	50%	400
RC5	1600	800	19	50%	400
RBP	-	800	19	-	-

SR - sem recirculação

Baldochi (1997) recomenda que no início dos ensaios a purga de gases ocorra com maior frequência para evitar rachaduras ou quebras dos frascos provocadas pela elevada pressão dos gases produzidos.

Por esse motivo, a sobrepressão dos gases, foi controlada por meio de purga, feita com agulha de injeção, até que a pressão interna do reator se igualasse à pressão atmosférica. A retirada de amostras para análise da composição do biogás foi realizada após a medida da pressão do frasco e sua respectiva purga.

A recirculação do percolado teve início um dia após a incubação dos biorreatores e realizada a cada 48 horas.

Para recirculação do percolado, uma tampa rosqueada foi adaptada à mangueira de silicone e encaixada no frasco do kitassato. O kitassato, com volume conhecido, foi acoplado à bomba de vácuo marca Becton Dickinson. Quando o volume de percolado desejado era atingido, o percolado era retirado com auxílio de seringas. Encaixava-se a seringa na mangueira de silicone localizada na parte superior do reator, retirava-se a

pinça, injetava-se o percolado e, então, vedava-se a mangueira com a pinça e retirava-se a seringa. O procedimento era repetido até atingir-se o volume de percolado desejado para a recirculação.

Nos primeiros três meses as medidas da composição do biogás foram realizadas diariamente e, após esse período, duas vezes por semana. As análises de pH, DQO, alcalinidade e ácidos voláteis foram realizadas semanalmente. Nos primeiros três meses as determinações das concentrações de ácidos voláteis por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) foram realizadas quinzenalmente e, após esse período, mensalmente.

#### **4.4 Análises e Exames**

Vários parâmetros foram analisados para controle e avaliação da digestão anaeróbia da FORSUP.

A fração orgânica foi caracterizada no início e final dos experimentos pelos seguintes parâmetros: sólidos voláteis totais, umidade, de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2002). DQO de matéria orgânica sólida (GOMES, 1989). Foi realizada análise química elementar para determinar teores de C, N, H e S no Instituto de Química da USP-São Carlos - SP com uso do analisador Elementar ES 1110 CHNS-O CE.

O inóculo foi avaliado quanto aos parâmetros: sólidos totais, sólidos totais voláteis, pH, DQO, nitrogênio total (NTK), alcalinidade total e ácidos voláteis todos de acordo com APHA (2002); ácidos graxos voláteis (acético, butírico, propiônico, isobutírico, valérico, isovalérico) determinados por Cromatografia Líquida de alta eficiência (CLAE) em amostras destiladas empregando-se metodologia utilizada pelo Laboratório de Processos Biológicos do Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC-USP (LPB).

O meio de reação foi caracterizado no início e no final dos experimentos, por meio dos seguintes parâmetros: sólidos totais, sólidos totais voláteis, umidade, DQO de matéria orgânica sólida, metais, pH, análise química elementar do C, H, N, e S, de acordo com os métodos citados anteriormente.

A composição do biogás (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) foi determinada por cromatografia gasosa, com o método utilizado no Laboratório de Processos Biológicos – LPB/EESC-USP.

Para avaliação do percolado, foram monitorados os seguintes parâmetros: DQO, pH, alcalinidade total e ácidos voláteis de acordo com APHA (2002). Os ácidos graxos voláteis (acético, butírico, propiônico, isobutírico, valérico, isovalérico) foram determinados por cromatografia líquida de alta eficiência em amostras destiladas, empregando-se metodologia utilizada pelo LPB-SHS-EESC.

Foram realizados exames por microscopias ótica comum, microscopia de contraste de fase e de fluorescência, com o microscópio Olympus modelo BHT (ocular 10, objetiva 100 zoom 1,25), munido de sistema de câmara de vídeo Optronics, acoplado a um computador, para observação da imagem no programa Imagem-Pró plus, versão 3.0 para Windows, com unidade de controle de exposição Olympus, instalado no LPB – SHS - EESC. Para a microscopia de varredura, utilizou-se o microscópio Zeiss DSM-960 do Instituto de Química da USP – São Carlos.

#### **4.4.1 Análises**

##### **4.4.1.1 Análise cromatográfica gasosa**

Para realizar a cromatografia gasosa as amostras gasosas foram coletadas no momento da análise, utilizando-se seringas *gas-tight* com trava (*pressure lock*).

##### **Procedimento**

Com auxílio de seringas *gas-tight* foram retirados volumes de 500 µL do *head space* dos biorreatores e injetados no cromatógrafo Gow Mac, série 150, sob as seguintes condições: coluna de aço inox, de 2,0 m x 1/4”, empacotada com Porapak Q (80-100 Mesh) e detector de condutividade térmica. Como gás de arraste foi usado hidrogênio ultrapuro-up, com fluxo de 60 mL/min e pressão de 45 kgf/cm<sup>2</sup> no

controlador secundário. Nesse equipamento foram realizadas as análises de nitrogênio, dióxido de carbono e metano.

#### 4.4.1.2 Análise Cromatográfica Líquida de Alta Eficiência

As amostras líquidas foram armazenadas em frascos de vidro de 5 mL com tampa e congeladas até o momento da análise.

##### Preparação da amostra

Os padrões e amostras foram destilados conforme metodologia desenvolvida por MORAES (1999)<sup>6</sup>, os padrões foram preparados em meio contendo humitos para assemelharem-se ao máximo às amostras.

Um volume conhecido da amostra era transferido para um microdestilador, acidificado e aquecido. O destilado era recebido em solução de NaOH (1 mL) e, após resfriamento, diluído em balão volumétrico de 2,00 mL.

Depois de destiladas, as amostras foram filtradas com membrana de acetato 0,2 µm para evitar entupimento da coluna cromatográfica.

##### Procedimento

A análise dos ácidos voláteis foi realizada utilizando-se o sistema Shimadzu para *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) em português Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE); foi utilizado o detector o espectrofotômetro U.V. com leitura a 210 nm, coluna cromatográfica capilar, HPX-87H Aminex® 30,0cmx7,8 mm.

---

<sup>6</sup> MORAES, E. (1999) – Trabalho realizado no laboratório de processos biológicos – Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP. (não publicado)

## 4.4.2 Exames Microbiológicos

### 4.4.2.1 Microscopia ótica

As amostras de percolado foram observadas em lâminas com agar e recobertas por lamínulas, de acordo com técnica utilizada no LPB-SHS-EESC-USP. Algumas vezes as amostras precisaram ser diluídas em água Milli-Q para redução da interferência da matéria orgânica presente no percolado.

### 4.4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (M.E.V.)

A microscopia de varredura foi realizada com percolado retirado do biorreator com a maior produção de metano (RA1), no último dia de operação.

#### Preparação da amostra

Utilizou-se o método de secagem por Hexametildisilazane (HMDS), descrito por Nation (1983), e adaptado por Araújo (1995) para biofilmes bacterianos metanogênicos. O procedimento adotado está descrito a seguir.

A amostra de percolado foi lavada com solução de NaCl 0,85%. O percolado era misturado à solução e depois colocado para repousar por 10 minutos; só então o sobrenadante era descartado. Esse procedimento foi repetido três vezes. O sedimento foi fixado com glutaraldeído (2,5%) em solução tampão fosfato 0,1 M (pH 7,3) e deixado em repouso por um período de 12 horas. Após esse período o material era lavado com tampão fosfato (gelado) 0,1M (pH 7,8) por 1 min, repetindo-se esse procedimento por 3 vezes. Para desidratação o material foi misturado com uma série gradativa de soluções etanólicas (50%, 70%, 80%, 90%, 95% e 100%), durante 10 minutos para cada.

O material foi então secado em capela com uma quantidade de HMDS inferior a 0,5 mL durante 30s e, a seguir deixado secar ao ar por 10 min. Essa operação foi repetida duas vezes. O material foi colocado em um suporte próprio para M.E.V., utilizando-se esmalte incolor e, posteriormente, foi colocado para secar em temperatura menor que 60°C, durante, no mínimo, 2 horas. A base do suporte foi revestida com tinta

de prata, e a superfície da amostra, com ouro. O exame foi realizado no Instituto de Química da USP–São Carlos em microscópio eletrônico modelo Zeiss DSM-960.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos experimentos feitos para este trabalho constam deste capítulo.

A apresentação dos resultados está dividida em: características da FORSU e do inóculo; características do meio de reação, monitoramento dos biorreatores por meio das análises de pH, alcalinidade, ácidos voláteis e DQO, eficiência dos biorreatores (composição do biogás por cromatografia gasosa) e exames microbiológicos. Estão descritos, também, os problemas operacionais ocorridos durante a realização deste experimento.

### 5.1 Caracterização da FORSU e do inóculo

A FORSU foi preparada conforme metodologia descrita por Pinto (2000).

A FORSU foi caracterizada pelos seguintes parâmetros: umidade, sólidos totais e sólidos voláteis totais, DQO sólida e análise química elementar (C, H, N, S). O Instituto de Química da USP de São Carlos realizou a análise química elementar. Os parâmetros encontram-se na Tabela 5.

Na Tabela 6 estão os resultados das características físico-químicas do inóculo empregado.

O meio de reação, composto pela mistura da FORSU e do inóculo, está descrito no capítulo Material e Métodos. Na Tabela 7 encontram-se os resultados da análise química elementar dos teores de C, H, N e S, DQO sólida, umidade e sólidos totais e voláteis totais do meio de reação utilizado para a partida dos biorreatores.



Tabela 5: Valores dos parâmetros das análises realizadas na FORSup preparada para o meio de reação

Parâmetros	FORSup
ST (%)	19
STV (%)	16
DQO (gO <sub>2</sub> /kgRS)	437
Umidade (%)	81
N(%)	3
C(%)	42
H(%)	5
S(%)	0

RS – resíduo seco

Tabela 6: Valores das características físico-químicas do inóculo empregado no meio de reação

Parâmetros	Percolado
S.T. (g/L)	13
S.T.V. (g/L)	2
DQO (g/L)	14
Alcalinidade Total (g CaCO <sub>3</sub> /L)	6
Ácidos Voláteis (g /L)	3
pH	7,68
Nitrogênio total (gN/L)	3

Tabela 7: Valores dos parâmetros analisados do meio de reação dos biorreatores empregados na pesquisa

Parâmetros	FORSUp
ST (%)	13
STV (%)	10
DQO (gO <sub>2</sub> /kgRS)	656
Umidade (%)	87
N(%)	3
C(%)	48
H(%)	6
S(%)	0

RS – resíduo seco

O alto teor de umidade é devido ao fato de a FORSU<sub>p</sub> ser constituída unicamente por matéria orgânica putrescível. A alta umidade do meio de reação não interferiu na produção de metano, porque, inicialmente, todos os biorreatores apresentaram alta percentagem de metano no biogás, cerca de 50%, em mais ou menos 20 dias de operação. Fato este também detectado por Pinto (2000) em cuja pesquisa já havia observado que o teor de umidade não interfere na produção de metano e que o biorreator operando com 88% de umidade apresentou produção de metano superior a do biorreator com 74% de umidade.

Kasali et al (1990) indicam que a faixa ideal de umidade fica em torno de 60 a 75%, e que valores superiores a 80% causam significativa queda na produção de metano.

### **5.2 Monitoramento dos biorreatores tratando a FORSU<sub>p</sub> inoculada com percolado variando a taxa de recirculação**

O monitoramento foi realizado por meio do comportamento dos parâmetros físico-químicos nos percolados dos biorreatores operados conforme descrito no item 4.3

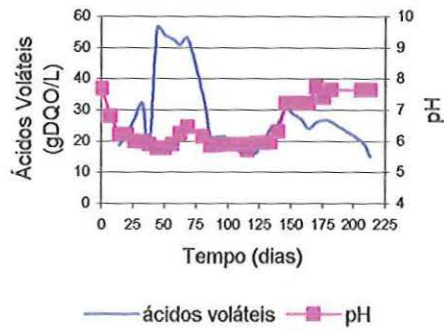
(Tabela 8). Isto permitiu avaliar a influência da recirculação e suas respectivas variações nos biorreatores degradando FORSU<sub>p</sub>. Além do mais, foram extraídas amostras dos percolados dos biorreatores, para através de microscopia verificar a biodiversidade dos microrganismos presentes ao longo da operação.

Tabela 8: Reatores operados (siglas) conforme réplica e taxa de recirculação utilizada

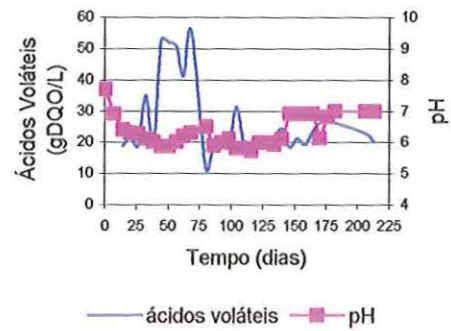
Reator – sigla utilizada	Fator de recirculação
RAS	Sem recirculação
RBS	Sem recirculação
RA1	10 % de recirculação
RA3	30 % de recirculação
RB3	30 % de recirculação
RB5	50 % de recirculação
RC5	50 % de recirculação
RBP	Branco

### 5.2.1 Análise dos parâmetros físico-químicos: pH, DQO, ácidos voláteis e alcalinidade

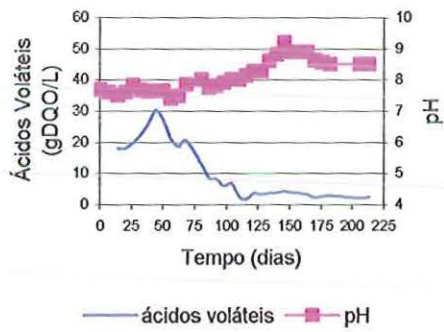
A relação entre pH, concentração de ácidos voláteis e concentração de DQO foi observada durante todo o processo de degradação. A Figura 5 apresenta as variações de pH e das concentrações dos ácidos voláteis, ao longo da pesquisa.



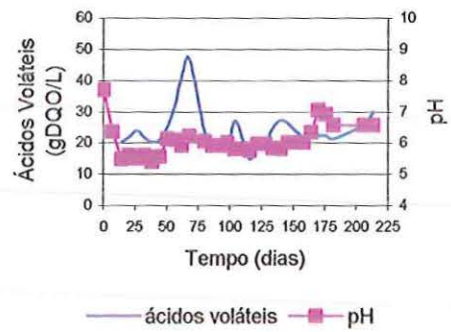
(a)



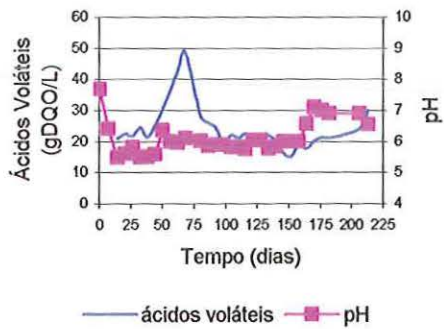
(b)



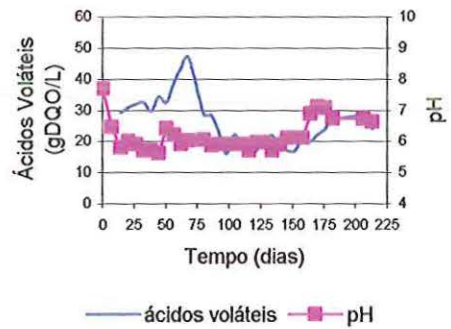
(c)



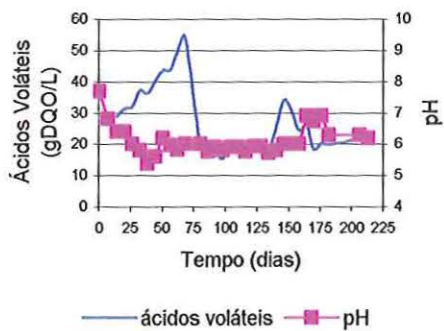
(d)



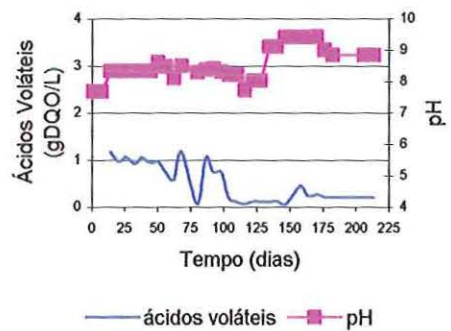
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 5: Variação dos parâmetros ácidos voláteis e pH para os reatores ao longo da operação: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP

Os ácidos orgânicos voláteis aumentaram para valores próximos de 50gDQO/L nos primeiros dias de operação nos reatores de controle e nos reatores com taxa de recirculação de 30% e 50% do volume de percolado. Nestes reatores o pH decresceu para valores abaixo de 6,0 devido ao acúmulo de ácidos voláteis no sistema. Nos reatores controle, após 136 dias de operação a concentração de ácidos voláteis decresceu.

No reator com taxa de recirculação de 10%, os ácidos voláteis atingiram concentração máxima de 30gDQO/L, em cerca de 40 dias de operação. Neste reator não foi observada inibição do processo de digestão e, no final da operação, a concentração de ácidos voláteis ficou em torno de 6gDQO/L.

A elevada concentração de ácidos voláteis nos reatores controle, provavelmente, é função da alta umidade do meio de reação. Kasali et al (1990) observaram aumento nas concentrações dos ácidos acético, propiônico, butírico e isobutírico em presença da maior umidade existente no início do experimento de degradação anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos.

Veeken et al (2000) relataram que o aumento da taxa de recirculação resulta em maior transporte de massa de ácidos voláteis das regiões dos resíduos para o inóculo. Outro fator para a elevada quantidade de ácidos voláteis é a composição da FORSUP, formada principalmente de matéria orgânica putrescível e, de acordo com Borzacconi et al (1997), altas percentagens de matéria orgânica putrescível ocasionam acúmulo de ácidos voláteis e pH extremamente baixos.

O gráfico (Figura 6) mostra que a variação dos ácidos voláteis ao longo da operação foi similar em todos os reatores; a diferença está nas concentrações dos ácidos voláteis.

Os reatores RAS e RBS apresentaram acúmulo de ácidos entre 50 e 75 dias de operação como mostra a Figura 6. As maiores concentrações foram de ácidos butírico e acético alcançando valores em torno de 160 gDQO/L e 70 gDQO/L, respectivamente. A variação das concentrações de ácidos voláteis e pH nos reatores RAS e RBS estão apresentadas nas Figura 7 e Figura 8. A alta concentração de ácidos nesses reatores acarretou queda dos valores de pH no sistema entre 25° e 134° dias de operação.

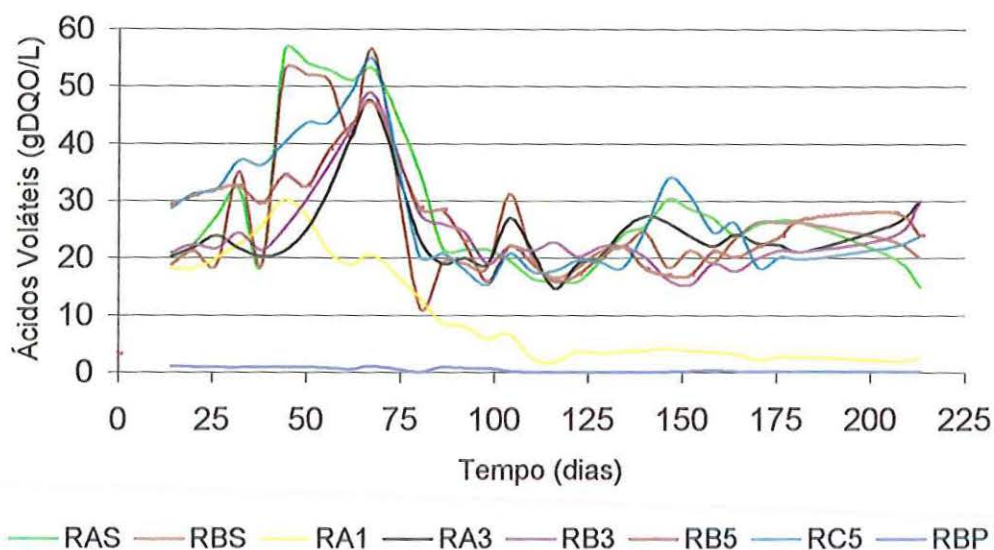


Figura 6: Variação dos ácidos voláteis totais ao longo do tempo em todos os biorreatores

Nesta investigação foram notadas altas concentrações dos ácidos: butírico, propiônico e acetato no percolado dos biorreatores. A variação quantitativa dos ácidos voláteis encontra-se nas Figuras 7 a 13.

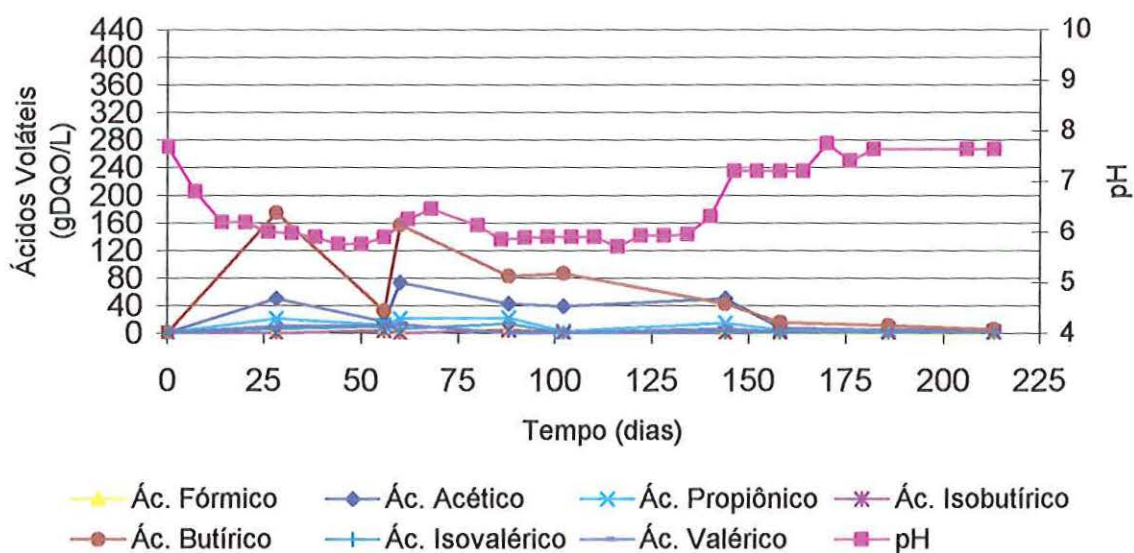


Figura 7: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RAS



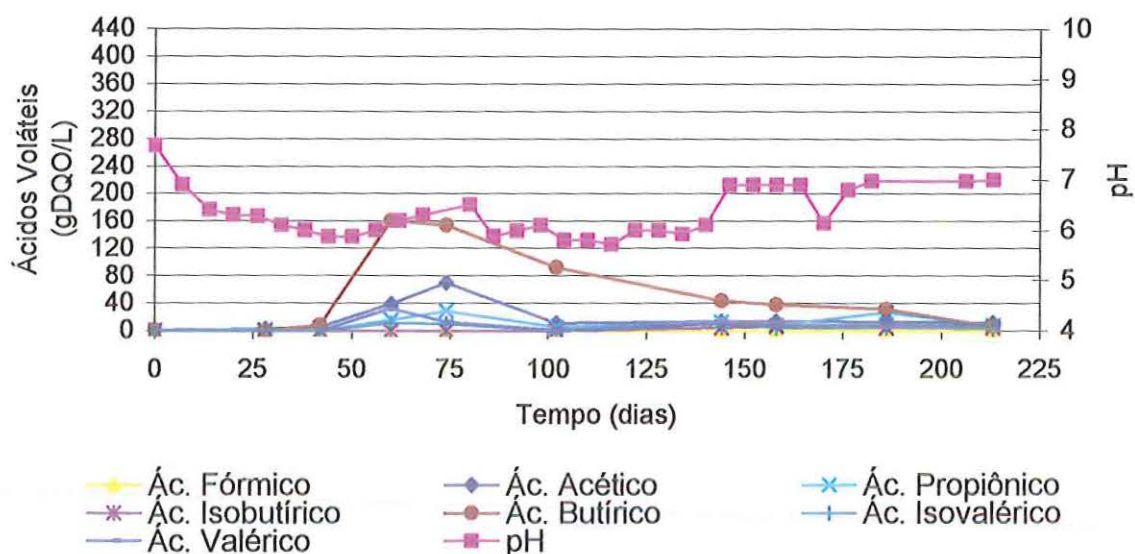


Figura 8: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RBS

No reator RA1 a concentração de ácidos do reator RA1 também apresentou pico aos 60 dias de operação, como pode ser visto nas Figura 6 e Figura 9. Foram observados maiores valores dos ácidos acético, propiônico e isovalérico, com concentrações de 35gDQO/L, 44,68gDQO/L e 22,28gDQO/L, respectivamente.

No reator RA1, houve aumento de ácido propiônico, que após 60 dias de digestão, chegou a atingir cerca de 44gDQO/L, mas no final do experimento decresceu para valores de 4gDQO/L. O acúmulo de ácido propiônico não afetou a rota metabólica da produção de metano do reator RA1.

A análise da variação dos ácidos voláteis no reator RA1 permite considerar que a taxa de produção de ácidos voláteis foi igual à taxa de consumo destes.

Dentre os ácidos voláteis quantitativamente analisados por Baldochi (1990) os mais representativos também foram os ácidos: acético, propiônico e o butírico.

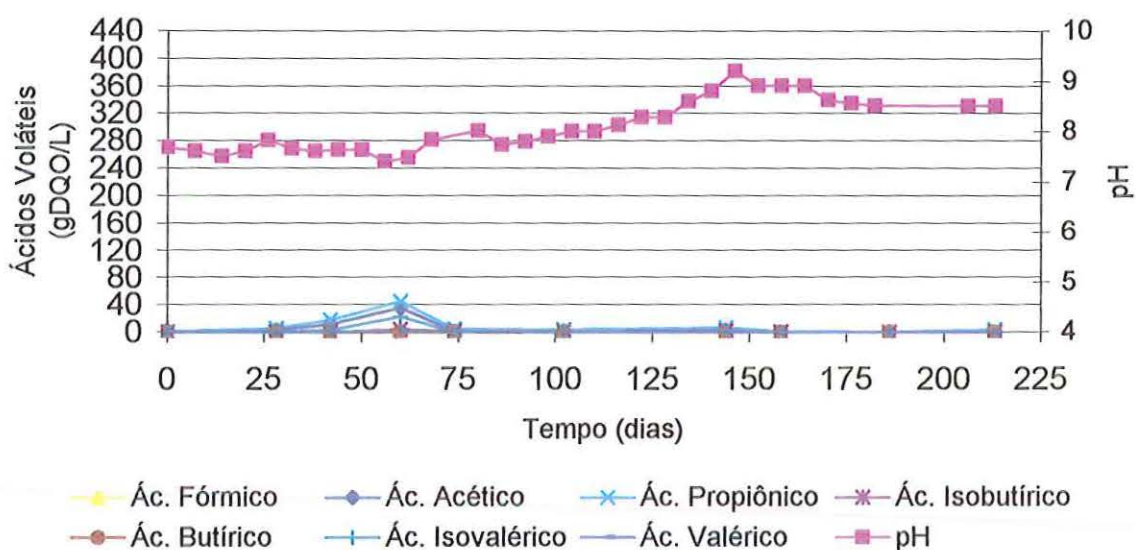


Figura 9: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RA1

Durante o experimento os reatores RA3, RB3, RB5 e RC5 apresentaram elevado acúmulo de ácidos, principalmente butírico e pH abaixo de 6,0, o qual inibiu a hidrólise e a metanogênese. Estudos realizados por Wang et al (1997) confirmaram que altas concentrações de ácido butírico inibem produção de metano. A variação da concentração dos ácidos voláteis e pH nos biorreatores RA3 e RB3 podem ser vistas na Figura 10 e Figura 11, respectivamente.

Nos reatores RA3 e RB3 a concentração de ácido butírico de 200gDQO/L causou queda nos valores de pH. O ácido butírico permaneceu acumulado no reator RA3 em torno dos 60-74 dias de operação; a partir de então observou-se consumo dos ácidos. No final do experimento, porém a concentração de ácido butírico no reator RA3 permaneceu em valores críticos, em torno de 40gDQO/L.



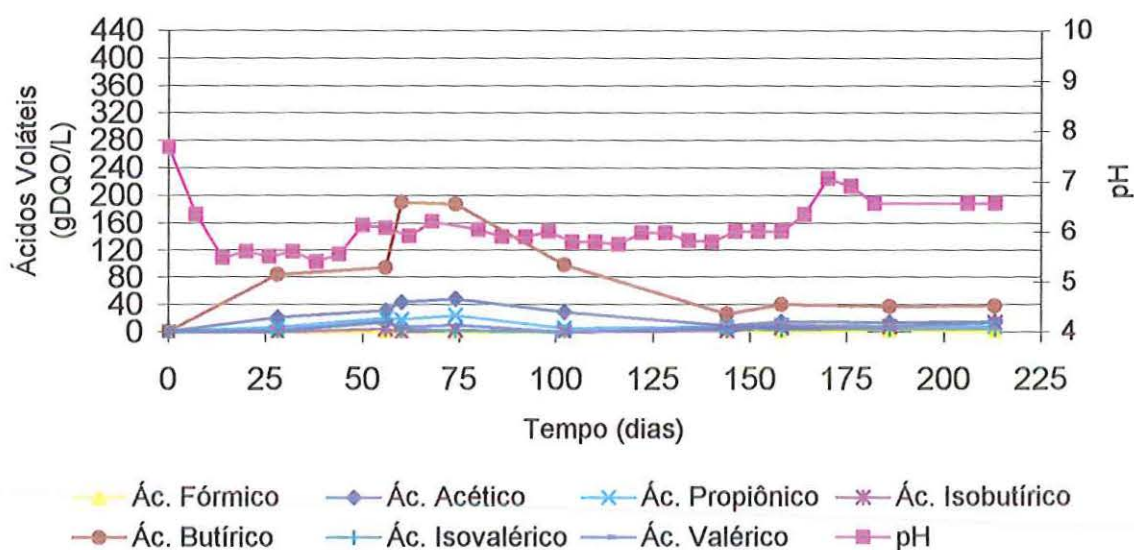


Figura 10: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RA3

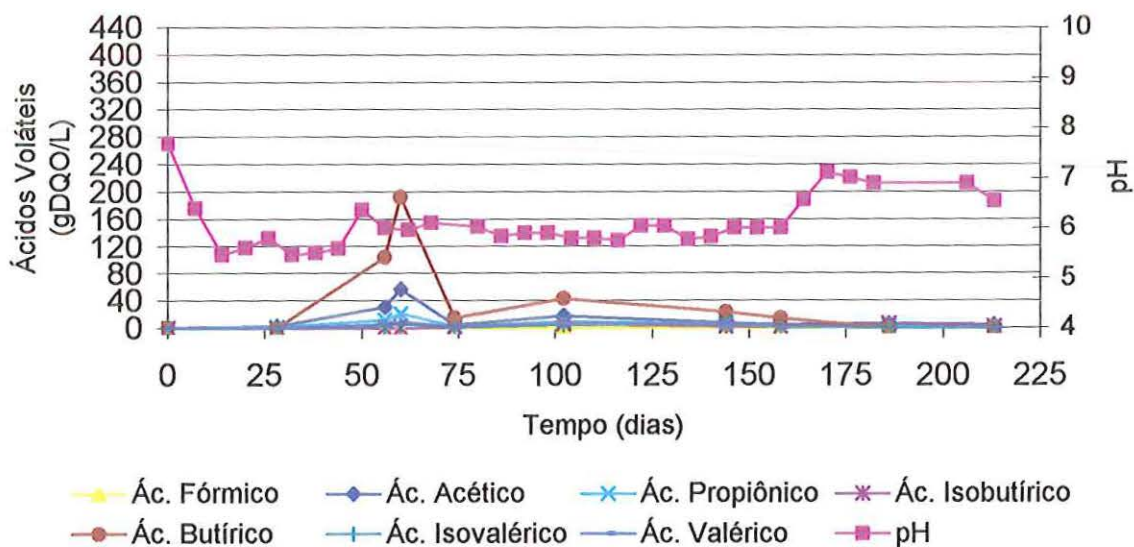


Figura 11: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RB3

No reator RB5, aos 25 dias de operação, a concentração dos ácidos atingiu altos níveis. As maiores concentrações foram dos ácidos butírico, acético e propiônico de 122gDQO/L, 76 gDQO/L e 17 gDQO/L, respectivamente. O acúmulo de ácidos ocasionou queda do pH e afetou a produção de metano.

Variações na concentração dos ácidos voláteis e do pH do reator RB5 podem ser analisadas na Figura 12.

No reator RC5, tal como nos demais reatores, o pico da concentração de ácidos voláteis aconteceu aos 60 dias de operação, mas, com 25 dias de operação já apresentava elevadas concentrações de ácidos, conforme apresentado na Figura 13. As maiores concentrações foram de ácidos butírico, acético e propiônico, respectivamente.

No final do experimento foi observado consumo de ácidos, mas em concentrações ainda altas, principalmente de ácido butírico, em torno de 37 gDQO/L.

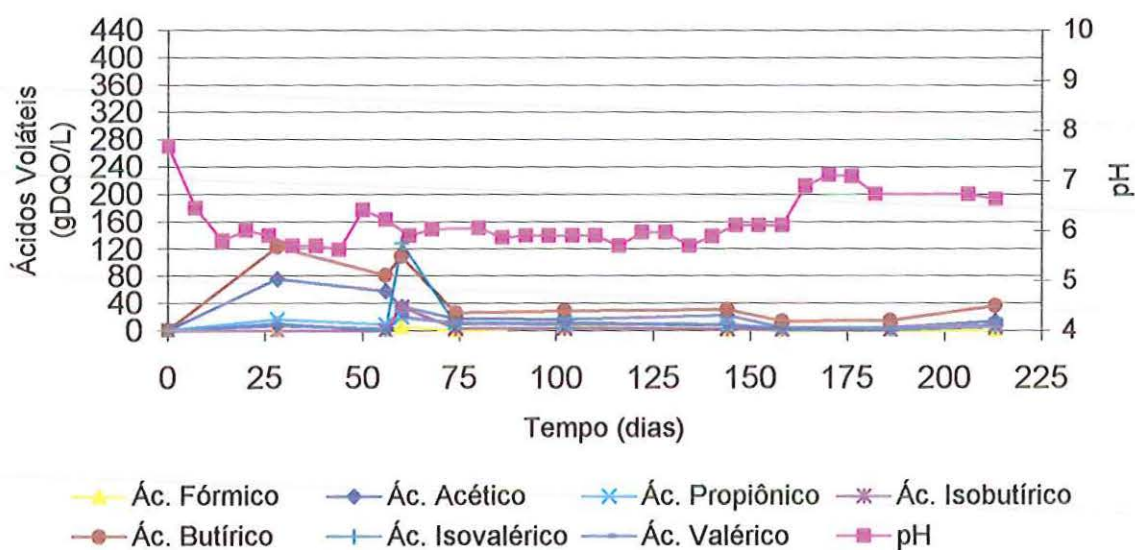


Figura 12: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RB5

Vavilin et al (2002) desenvolveram um modelo matemático para avaliar os efeitos dos ácidos voláteis no equilíbrio entre taxas de hidrólise, acetogênese e metanogênese durante a digestão anaeróbia de resíduo sólido e concluíram que a digestão anaeróbia do resíduo sólido em batelada foi totalmente inibida devido à alta concentração inicial de ácidos voláteis.

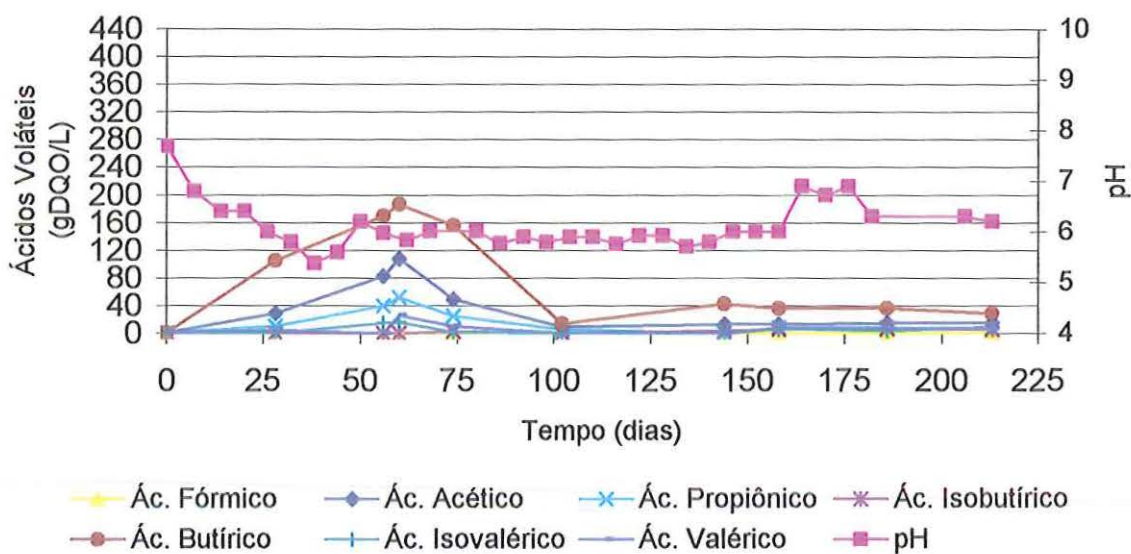


Figura 13: Variação da concentração dos ácidos voláteis e pH no biorreator RC5

A variação da DQO nos percolados dos biorreatores apresentou comportamento similar ao dos ácidos voláteis.

Nos primeiros 60 dias de operação a DQO atingiu valores significativos, em torno de 380g/L. O aumento da DQO acarretou queda do pH e afetou o equilíbrio dos reatores RAS, RBS, RA3, RB3, RB5 e RC5, mas não chegou a afetar o equilíbrio do ecossistema do reator RA1. A Figura 15 apresenta as variações das concentrações de DQO e ácidos voláteis durante a degradação anaeróbia da FORSU<sub>p</sub>. Os gráficos mostram, que as concentrações de ácidos foram proporcionais às de DQO. Contudo, nos reatores RA3, RB3, RB5 e RC5 após 130 dias de operação, houve decréscimo da concentração de DQO mas, embora diminuíssem bastante, as concentrações de ácidos voláteis permaneceram com valores significativos. Analogamente ao ocorrido com os ácidos voláteis, os picos de concentração das DQO foram coincidentes, como mostra a Figura 14.

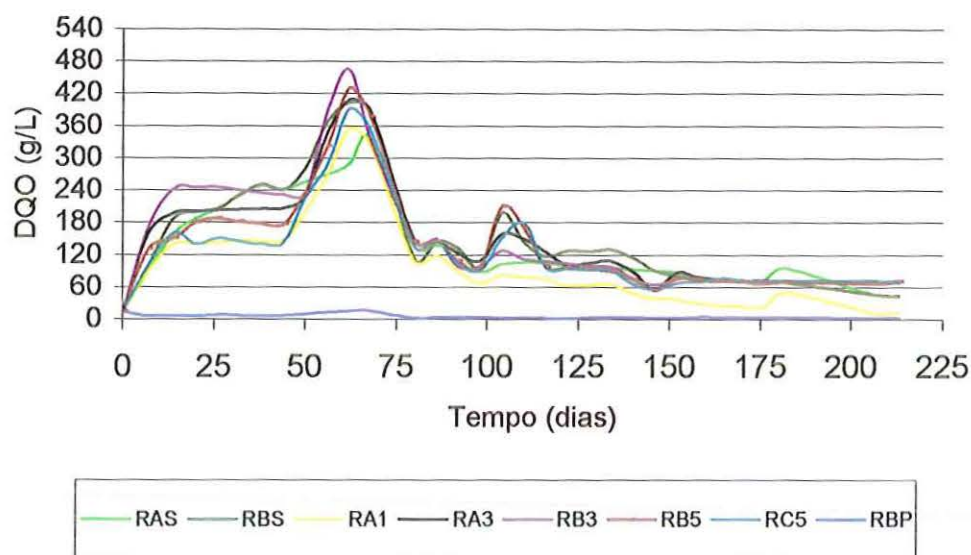


Figura 14: Variação da DQO em função do tempo de operação nos biorreatores

O aumento nas concentrações de DQO e ácidos voláteis ocasionaram o consumo da alcalinidade existente nos reatores.

Os reatores apresentaram ápice de concentração da alcalinidade total com cerca de 60 dias de operação. Após esse período de operação houve decréscimo da alcalinidade devido à produção de DQO e ácidos voláteis. No reator RA1 o pH manteve-se constante. O mesmo não aconteceu nos reatores RAS, RBS, RA3, RB3, RB5 e RC5, nos quais o pH decresceu a ponto de ser necessário o tamponamento.

A Figura 16 apresenta a variação da alcalinidade nos reatores, ao longo da operação.

A adição de tampão aos reatores de controle reduziu o acúmulo de ácidos e, aproximadamente aos 175 dias de operação, aconteceu equilíbrio do processo, momento em que houve aumento de pH para valores acima de 7,0.

Nos reatores com taxa de 30 e 50% de recirculação não houve reação ao tampão utilizado. Durante todo o experimento o pH teve valores menores que 6,0 mesmo com adição de tampão.

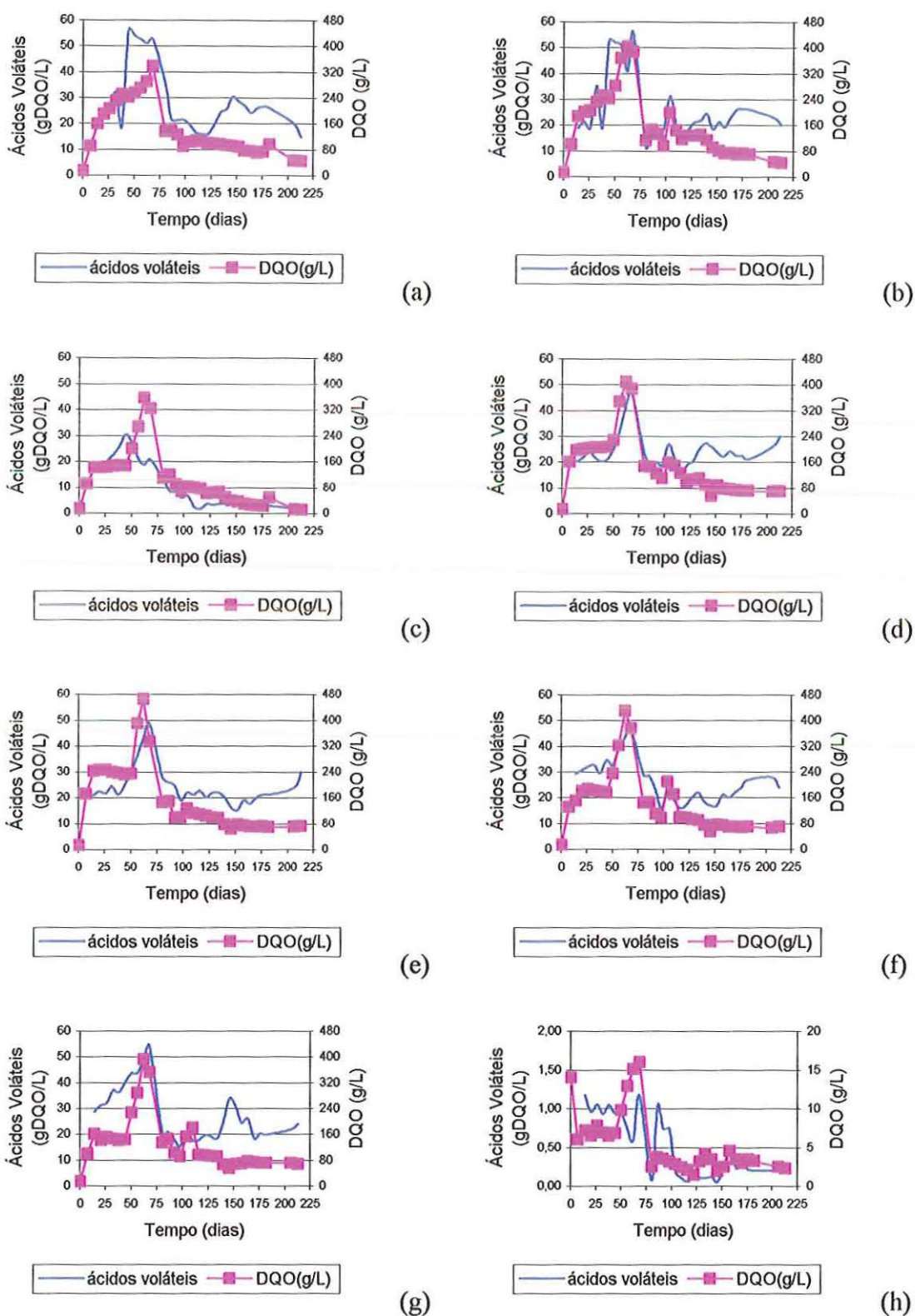


Figura 15: Evoluções temporais dos ácidos voláteis e DQO nos líquidos percolados dos biorreatores: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP.

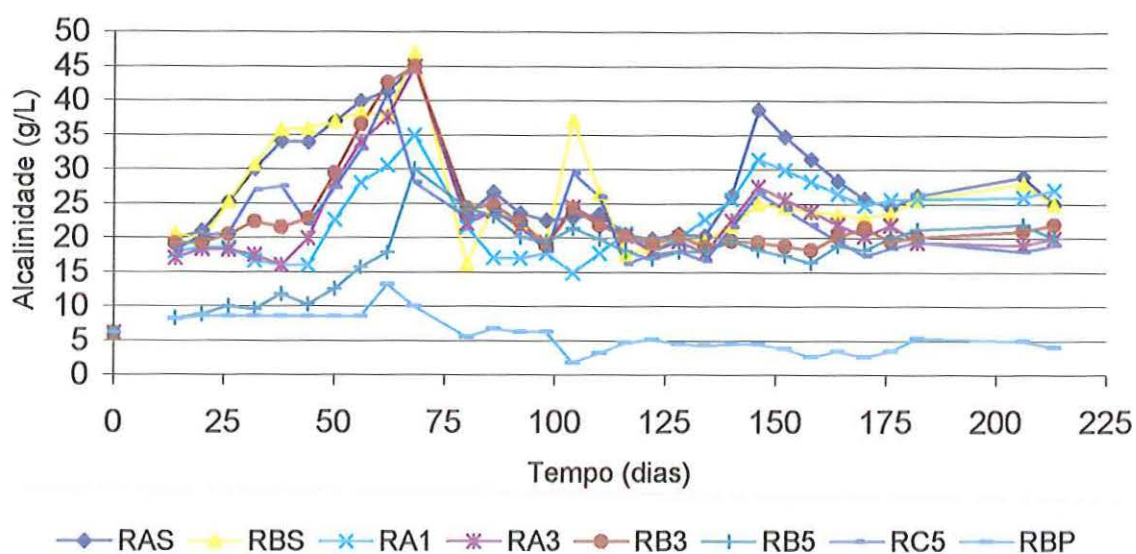


Figura 16: Variação temporal da alcalinidade nos biorreatores

Kayhanian et al (1991) consideram a manutenção do pH entre 6,6 e 7,4 como ótima para balanceamento entre produções de ácidos e de metano e favorável para as arqueas metanogênicas. O reator RA1 apresentou pH em torno de 7,6–8, ou seja, acima da faixa ideal, esse fato porém não interferiu na produção de metano. Em seu trabalho, Pinto (2000) obteve satisfatória produção de metano com pH em torno de 8,3.

Na Tabela 9 encontram-se as características físico-químicas do percolado dos biorreatores, no final do ensaio.

Tabela 9: Características físico-químicas do percolado dos biorreatores no final do experimento

Parâmetros	RAS	RBS	RA1	RA3	RB3	RB5	RC5	RBP
DQO (g/L)	69,35	70,33	13,49	47	47	67	72	2,50
pH	7,63	6,98	8,51	6,56	6,89	6,72	6,30	8,83
Alcalinidade total (gCaCO <sub>3</sub> /L)	26,21	25,59	25,71	19,35	20,10	21,22	19,47	5,35
Ácidos voláteis (gDQO/L)	26,15	26,15	2,83	21,10	21,10	26,85	19,70	0,20

Os reatores com taxa de recirculação de 30 e 50% em volume de percolado apresentaram comportamentos semelhantes nos parâmetros físico-químicos analisados.

A análise dos parâmetros indica que devido à inibição dos microrganismos, a alta taxa de recirculação provocou alteração nesses ecossistemas. Esses reatores apresentaram acúmulo de ácidos voláteis e baixo pH; a alcalinidade do sistema e a adição do tampão não foram suficientes para restabelecer o equilíbrio desses ecossistemas.

Chinoweth e Mah (1971) estudaram a formação dos ácidos voláteis na digestão anaeróbia e verificaram que butirato e formiato inibem a digestão.

Lima (1988), que testou algumas opções de recirculação de percolado em aterro sanitário, observou que a recirculação do percolado gera alta quantidade de ácidos voláteis que inibem o processo, principalmente a metanogênese.

Na pesquisa de Xu et al (2003) a degradação da fração orgânica de resíduos sólidos foi realizada em reatores de uma fase com teor de umidade de 88% - um reator sem recirculação e outro com taxa de recirculação de 1,0mL/min. Eles observaram que, no quarto dia de operação houve aumento da concentração de ácidos voláteis no reator com recirculação enquanto no reator sem recirculação o aumento foi por eles observados a partir do nono dia de operação.

Os biorreatores que sofreram inibição apresentaram altos valores de DQO no final do ensaio, provavelmente como consequência das altas concentrações de ácidos voláteis presentes no percolado nessa fase final. O biorreator RA1, no final do ensaio apresentou DQO com valor semelhante o da DQO do percolado empregado como inóculo.

### **5.3 Eficiência dos biorreatores**

A eficiência dos biorreatores foi avaliada pela análise da produção e composição de metano no biogás.

#### **5.3.1 Análise da Produção de gases**

No reator branco mediu-se a percentagem de CH<sub>4</sub> produzida no biogás devido à matéria orgânica remanescente do inóculo. A percentagem máxima de CH<sub>4</sub> no biogás do *head space* desse reator foi 10%, com cerca de nove dias de operação; a partir de

então foram alcançadas percentagens desprezíveis, o que indica ter havido degradação da matéria orgânica remanescente no inóculo.

O início da produção de metano aconteceu no 15º dia de operação, em todos os reatores. A produção do metano ao longo da operação em todos os biorreatores está representada na Figura 17.

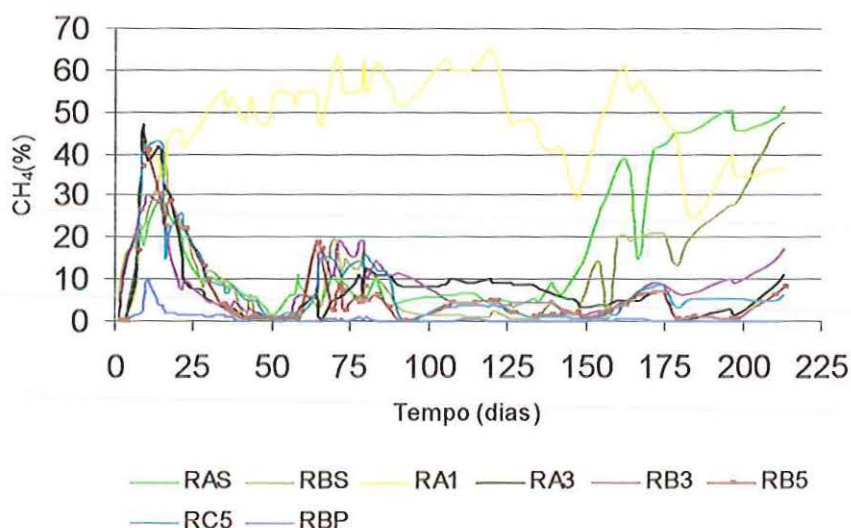


Figura 17: Variação da porcentagem de gás metano no biogás dos biorreatores

A remoção da matéria orgânica, indiretamente medida pelo decréscimo da DQO, influenciou diretamente a geração de gás dos biorreatores. A porcentagem de metano inicialmente presente na composição do biogás - primeiros quinze dias de operação - resultou da matéria orgânica remanescente do inóculo. A Figura 18 mostra a influência da DQO na produção de metano.

Os reatores de controle apresentaram produção crescente de metano até 25 dias após o início da operação, alcançando o máximo de 50 % de  $\text{CH}_4$  na composição de biogás; a partir daí a produção de metano começou a decrescer. Provavelmente a queda do pH e o acúmulo de ácidos voláteis inibiram a metanogênese. Após 175 dias de operação notou-se a recuperação destes biorreatores através do aumento da porcentagem de  $\text{CH}_4$  no biogás.

Estas características indicaram que os reatores de controle estavam começando a Fase III - fase de produção acelerada de metano, descrita por Barlaz (1998) e Barlaz et al (1989) no final da operação.



O reator (RA1) operou com produção crescente de metano 30 dias após o início da operação, o qual conservou-se estável na faixa de  $50 \pm 10\%$  de  $\text{CH}_4$  até o 170º dia de operação, quando percentagem de metano do biogás começou a diminuir.

Picanço (2003)<sup>7</sup>, que operou biorreatores com recirculação de percolado em sistema de duas fases, e taxa de recirculação de 10% de volume de percolado também obteve partida semelhante ao biorreator RA1.

Provavelmente, após 170 dias de operação esse reator entrou na fase de produção desacelerada de metano, definida por Barlaz (1998) e Barlaz et al (1989). Com 70 dias de operação, a percentagem de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  no biogás atingiu o máximo de  $63\% \pm 10\%$  e  $30\% \pm 10\%$  respectivamente.

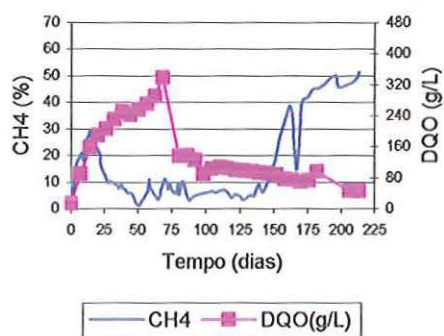
Similarmente aos reatores de controle, os reatores RA3, RB3, RB5 e RC5 também apresentaram pico de  $\text{CH}_4$  na composição do biogás nos primeiros 25 dias de operação. Assim pode-se afirmar que, no início da degradação da matéria orgânica, não houve influência da recirculação pois, provavelmente, o metano inicialmente produzido resultou da matéria orgânica remanescente do percolado.

A concentração máxima de DQO ocorreu após 60 dias de operação; a partir de então a DQO decresceu e a composição de metano no biogás dos biorreatores aumentou. Esse comportamento foi observado, inclusive, nos reatores com 30 e 50% de taxa de recirculação, os quais apresentavam acúmulo de ácidos e pH abaixo da faixa ideal. No final do experimento desses biorreatores, observou-se princípio de aumento de  $\text{CH}_4$  na composição do biogás.

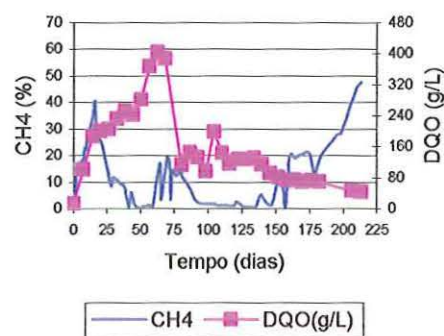
Quanto à queda da concentração de DQO nos reatores de controle (RAS e RBS), a concentração de  $\text{CH}_4$  no *head space* alcançou valores entre 12 a 17%.

---

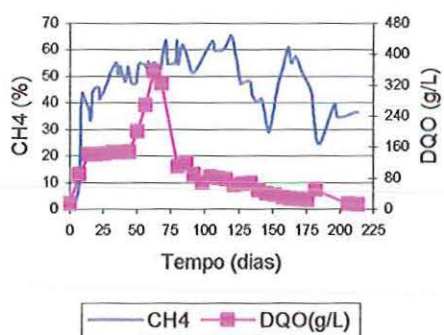
<sup>7</sup> PIKANÇO, A. P. (2003) Influência da recirculação do percolado em biorreatores degradando a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos em sistema de duas fases. Tese de Doutorado. Trabalho em andamento.



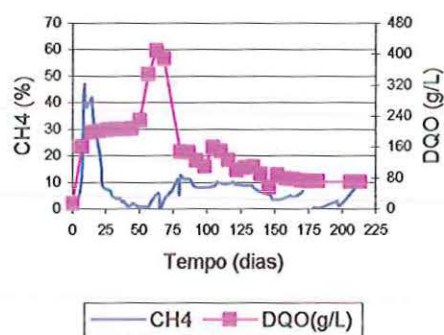
(a)



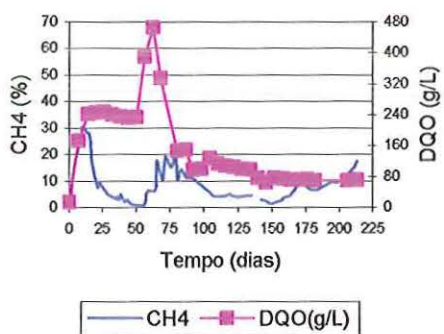
(b)



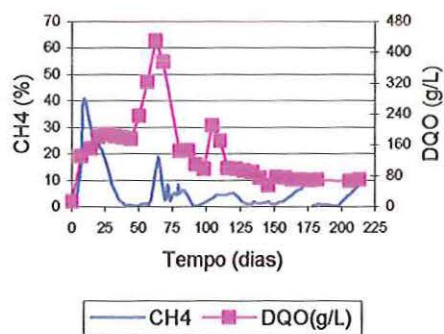
(c)



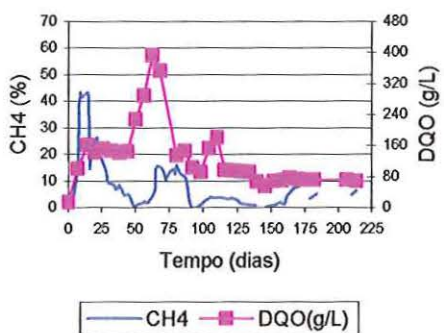
(d)



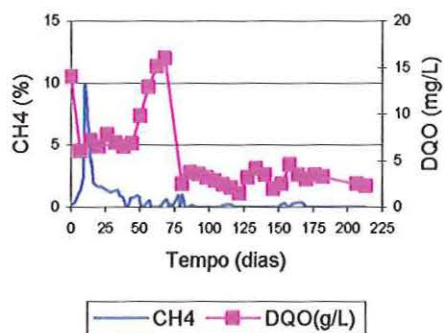
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 18: Comportamento da DQO e produção de metano ao longo do tempo de operação nos reatores: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP.

O *head space* dos biorreatores com acúmulo de ácidos voláteis apresentaram alta percentagem de  $N_2$ . A Figura 19 apresenta a composição dos gases presente no *head space* dos biorreatores ao longo da operação. Após 170 dias de operação observa-se mudança na composição do biogás dos biorreatores de controle. A concentração do  $CH_4$  voltou a crescer enquanto a concentração do  $N_2$  decrescem no *head space* dos biorreatores.

Percebeu-se que a taxa de recirculação influenciou na degradação anaeróbia da FORSU<sub>p</sub>, visto que os biorreatores com alta taxa de recirculação demoraram mais tempo para entrar na fase de produção acelerada de metano, em consequência da alta produção de ácidos voláteis produzidas com auxílio da recirculação.

Reinhart e Al-Yousfi (1996) estudaram diferentes aterros sanitários e observaram, que comparados aos aterros sanitários convencionais, os aterros sanitários com recirculação de percolado na fase de formação de ácidos podem produzir duas vezes mais ácidos voláteis (vide Tabela 2).

San e Onay (2001) obtiveram melhor produção de metano com reator utilizando recirculação de percolado quando taxa e frequência de recirculação de percolado foram gradualmente aumentadas.

A percentagem máxima de  $CH_4$  do biogás do reator RA3 no 9º dia foi 47% no e para o reator RB3 foi 30%. Nesses reatores a queda de  $CH_4$  começou no 20º dia de operação. Durante o monitoramento dos parâmetros físico-químicos observou-se queda do pH e acúmulo de ácidos voláteis parâmetros que provavelmente retardaram o início da fase metanogênica. A análise da composição do biogás mostrou haver maior quantidade de  $N_2$  e  $CO_2$  no *head-space*. De acordo com de Barlaz (1998) e Barlaz et al (1989), essas características indicam que tais reatores encontravam-se na fase anaeróbia ácida.

Os reatores RB5 e RC5, com 10 dias de operação, também apresentaram cerca de 40 % de  $CH_4$  no *head space*. Analogamente aos biorreatores com taxa de recirculação de 30% esses biorreatores, possivelmente, estavam na fase anaeróbia ácida.

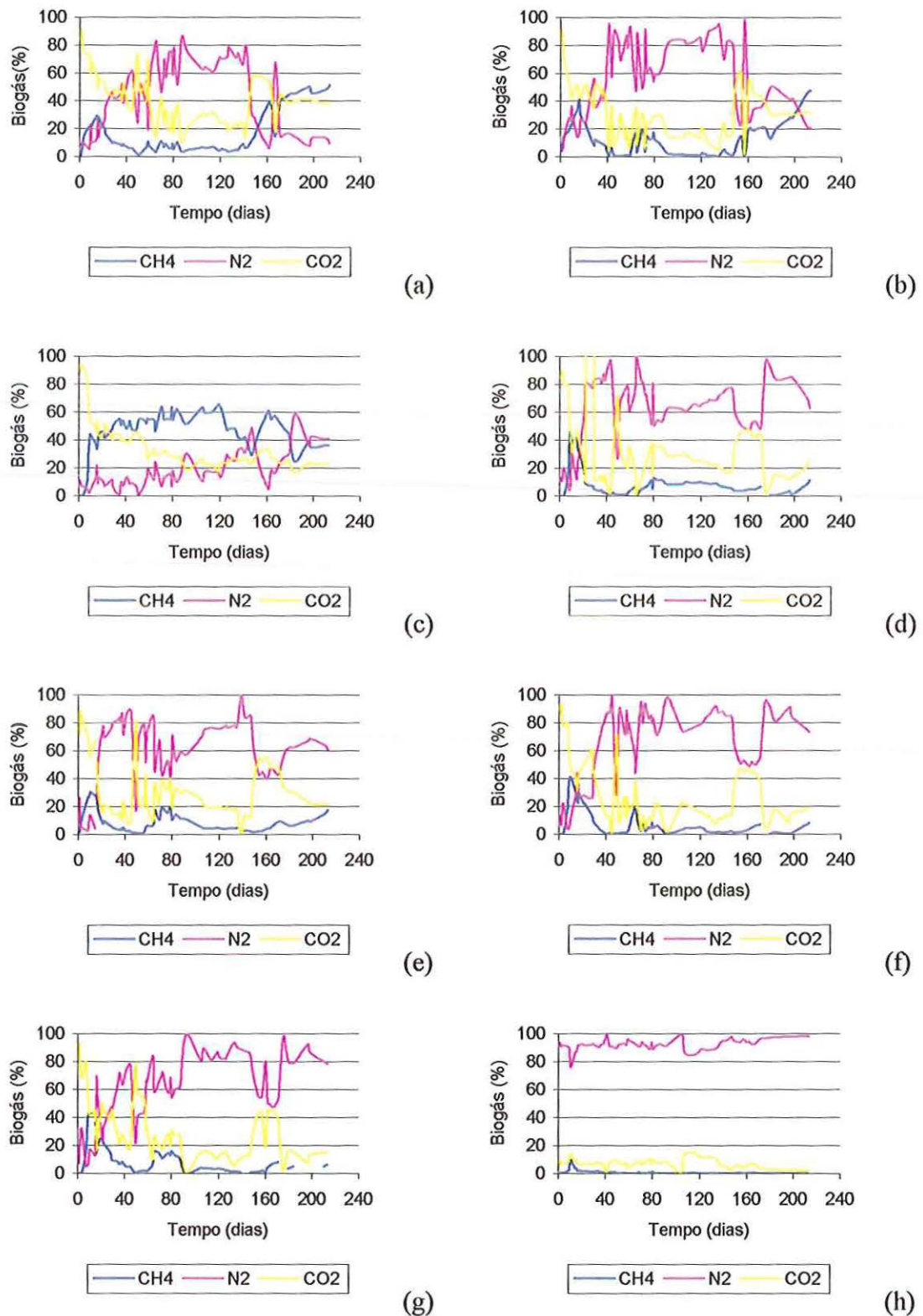


Figura 19: Evolução temporal da composição do biogás durante a digestão anaeróbia da FORSU nos reatores: (a) Reator RAS, (b) Reator RBS, (c) Reator RA1, (d) Reator RA3, (e) Reator RB3, (f) Reator RB5, (g) Reator RC5, (h) Reator RBP.

### 5.3.2 Degradação da matéria orgânica dos biorreatores

A degradação da matéria orgânica dos biorreatores foi medida em relação à remoção de DQO sólida e do teor de carbono e sólidos voláteis medidos no meio de reação inicial e final dos biorreatores.

O reator RA1 foi quem apresentou o melhor remoção de sólidos voláteis, teor de carbono e DQO sólida, condizentes com a produção de metano.

Os reatores controle - RAS e RBS - apresentaram percentual de degradação maior que o percentual dos reatores com taxa de 30 % de recirculação - RA3 e RB3, e 50% de recirculação - RB5 e RC5.

A Figura 20 e a Figura 21 apresentam o percentual de degradação da matéria orgânica nos reatores, com base em teor de carbono e em DQO sólida do meio de reação. Esta comparação foi feita pela diferença entre o valor inicial e o valor final do meio de reação.

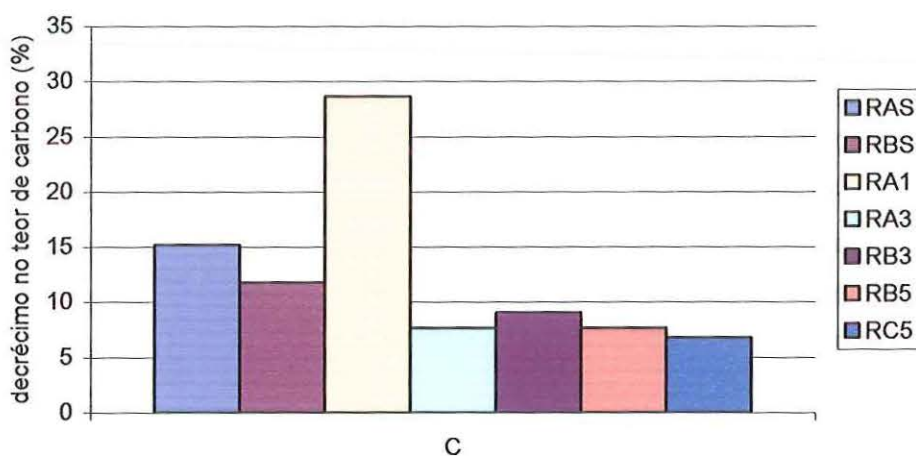


Figura 20: Decréscimo do teor de carbono dos biorreatores.

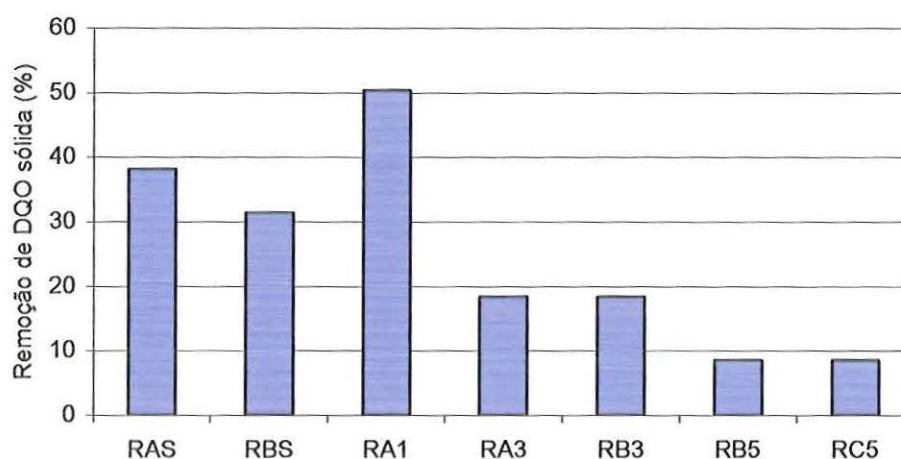


Figura 21: Percentagem de remoção da DQO sólida nos biorreatores.

Os biorreatores de controle apresentaram maior percentual de remoção de matéria orgânica em relação aos biorreatores com taxa de 30% e 50% de recirculação.

Os reatores de controle apresentaram cerca de 22% de remoção de sólidos voláteis. Os reatores que apresentaram maiores taxas de recirculação obtiveram percentual de remoção muito baixo, em torno de 3% para os reatores RA3 e RB3, e de 17% para os reatores RB5 e RC5. Notou-se que altas taxas de recirculação retardaram o início da degradação da matéria orgânica, por causar acidificação.

A Tabela 10 apresenta as características finais dos meios de reação para os reatores no final da operação.

No final do experimento a diferença do volume de percolado entre os reatores RA3 e RB3 e entre os reatores RB5 e RC5 foram ocasionados pela ocorrência de vazamentos durante a realização das operações de recirculação.

As massas de FORSU<sub>p</sub> e os volumes de percolado obtidos no final do experimento encontram-se na Tabela 11.

Tabela 10: Valores dos meios de reação dos biorreatores no final do experimento

Reator	RAS	RBS	RA1	RA3	RB3	RB5	RC5
(%) de degradação de SV	22	22	48	3	3	12	17
ST (%)	12,27	11,86	8,44	10,88	13,31	12,23	10,84
DQO (gO <sub>2</sub> /kg RS)	406	450	326	536	536	600	600
N (%)	1,83	1,85	2,49	1,88	1,81	1,84	1,84
C (%)	40,46	42,09	34,04	44,06	43,37	44,06	44,46
H (%)	4,65	3,94	3,24	5,08	5,26	5,29	4,85
S (%)	0	0	0	0	0	0	0
Massa da FORSUp (g)	400	420	270	670	580	740	780
Volume final de percolado (mL)	1451	1350	1300	950	850	1000	850

RS – resíduo seco

Tabela 11: Valores finais da massa da FORSUp e do volume de percolado dos reatores

Reator	Massa da FORSUp (g)	Volume do percolado (mL)
RAS	400	1450
RBS	420	1350
RA1	270	1300
RA3	670	950
RB3	580	850
RB5	740	1000
RC5	780	850
RBP		1400

As taxas de recirculação utilizadas influenciaram significativamente nos resultados. Os reatores com maiores taxas de recirculação apresentaram problemas de

inibição da fase metanogênica e no final do experimento aparentavam sinais de recuperação dessa atividade.

Garb et al (2000) reportaram que em aterros sanitários que empregam a recirculação do percolado a produção de metano foi superior à dos aterros sanitários convencionais. Porém, não mencionaram a taxa e frequência de recirculação aplicada.

O reator com taxa de 10 % de recirculação apresentou o melhor percentual de degradação da matéria orgânica, efetiva produção de metano e partida eficiente e equilibrada. Comparado aos reatores de controle, mostrou melhor eficiência na degradação anaeróbia da matéria orgânica e indicou que a taxa de 10% de recirculação, em volume de percolado, interferiu de forma satisfatória, acelerou a degradação anaeróbia, e proporcionou equilíbrio na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.

Baldochi (1997) sugere que a recirculação do percolado tamponado foi um dos fatores responsável pelo favorecimento da digestão anaeróbia no experimento realizado com a FORSU.

Lee et al (2001) simularam, em modelo matemático, dois tipos de aterros sanitários: com recirculação do percolado e aterro sem recirculação, o resultado da simulação mostrou que a recirculação do percolado provê condições mais favoráveis ao desenvolvimento da população anaeróbia ativa e, conseqüentemente, acelera a estabilização do aterro sanitário.

A análise dos parâmetros físico-químicos dos reatores RA3, RB3, RB5 e RC5 permite concluir que nestes reatores a produção de metano não foi satisfatória devido ao acúmulo dos ácidos voláteis. A percentagem de remoção de carbono e DQO sólida foi bem inferior em relação aos reatores RA1, RAS e RBS. A digestão anaeróbia da FORSU não foi satisfatória nos reatores RA3, RB3, RB5 e RC5 no período de operação. Pode-se supor que o volume de percolado recirculado inibiu o processo.

Lima (1988) observou que a recirculação do percolado "in natura" inibiu o processo, principalmente da metanogênese, devido ao acúmulo de ácidos voláteis.



#### 5.4 Exames Microbiológicos

O percolado do aterro de Jaboticabal-SP, devido à diversidade microbiana presente, mostrou-se adequado para uso como inóculo. Na comunidade microbiana do inóculo observou-se predominância de cocos e bacilos e, também, presença de *Methanosarcina* sp. Na Figura 22 estão algumas das morfologias microbianas presentes no percolado na época da inoculação.

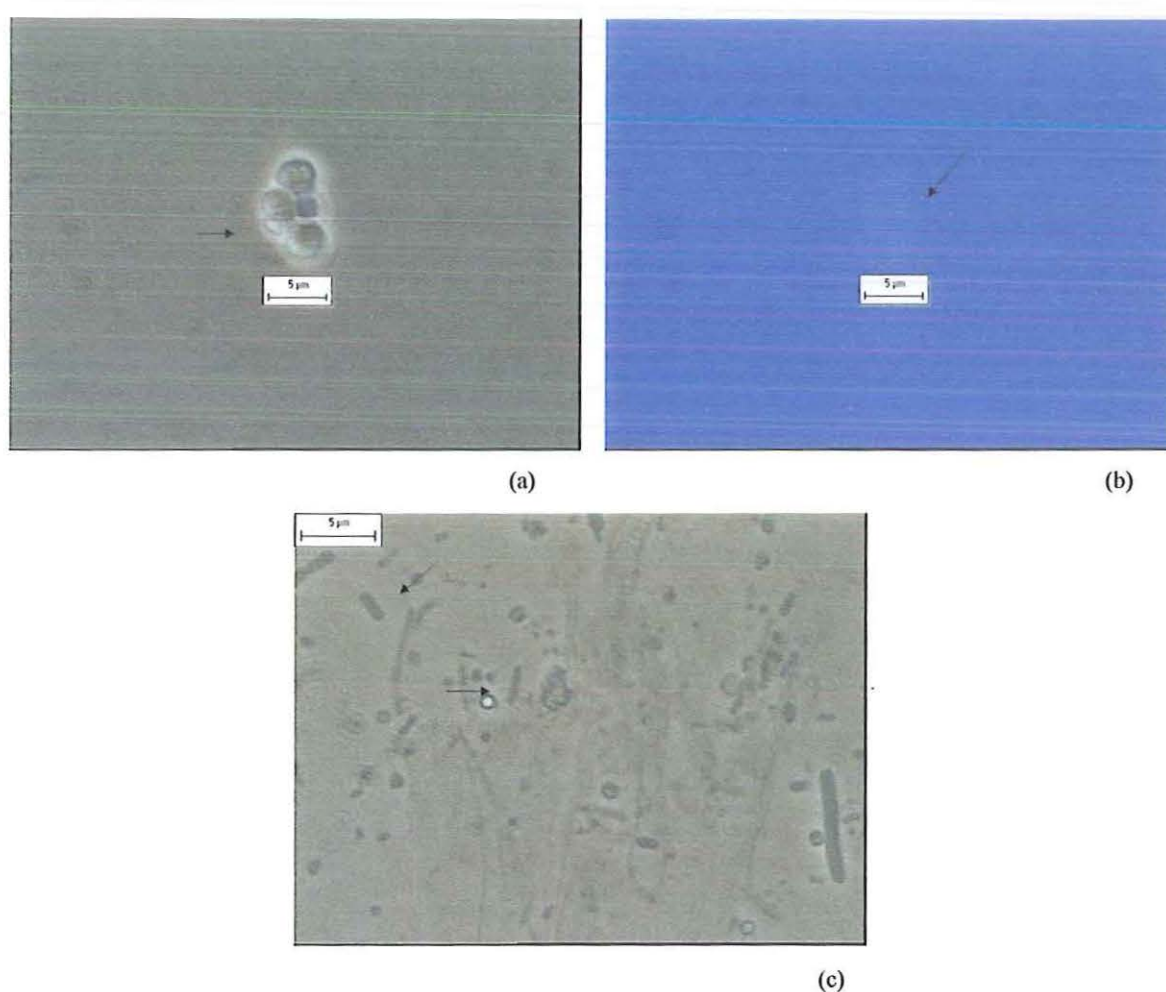


Figura 22: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase da amostra do percolado empregado como inóculo (a) sarcinas; (b) sarcinas fluorescentes; (c) bacilos com diversas dimensões. Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25.

Após 125 dias de operação foram feitas observações microscópicas em amostras de percolados dos reatores. Nos reatores com produção de metano predominaram os microrganismos cocos, bacilos curvos e delgados, cocos metanogênicos (fluorescentes) que provavelmente são *Methanococos* sp. ou *Methanosarcinas* sp. semelhantes às observadas nos trabalhos de Baldochi (1997) e Pinto (2000). Os reatores com pH na faixa de 5,8 – 6,3 apresentaram cocos, bacilos delgados e estruturas em formato de esporo de fungo. Os comentários constam da Tabela 12.

Nas Figura 23 e 24 podem ser vistas algumas das morfologias encontrada nos reatores, com 125 dias de operação.

As amostras de percolado dos biorreatores foram examinadas quando do encerramento da operação. Nos reatores com pH mais baixo houve predominância de hifas de fungos e morfologias com aparência de levedura. Observou-se possível predominância de cocos fluorescentes (*Methanococcus*) no reator RA1, o qual apresentou alta produção de metano. Notou-se a presença de cistos de sarcina fluorescentes, em algumas amostras. Na Tabela 13 estão descritos os tipos morfológicos predominantes encontrados. Algumas das morfologias encontradas podem ser vistas nas Figura 25 e Figura 26.

Tabela 12: Observações microscópicas do percolado dos reatores com 125 dias de operação

Reator	Observações
RAS	Muitas fibras com material aderido, bacilos e filamentos delgados, bacilos com inclusões e muito material com aparência de esporo de fungo.
RBS	Material muito fibroso; predominância de bacilos; presença de esporos de fungo, pequenos bacilos e cocos; filamentos com inclusões e cocos elipsoidais.
RA1	Muitos bacilos em cadeia, bacilos curvos, cocobacilos, bacilos de diferentes dimensões, agrupamento de cocos; cocos com fluorescência bem nítida
RA3	Presença de esporos de fungos; filamentos delgados e bacilos de vários tipos
RB3	Vários bacilos e prováveis esporos de fungos
RB5	Bacilos com inclusões e leveduras
RC5	Alguns bacilos e esporos de fungos
RBP	Cistos com aparência de sarcina. Alguns bacilos e filamentos delgados. Maior presença de cocos e cistos.

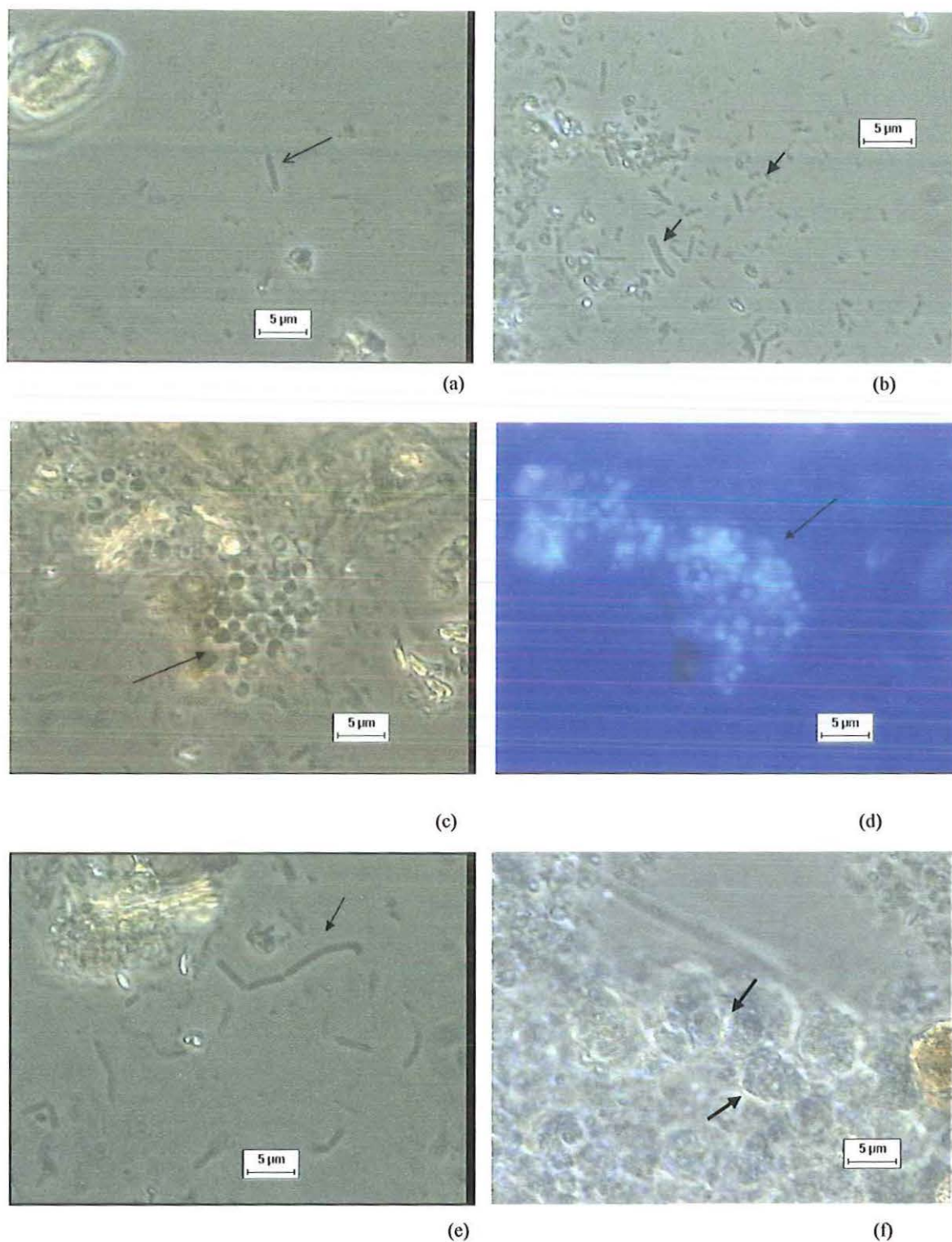


Figura 23: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RAS, RBS, RA1 e RBP com 125 dias de operação (a) bacilos com inclusões (RAS); (b) bacilos variados (RBS); (c) cocos (provavelmente *Methanococcus*) (RA1); (d) fluorescência cocos (RA1); (e) bacilos em cadeia (RA1); (f) cistos (RBP). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25.

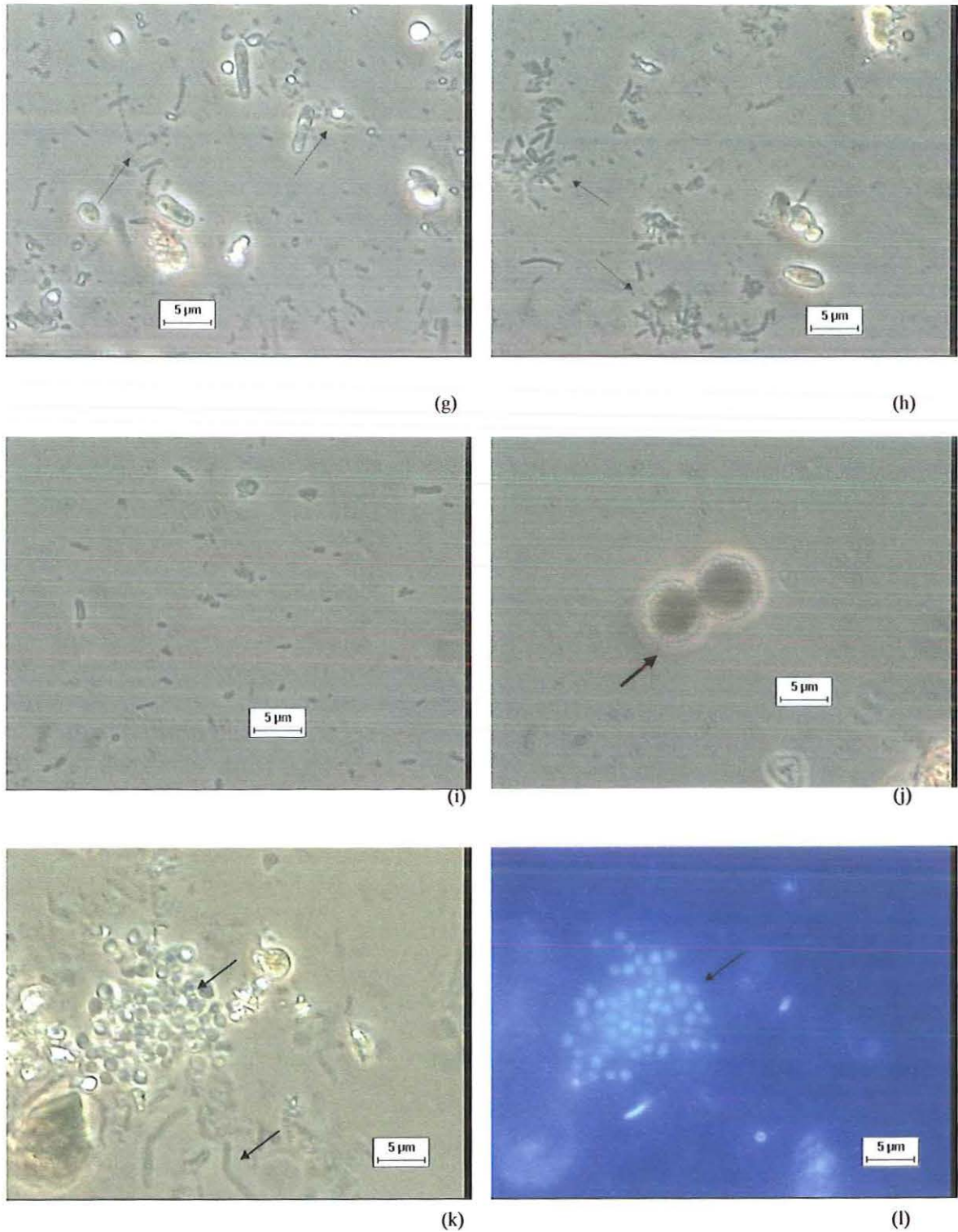


Figura 24: Microscopia óptica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RA3, RB3, RB5, RC5 e RA1 com 125 dias de operação (g) bacilos e esporo de fungos (RA3); (h) bacilos e fungos (RB3); (i) bacilos (RB5); (j) células esporuladas (RC5); (k) cocos e bacilos (RA1); (l) cocos metanogênicos (RA1). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25.

Tabela 13: Observações microscópicas do percolado dos reatores no final do experimento.

Reator	Observações
RAS	Alguns bacilos e morfologias com aparência de hifas de fungos.
RBS	Morfologia semelhante à hifas. Bacilos com inclusões e delgados
RA1	Muitos cocobacilos, cocos fluorescentes e sem fluorescência. Predominância de cocos fluorescentes.
RA3	Alguns bacilos
RB3	Várias morfologias com aparência de leveduras. Alguns bacilos.
RB5	Poucos bacilos, muita morfologia com aparência de levedura.
RC5	Poucos bacilos e algumas morfologias com aparência de levedura.
RBP	Morfologia com aparência de cistos de sarcina (fluorescentes). Alguns bacilos; cocos fluorescentes

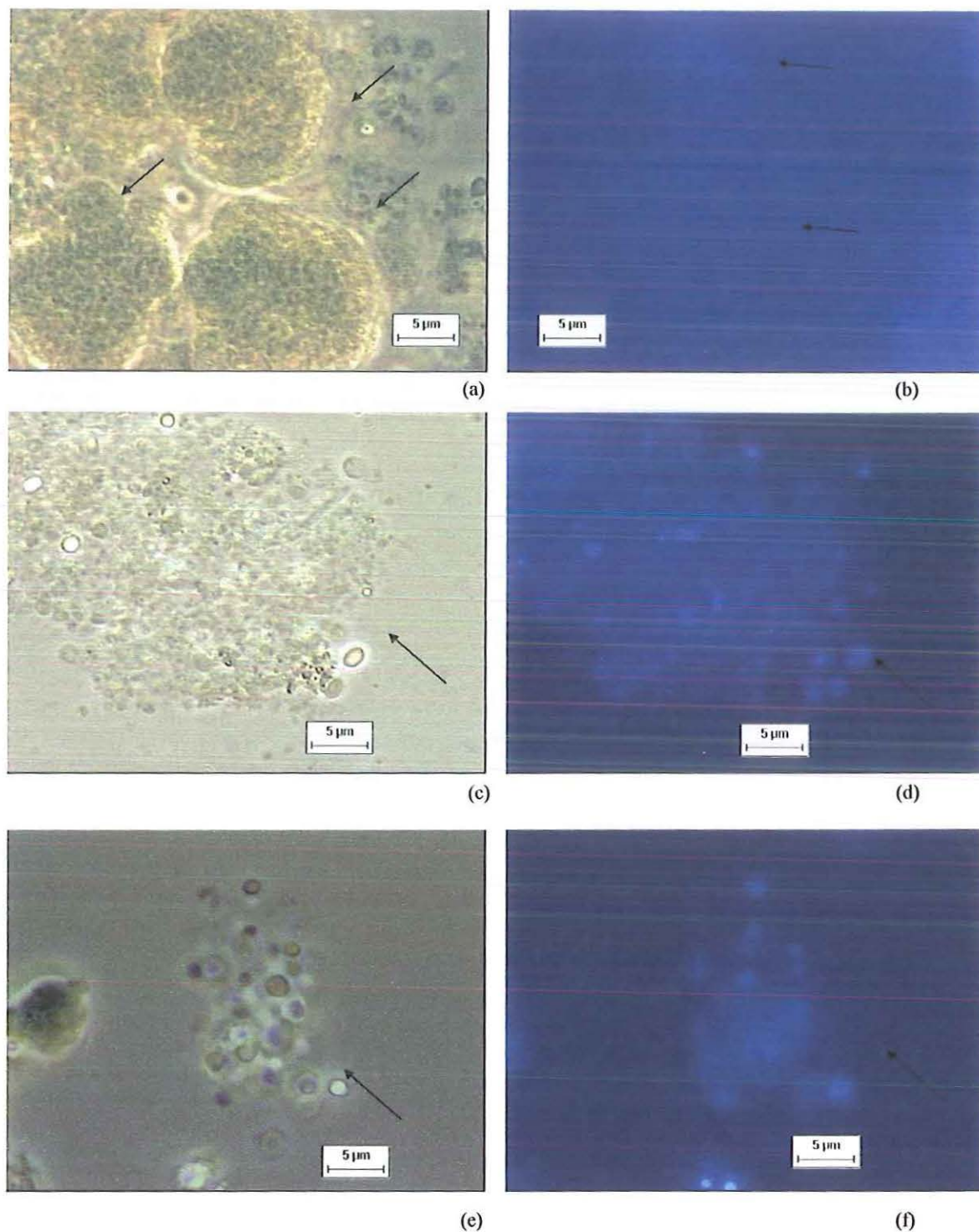


Figura 25: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RA1 e RBP no final do ensaio (a) cistos de sarcina (RBP); (b) fluorescência do cistos de sarcina (RBP); (c) cocos (RBP); (d) fluorescência do cocos (RBP); (e) cocos (RA1); (f) fluorescência cocos (RA1). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25.

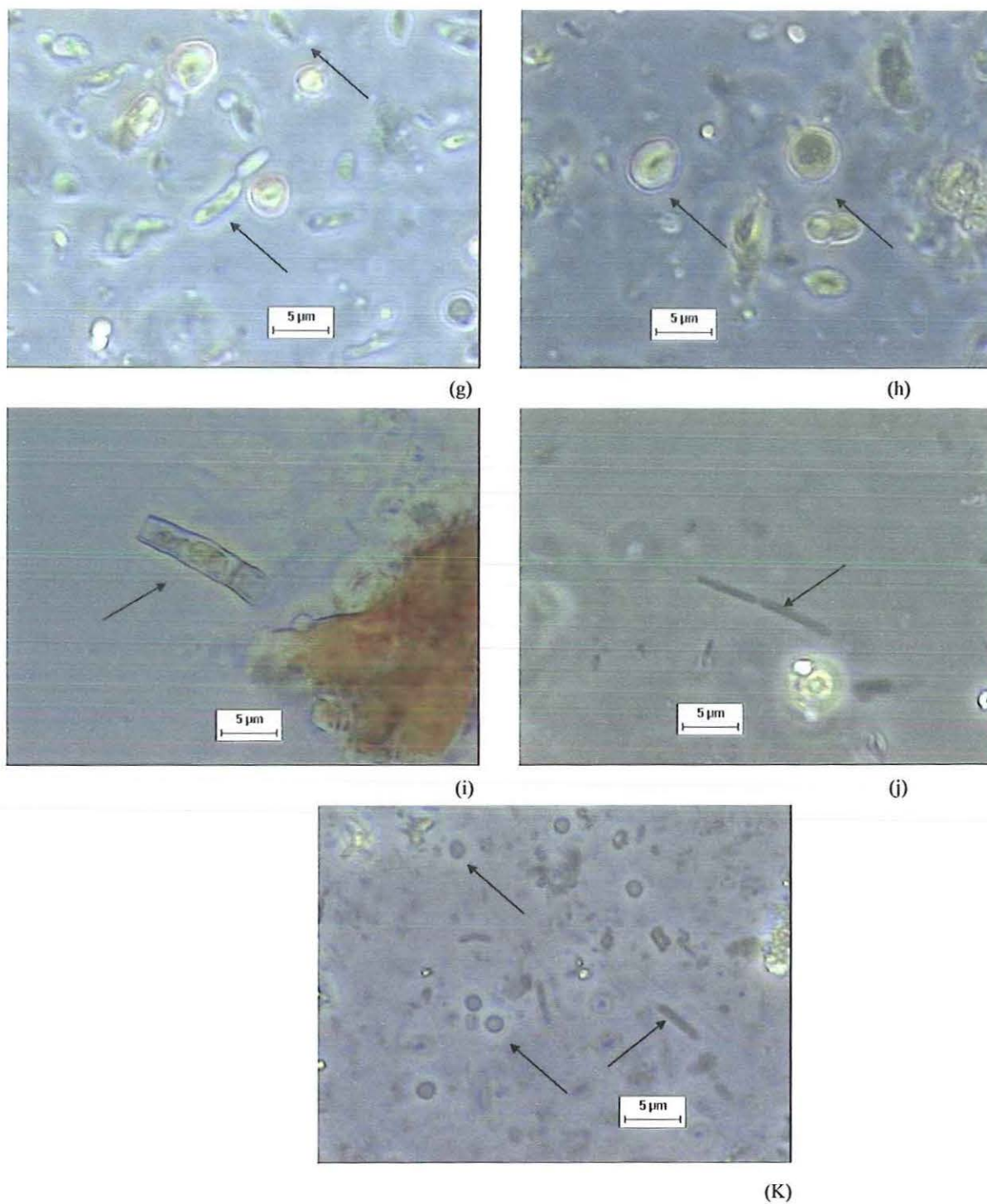


Figura 26: Microscopia ótica de fluorescência e contraste de fase das amostras de percolados do biorreatores RA3, RB3, RAS, RBS e RA1 no final do ensaio (g) bacilos (RA3); (h) leveduras (RB3); (i) hifa (RAS); (j) bacilos delgados (RBS); (k) cocos e bacilos (RA1). Ocular 10, objetiva 100, Zoom 1,25



Na amostra do percolado no reator com maior produção de metano (RA1) foi feita microscopia de varredura, a qual confirmou a predominância de cocos vistos na microscopia ótica. Esses organismos podem ser vistos na Figura 27.

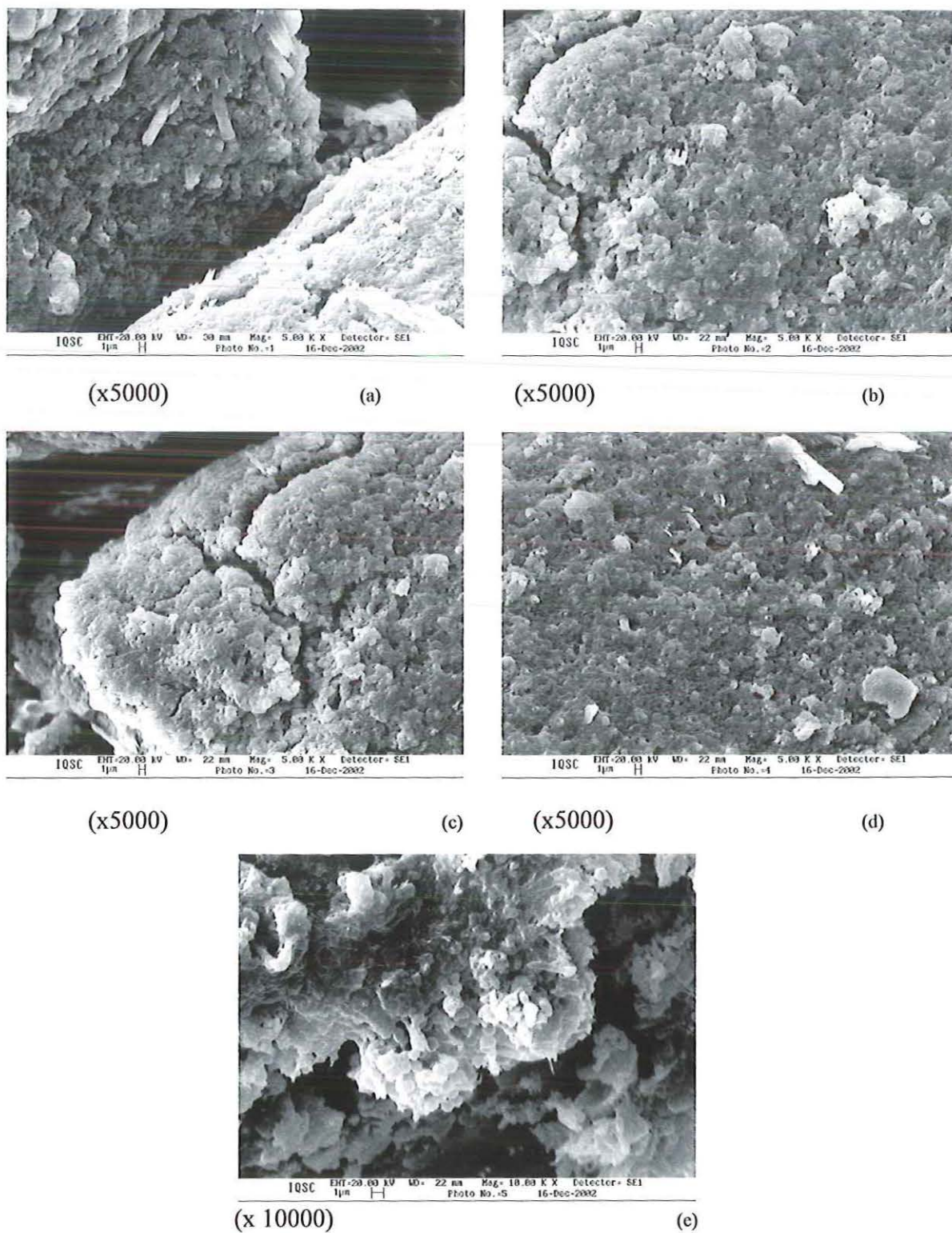


Figura 27: Microscopia de Varredura da amostra do percolado do biorreatores RA1 no final do ensaio (a) cocos; (b) e (c)cocos e alguns bacilos; (d) e (e) aglomerados de cocos

## 5.5 Dificuldades Operacionais

Este item faz abordagem geral dos problemas operacionais ocorridos durante a realização destes experimentos.

A apresentação foi dividida em: dificuldades encontradas na partida dos biorreatores e dificuldades encontradas na recirculação do percolado.

### 5.5.1 Dificuldades na montagem dos biorreatores

Na primeira tentativa de montagem dos biorreatores empregados após quinze dias de operação ocorreu irreversível acidificação que impossibilitou a continuidade da pesquisa, provavelmente pelo fato de os biorreatores não terem sido tamponados na montagem.

Após as primeiras análises do percolado observou-se decréscimo de pH do sistema e adicionou-se tampão na recirculação do percolado. Os valores de pH dos reatores estavam na faixa crítica, abaixo de 5,0. Este rápido decréscimo dos valores de pH provavelmente deve-se à elevada degradabilidade da FORSU<sub>p</sub> que ocasionou rápida produção de ácidos voláteis.

Xu et al (2003) afirmam que, na digestão anaeróbia de resíduos alimentares a matéria orgânica putrescível, acelera a etapa de hidrólise/acidificação. Borzacconi et al (1997) relatam que altas percentagens de matéria orgânica putrescível ocasionam acúmulo de ácidos voláteis

Outro fato que provavelmente acelerou a acidificação do meio de reação desses reatores foi a elevada umidade do meio, pois segundo Kayhanian et al. (1991) a alta umidade do meio eleva a produção de ácidos voláteis.

As características físico químicas da primeira FORSU<sub>p</sub> preparada foram similares àquela da página. As características físico-química da FORSU<sub>p</sub> da primeira montagem dos biorreatores encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14: Características da FORSU<sub>p</sub> utilizada na primeira montagem dos biorreatores.

Parâmetros	FORSU <sub>p</sub>
ST (%)	17
STV (%)	13
DQO (gO <sub>2</sub> /kgRS)	400
Umidade (%)	83
N (%)	3
C (%)	42
H (%)	5
S (%)	0

RS – resíduo seco

O inóculo empregado foi o mesmo descrito no item 5.1 dos resultados e discussão. A condição para preenchimento foi descrita no item 4.2 de material e métodos. Resultando em 1,800kg da FORSU<sub>p</sub> e 0,610L de percolado.

Após o primeiro dia de operação explodiram quatro reatores devido ao excesso de pressão produzida por gases, principalmente, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Diariamente foi realizada purga dos biorreatores, contudo, isso não evitou a explosão.

O tempo de operação destes primeiros biorreatores produziu dados insuficientes para a pesquisa. Após essa tentativa a FORSU<sub>p</sub> foi preparada novamente e a operação descrita foi recomeçada.

Em novos experimentos, com 40 dias de operação, os reatores RB1 (réplica do reator RA1) e RA5 (réplica do reator RB5) encontravam-se em condições inadequadas para prosseguimento da pesquisa, pois a ocorrência de vazamentos ocasionou a perda de grande volume do percolado.

O reator que a princípio teria taxa de recirculação de 100% substituiu o reator RA5, dada a dificuldade de se atingir a taxa de recirculação de 100%.

### 5.5.2 Dificuldades na recirculação do percolado em batelada

A princípio foi tentada recirculação manual dos reatores, utilizando-se seringas da marca Becton Dickinson. Essa metodologia revelou-se inviável, dado o tempo despendido para retirada do percolado dos reatores, o que foi realizado com auxílio de bomba a vácuo.

Tanto o método de recirculação manual quanto o de extração por bomba revelaram-se impraticável à recirculação à taxa de 100% do volume do percolado do biorreator.

O fato de não se colocar um pré-filtro para diminuir entupimento, deve ter sido um dos motivos para a inviabilização dessas metodologias.

Outro motivo de entupimento foi o diâmetro de apenas 1/16" do espigão na saída dos reatores para adaptação das mangueiras utilizadas para a recirculação.

Devido à sua configuração os reatores não permitiram mistura em *shaker*, mas a recirculação do percolado proporcionou mistura do meio de reação.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho concluiu-se que a variação da taxa de recirculação de percolado influenciou nos parâmetros monitorados durante a degradação anaeróbia da FORSU<sub>p</sub>.

A variação da taxa de recirculação pode aumentar ou diminuir consideravelmente a eficiência do processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos. Portanto a variação da taxa de recirculação pode ser avaliada como fator de grande importância no processo de digestão.

A taxa de recirculação de 10% do volume do percolado comprovou ser a mais eficiente. Os resultados obtidos neste trabalho apontaram que o biorreator com taxa de 10% de recirculação demonstrou partida equilibrada, apresentou maior eficiência em relação à decomposição da matéria orgânica e concentração de metano no biogás, comparado aos reatores controle e aos reatores com maiores taxas de recirculação (30 e 50 % do volume de percolado).

As altas taxas de recirculação provocaram alteração dos microrganismos existentes nos ecossistemas, vale dizer, nos reatores.

Os reatores com alta taxa de recirculação demoraram mais tempo para entrar na fase de produção acelerada de metano, devido à alta concentração de ácidos voláteis produzidas com auxílio da recirculação.

A recirculação não interferiu na variação dos ácidos voláteis ao longo da operação dos reatores; a diferença foi observada nos valores das concentrações.

As maiores concentrações de ácidos voláteis desta pesquisa foram: butírico, propiônico e acético.

O alto teor de umidade – 87% - e valores de pH em torno de 7,6 – 8,0 não interferiram na produção de metano.

Os ácidos orgânicos produzidos no reator RA1 durante o processo de digestão anaeróbia da FORSup indicaram equilíbrio no ecossistema existente no reator, enquanto nos demais reatores indicaram desbalanceamento entre populações hidrolíticas, fermentativas e metanogênicas.

A análise da variação dos ácidos voláteis no reator RA1 permite considerar que a taxa de produção de ácidos voláteis foi igual à taxa de consumo destes

Conclui-se que o início da degradação da matéria orgânica não teve influência da recirculação, pois o metano presente na composição do biogás nos primeiros quinze dias do processo, resultou da matéria orgânica remanescente do inóculo.

Embora tenha sido observado que as concentrações de ácidos foram proporcionais às de DQO, nos reatores com taxa de 30% e 50% de recirculação houve decréscimo da concentração de DQO após 130 dias de operação mas as concentrações de ácidos permaneceram com valores significativos.

No reator RA1, que apresentou alta produção de metano, observou-se possível predominância de cocos fluorescentes (*Methanococcus*).

No percolado dos reatores com maiores taxas de recirculação apresentaram organismos com estruturas em formato de esporo de fungo.

No encerramento da operação, em reatores com pH com valores entre 5,6 –6,3 verificou-se predominância de hifas de fungo e morfologia com aparência de levedura.

## 7. SUGESTÕES

Com base na acidificação provocada nos biorreatores pelas altas taxas de recirculação parece interessante verificar o efeito da recirculação na degradação da FORSUD com aumento gradativo da taxa e da frequência de recirculação.

Os resultados encontrados indicam a necessidade de se avaliar a variabilidade da taxa de recirculação de 1 a 10 % de volume de percolado.

Sugere-se que sejam verificados os efeitos da recirculação em biorreatores de batelada em sistema de duas fases, com aumento gradual da variação na taxa e frequência de recirculação.

Devido ao fato de a concentração de ácidos voláteis por titulometria ser imprecisa por medir pequena faixa de concentração de ácidos voláteis, notadamente ácido acético, sugere-se para monitoramento dos biorreatores o uso de cromatografia a gás para quantificação dos ácidos voláteis. O procedimento com cromatografia líquida de alta eficiência usado nesta investigação requer longo tempo de operação; mais um motivo para sugerir-se cromatografia gasosa.

Realizar a variação da taxa de recirculação de percolado em escala real, por exemplo, em aterros sanitários de cidades de pequeno porte.

Avaliar os efeitos da recirculação do percolado na digestão anaeróbia com percolados oriundos de aterros em diferentes graus de estabilização.

Avaliar a recirculação do percolado em experimentos com o meio de reação com teores de umidade superiores ao utilizados nesta pesquisa.

## 8. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1987). NBR – 10004: Resíduos Sólidos – Classificação, Set. 1987.
- APHA, AWWA, WPCF, (2002). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21<sup>a</sup> ed., Washington, D. C., 1268p.
- ARAÚJO, J. C. (1995). *Caracterização e evolução do biofilme em reator anaeróbio de leito fluidizado alimentado com esgoto sintético*. São Carlos. 158p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1995.
- ARCHER, D. B.; KIRSOP, B. H. (1990). The microbiology and control of anaerobic digestion. In: *Anaerobic Digestion: a waste treatment technology*. Ed. Wheatley, A.; London e New York, Elsevier Applied Science. Cap.2, p.43-92.
- BALDOCHI, V. M. Z. (1997). *Resíduos sólidos urbanos: aspectos básicos das transformações de compostos orgânicos em sistemas anaeróbios mesofílicos com elevada concentração de sólidos totais*. São Carlos. 136p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1997.
- BALDOCHI, V. M. Z. (1990). *Comportamento dos ácidos voláteis no processo de estabilização anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário*. São Carlos. 172p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1990.
- BARLAZ, M. A.; SCHAEFER, D. M.; HAM, R. K. (1989). Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill. *Environmental Microbiology*, v. 55, p 55-65.
- BARLAZ, M. A., HAM, R. K., SCHAEFER, D. M. (1990). Methane production from municipal refuse. In: *A review of enhancement techniques and microbial dynamics*. V. 19, p 557 – 585.
- BARLAZ, M. A.; MILKE, M. W., HAM, R. K. (1987) Gas production parameters in sanitary landfill simulators. *Waste Management and Research*. 5. p 27-39.



- BARLAZ, M. A. (1996). Microbiology of solid waste landfills. IN: *Microbiology of Solid Waste*. Ed. Palmisano & Barlaz; Boca Roton, Florida, New York; CRC PRESS. Cap.2, p. 31-70.
- BARLAZ, M. A. (1998). Microbial Studies of landfills and anaerobic refuse decomposition. In: *Manual of Environmental Microbiology*. Ed Hurst, C. J.; ASM PRESS, Washington, D. C. Cap. 60, p 541-557.
- BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J.. (1999). *Conceitos básicos de resíduos sólidos*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 109p.
- BITTON, G.(1994). *Wastewater microbiology*. Ed. Wiley - Liss; New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 478p.
- BORZACCONI, L.; LÓPEZ, I.; ANIDO, C. (1997) Hydrolysis constant and VFA inhibition in acidogenic phase of MSW anaerobic degradation. *Water science and technology*. V36, n6-7, p. 479-484.
- BRUMMELER, E. T.; KOSTER, I. W. (1989). The effect of several pH control chemicals on the dry batch digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*. 3, 19-32.
- CHINOWETH, D. P.; MAH, R. A. (1971) Volatile acid formation in sludge digestion. *Advances in Chemistry Series – Anaerobic Biological Treatment Processes*, 105 p. 41-53
- CHYNOWETH, D. P.; PULLAMMANAPPALLIL, P. (1996). Anaerobic digestion of municipal solid wastes. IN: *Microbiology of Solid Waste*. Ed. Palmisano & Barlaz; Boca Roton, Florida, New York; CRC PRESS. Cap.3, p.71-113.
- CORRÊA, R. C. (1999). *Avaliação de procedimentos para determinação do número e atividade de microrganismos anaeróbios procariontes em amostras de biorreatores operados para estabilização de resíduos sólidos urbanos padronizados*. São Carlos. 173p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.
- GABR, M. A.; HOSSAIN, M. S.; BARLAZ, M. A. (2000) Solid waste settlement in landfills with leachate recirculation. *Geotechnical News*. V28, N2, p 50-55.
- GOMES, L. P. (1989). *Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários*. São Carlos. 159p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1989.

- GURIJALA, K. R. & SUFLITA, J. M. (1993) Environmental factors influencing methanogenesis from refuse in landfills. *Environmental Science and Technology*. 27, p. 1176-1181.
- HAM, R. K.; NORMAN, M. R.; FRITSEL, P. R. (1993). Chemical characterization of fresh kills landfill refuse and extracts. *Journal of Environmental Engineering*. 119, p 1176-1195.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2000) – <http://www.ibge.com.br>
- INTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT (2000). Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2.ed., São Paulo.
- KASALI, G. B.; SENIOR, E.; WATSON-CRAIK, I. A. (1990) Solid state refuse promotion methanogenic fermentation: control and promotion by water addition. *Letters Applied Microbiology*. V11, n1, 22-26
- KAYHANIAN, M.; LINDENAUER, K.; HARDYS, S.; TCHOBANOGLIOUS, G. (1991). The recovery of energy and production of compost from the biodegradable organic fraction of MSW using the high-solids anaerobic digestion/ aerobic biodrying process – A report prepared for the Prison Industry Authority – University of California, Davis.
- KIM, J.; POHLAND, F. G. (1999). In situ anaerobic treatment of leachate in landfill bioreactors. *Water Science Technology*. V. 40, N.8, p. 203-210.
- LEE, K.; SUK, H.; CHOI, S. LEE, C. H.; CHUNG, S. Y. (2001). Numerical evaluation of landfill stabilization by leachate circulation. *Journal of Environmental Engineering*. V 127, n6, 555-563.
- LEITE, V. D. (1997a). *Processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos inoculados com lodo de esgoto industrial*. São Carlos. 251p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. , São Carlos. 1997.
- LEITE, V. C. POVINELLI, J., VAZQUEZ, V. R. C. (1997b). Modelos de bioconversão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos inoculados com lodo de esgoto sanitário. In: 19<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Foz do Iguaçu, 1997. *Anais*. Rio de Janeiro, ABES. p. 1590-5.
- LIMA, L. M. Q. (1988). *Estudo da influência de reciclagem de chorume na aceleração da metanogênese em aterro sanitário*. . São Carlos. 242p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. , São Carlos. 1988.

MAISON, E. M.; IGLESIAS, J. R.; PELAEZ, L. C.; MARAÑÓN, E.; ANDRES, H. S. (2000). Biomethanization of municipal solid waste in a pilot plant. *Water research*, v.34, n.2, p.447-53.

MENDONÇA, J. C. (2003) Influência da tinta de impressão na digestão anaeróbia do papel jornal. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

NETTO, J. C.; MOTA, S. (1999). Caracterização e avaliação da tratabilidade biológica do percolado gerado no aterro sanitário oeste em Caucaia (Ceará). In: 20<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Rio de Janeiro, 1999. *Anais*. Rio de Janeiro, ABES. p. 3697-703.

NOVAES, R. F. V. (1986). Microbiology of digestion anaerobic. *Water Science Technology*, 18: p. 1 – 14.

PAVONI, J. L. (1975) *Handbook of solid waste disposal :materials and energy recovery*. Van Nostrand Reinhold Co.549p.

PALMISANO, A. C., BARLAZ, M. A. (1996) Introduction to solid waste decomposition. IN: *Microbiology of Solid Waste*. Ed. Palmisano &Barlaz; Boca Roton, Florida, New York; CRC PRESS. Cap.1, p. 2-30.

PINTO, D. M.L. (2000) *Avaliação da partida da digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domésticos inoculados com percolado*. São Carlos.175p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. , São Carlos. 2000.

POHLAND, F. G.; AL-YOUSFI, B. (1994) Design and operation of landfills for optimum stabilization and biogas production. *Water Science and Technology*. 30, n12, p117-124.

QASIN, S. R.; CHIANG, W. (1994). *Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment*. Lancaster: Technomic. 339p.

REINHART, D. R. AL-YOUSFI, B. A. (1996) The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. *Waste Management & Research* 14, 337-346.

REINHART, D. R. (1996) Full-scale experiences with leachate recirculating landfills: case studies. *Waste Management & Research* 14, 347-365.

ROBINSON, W. D.; MARIS, P. J. (1985). The treatment of leachates from domestic waste in landfill sites. *Journal Water Pollution*. Com. Fed., Washington, V57, n.1, p.30-38.

- SAN, I.; ONAY, T. T. (2001) Impacts of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation. *Journal of Hazardous Materials*. B87, 259-271.
- SPEECE, R. E. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*, Archae Press, Tennessee. 393p.
- VAVILIN, V.A.; SCHELKANOV, M. Y.; LOKSHINA, L. Y.; RYTOV, S. V.; JOKELA, J.; SALMINEM, E.; RINTALA, J. (2002) A comparative analysis of a balance between the rates of polymer hydrolysis and acetoclastic methanogenesis during anaerobic digestion of solid waste. *Water Science and Technology*, v 45, N10, 249-254.
- VAVILIN, V. A.; RYTOV, S. V.; LOKSHINA, L. Y.; PAVLOSTATHIS, S. G.; BARLAZ, M. A. (2003). Distributed model of solid waste anaerobic digestion – Effects of leachate recirculation and pH adjustment. *Biotechnology and Bioengineering*. v81, n1, p66-73.
- VEEKEN, A.; HAMELERS, B. (1999). Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components. *Bioresource Technology*, 69: p. 249-254.
- VEEKEN, A. H. M.; HAMELERS, B. V. M. (2000). Effect of substrate-seed mixing and leachate recirculation on solid state digestion of biowaste. *Water Science and Technology*. 41, 255-262.
- WANG, Y.; ODLE, W. S.; ELEAZER, W. E.; BARLAZ, M. A. (1997) Methane potential of food waste and anaerobic toxicity of leachate produced during food waste decomposition. *Waste Management & Research*, 15; p149-167.
- WU, Y. C., HAO, O. J.; OU, K.C.; SCHOLZE, R. J. (1988) Treatment of leachate from a solid waste landfill site using a two-stage anaerobic filter. *Biotechnology and Bioengineering*. 31: 257-266.
- XU, H. L.; WANG, J. Y.; ZHANG, H. e TAY, J. H. (2003). A comparative study of anaerobic digestion of food waste in a single pass, a leachate recycle and coupled solid, liquid reactors. *Water Science e Technology*, v. 47, n.1, 319-324.