

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA RADIAÇÃO
GAMA NA DESINFECÇÃO DE ESGOTO
DOMÉSTICO BRUTO E ESGOTO TRATADO EM
REATOR UASB

Gloria Suzana Meléndez Bastos

Belo Horizonte

2006

Gloria Suzana Meléndez Bastos

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA RADIAÇÃO
GAMA NA DESINFECÇÃO DE ESGOTO
DOMÉSTICO BRUTO E ESGOTO TRATADO EM
REATOR UASB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Digestão anaeróbia e técnicas de tratamento e pós-tratamento de esgotos

Orientador: Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Co-orientadora: Sueli Ivone Borrely

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2006

DEDICATÓRIA

Aos amores da minha vida: Mãinha, Painho, Nandinha e Claudinho. Vocês são e sempre serão essenciais para a concretização desse e de outros sonhos que estão por vir.

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão eterna:

Ao Criador por me presentear com uma vida cheia de força, paixão e fé para efetuar meus deveres.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo. Você me ofereceu oportunidade, confiança, conselhos, apoio intelectual e apoio financeiro. Suas providências concretas foram essenciais para a execução deste sonho. A você minha grande admiração.

À minha co-orientadora Dr^a. Sueli Ivone Borrely (IPEN), pela disponibilidade e pelos auxílios que enriqueceram esta dissertação.

Ao professor Dr. Eduardo Von Sperling, pelo crédito inicial que depositou em meu trabalho. Sem você tudo seria mais difícil.

À Dra Maria Helena Sampa (IPEN) pelas conversas esclarecedoras e pelas referências bibliográficas concedidas. Tudo foi de grande serventia!!

Ao CDTN, especialmente as pessoas: Pablo, Ferracini, Fausto, Márcio Tadeu, Ana, Pepê, e Donana. Vocês se viraram para abrir o irradiador quando precisava, tornaram minha rotina mais agradável e tornaram possível a realização desta pesquisa.

Ao laboratório de análises clínicas Hermes Pardini pelo fornecimento de ovos férteis de *Ascaris lumbricoides* proveniente de fezes humanas. Vocês foram imprescindíveis para este estudo que visa buscar melhores condições para a saúde pública.

Ao professor Dr. Sérgio Aquino pela ajuda na estruturação do projeto e pelo empréstimo de materiais e equipamentos. E à professora Dr^a. Lisete Lange pelo empréstimo de tubos e grades. Sem vocês a implementação da etapa microbiológica desta pesquisa não teria como ser executada.

À professora Dr^a. Silvia Oliveira pela disponibilidade e paciência de me ensinar algumas análises estatísticas necessárias para discutir meus dados e por nos mostrar exemplo profissional que sempre deveremos seguir.

À minha querida família: Mãinha, Painho e Nandinha, pelo amor, **APOIO**, confiança e principalmente compreensão da minha ausência. Sem vocês nos bastidores eu não teria como vencer mais esta etapa. Eu amo vocês!

Ao CNPQ pela bolsa concedida.

Ao Claudinho, meu lindo amor e companheiro de vida. Minha “equipe”. Seu amor, incentivo e força se transformaram em fonte de ânimo e me auxiliou vencer as dificuldades diárias e tornar mais doce a vida real.

À minha companheira de domingo a domingo, Carol Ventura. Sua amizade, convívio cordial, e sua presteza foram fundamentais para o cumprimento desta missão. Muito obrigada por existir em minha vida. Obrigada também pelos tubos e pelos meios de cultivo!

À querida Dri. Sua dedicação à ciência me contagiou e me empolgou ainda mais em minhas realizações. Você me transmitiu ensinamentos de bancada e de vida que foram muito importantes para minha formação.

Ao pessoal do laboratório de Bacteriologia da Água, especialmente as pessoas: Dr^a. Silvana Queiroz, Lenora Ludolf, Val Godinho, Carol Moreira e Érika Abreu. Muito obrigada pela disponibilidade e pela amizade de todas vocês.

Às estagiárias Grazi e Juliana. Sem a dedicação e a disposição de vocês no processamento das análises parasitológicas e microbiológicas, eu não teria dado conta. Vocês são tudo de bom!

Ao pessoal do laboratório de físico-química do DESA (UFMG), especialmente as pessoas: Jussara, Lucy, Norma e Jacson.

À equipe PROSAB esgoto, especialmente Ana Raquel, André, Fernando, Tati, Paulo, Jakson, Wilson e seu Raimundo, pela prontidão em auxiliar nas coletas e pelo o apoio concedido ao meu trabalho. Ao Reginaldo, Vanessa e Betânia pela amizade, boa vontade e competência com que providenciaram os materiais para pesquisa.

Aos AMIGOS do mestrado: Tell, **WESLEY**, Carol Torres, Vívian, Josinha e Sara. Meus agradecimentos profundos, pelo companheirismo, pelas quebrações de galhos e por terem enchido o ambiente de trabalho de harmonia. Não imaginava aqui formar laços tão profundos. Meus agradecimentos também aos colegas que fizeram aprazível o convívio em sala de aula.

À Iara e Cláudia por facilitar nossa vida na parte burocrática na secretaria e por estarem sempre prontas a ajudar. À Dona Chica pelo cafezinho animador, conselhos e abraços calorosos. E à Alaíde por sempre deixar o laboratório bem limpo (como novo) para desenvolver os experimentos.

Ao DESA e todos os professores pela oportunidade do meu aprimoramento intelectual.

E minha imensa gratidão a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuiu ou torceu pela concretização do meu trabalho.

*“Diz-se que, mesmo antes de um rio cair no oceano ele treme de medo.
Olha para trás, para toda a jornada, os cumes, as montanhas, o longo caminho
sinuoso através das florestas, através dos povoados; e vê a sua frente um oceano
tão vasto, que entrar nele nada mais é do que desaparecer pra sempre.*

Mas, não há outra maneira.

O rio não pode voltar.

Ninguém pode voltar.

Voltar é impossível na existência.

Você pode apenas ir em frente.

O rio precisa se arriscar e entrar no oceano.

E somente quando ele entra no oceano é que o medo desaparece.

Porque apenas então, o rio saberá que não se trata de desaparecer,

mas torna-se

OCEANO...”

Osho

RESUMO

A crescente deterioração da qualidade dos corpos d'águas vem preocupando os pesquisadores em relação à disposição e à reutilização das águas residuárias domésticas. O lançamento de esgoto nos mananciais não deve: alterar seus usos preponderantes, prejudicar a manutenção da integridade dos ecossistemas, gerar riscos à saúde humana, entre outros. Um dos principais problemas decorrentes da reutilização das águas residuárias para fins mais nobres é a presença de organismos patogênicos.

A reutilização do esgoto para fins mais nobres exige um processo de desinfecção eficiente. Os coliformes termotolerantes e os ovos de *A. lumbricoides* são considerados bons indicadores de estudos de desinfecção. Como exemplo, uma reutilização segura do efluente para uso agrícola sem restrição deve apresentar concentração de coliformes termotolerantes com número mais provável < 1000 (NMP)/100 mL e < 1 ovo/L para ovos de helmintos.

Neste contexto, pesquisas no âmbito de se buscar tecnologias de desinfecção mais eficiente são importantes. Entre os processos de desinfecção de esgoto um que se mostra potencialmente superior aos métodos conhecidos em relação à efetividade de remoção de microrganismos patogênicos e à oxidação de matéria orgânica é o emprego da radiação ionizante, como por exemplo, a radiação gama.

Este trabalho considerou a ação da radiação gama nas concentrações de coliformes termotolerantes, na riqueza de enterobactérias, na concentração de bactérias heterotróficas e em ovos de *A. lumbricoides*. Esses estavam presentes no efluente bruto e em efluente de reator UASB (UFMG/COPASA). Além disso avaliou-se a ação residual produzida pela irradiação. O esgoto foi irradiado no Laboratório de Irradiação Gama (LIG) do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), em Belo Horizonte, MG. A fonte radioativa foi ⁶⁰Co, com atividade atual de 37.000 Ci (2005).

Verificou-se que a dose de radiação de 2,5 kGy inativou no esgoto bruto 98 % dos ovos de *A. lumbricoides*, 99,99 % de coliformes totais, 99,98 % de coliformes termotolerantes e 99,59 % de bactérias heterotróficas. Já para o esgoto tratado, inativaram-se 98 % de ovos de *A. lumbricoides*, 99,9999 % de coliformes totais, 99,9999 % de coliformes termotolerantes, e 99,92 de bactérias heterotróficas. Para evitar a recolonização de amostras irradiadas sugere-se doses de radiação acima de 3 kGy a ser empregadas.

ABSTRACT

The rise of deterioration, observed on a quality of water, has been worrying the researchers, chiefly about the disposal and reuse of domestic wastewaters. The discharge of sewage in the environment must not: alter the principal use of fountains of water, damage the ecosystems, or put in risk the human health. One of the mainly problems from the reuse of wastewaters is the presence of patogenic organisms.

The reuse of sewage, for noble purposes, requires an efficient process of desinfeccion. The coliforms termotolerantes and the eggs of *Ascaris lumbricoides* are considered good indicators of desinfeccion studies. For instance, a safe reuse of effluent, used to irrigate, must demand concentration of: coliforms termotolerantes \leq NMP 1000/100 mL and eggs of helmintes \leq 1 egg/L.

The researches should get alternative techniques more efficientes than the currently methods for desinfeccion of effluents, with the main objective in reducing the quantity of patogenics in sewage and, consequently, in the environment. The ionizing irradiation gamma has been tested and the results has been shown that this kind of irradiation is an efficient process for desinfeccion and degradation of pollutants found in domestic wastewater.

In this job, the gamma irradiation was used in: concentration of coliforms termotolerantes, number of species of entherobacters, concentration of heterotrophics bacterias and the eggs of *A. lumbricoides*, found in the raw effluent and effluent from UASB reactor (UFMG/COPASA). Besides, it was evaluated the residual action produced by irradiation process. The sewage was irradiated in Laboratório de Irradiação Gama (LIG) in Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), in Belo Horizonte-MG. The source of irradiation was ^{60}Co , with current activity of 37.000 Ci (2005).

The results shown that a portion of irradiation (2,5 kGy) removed 98% of eggs of *A. lumbricoides*, 99,99% of coliforms totais, 99,98% of coliforms termotolerantes and 99,59% of heterotrophics bacterias in raw sewage. In the treated sewage, it was found a reduction in: 98% of eggs of *A. lumbricoides*, 99,9999% of coliforms totais, 99,9999% of coliforms termotolerantes, and 99,92% of heterotrophic bacteria. To avoid the recolonization of irradiated samples, portion of irradiation above 3 kGy should be used.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
2.1	OBJETIVO GERAL.....	4
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	5
3.1	INTRODUÇÃO.....	5
3.2	ORGANISMOS INDICADORES DA EFICIÊNCIA DA DESINFECÇÃO.....	5
3.2.1	<i>Coliformes totais e coliformes termotolerantes</i>	6
3.2.2	<i>Bactérias heterotróficas</i>	7
3.2.3	<i>Viabilidade de ovos de Ascaris lumbricoides</i>	7
3.3	DESINFECÇÃO DE ESGOTO.....	9
3.3.1	<i>Desinfecção por métodos naturais</i>	9
3.3.2	<i>Desinfecção por métodos artificiais</i>	10
3.3.2.1	Desinfecção por métodos químicos.....	10
3.3.2.2	Desinfecção por métodos físicos.....	15
3.4	RADIAÇÃO IONIZANTE.....	17
3.4.1	<i>Considerações gerais</i>	17
3.4.2	<i>Fontes Radioativas</i>	18
3.4.3	<i>Interação da irradiação com a matéria</i>	20
3.4.4	<i>Toxicidade na irradiação de esgoto</i>	25
3.4.5	<i>Substâncias radioprotetoras presentes no esgoto</i>	26
3.5	IRRADIAÇÃO IONIZANTE APLICADA AO SANEAMENTO.....	27
3.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE O LICENCIAMENTO AMBIENTAL DO PROCESSO.....	29
3.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE A VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO.....	31
3.8	CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA.....	32
4	METODOLOGIA.....	34
4.1	INTRODUÇÃO.....	34
4.2	OBJETOS DE ESTUDO.....	34
4.3	AMOSTRAGEM.....	35
4.4	IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	36
4.5	ETAPAS DO TRABALHO.....	37
4.5.1	<i>1ª Etapa – Avaliação da eficiência de inativação de microrganismos</i>	37
4.5.1.1	Introdução.....	37
4.5.1.2	Descrição da caracterização das Enterobactérias.....	38
4.5.1.3	Descrição da técnica <i>Pour Plate</i>	40
4.5.1.4	Detalhamento da 1ª etapa.....	41
4.5.1.5	<i>2ª Etapa - Avaliação da eficiência de inativação de ovos de Ascaris lumbricoides</i>	42
4.5.1.5	Introdução.....	42
4.5.1.6	Descrição da recuperação de ovos <i>A. lumbricoides</i> de fezes humanas.....	42
4.5.1.7	Descrição da técnica de incubação adaptada.....	43
4.5.1.8	Detalhamento da 2ª etapa.....	44
4.5.1.9	<i>3ª Etapa – Avaliação da ação desinfetante residual da radiação gama na desinfecção do esgoto</i>	45
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1	INATIVAÇÃO DE MICRORGANISMOS.....	47
5.1.1	<i>Esgoto bruto</i>	47
5.1.1.1	Inativação de coliformes totais.....	47
5.1.1.2	Inativação de coliformes termotolerantes.....	50
5.1.1.3	Inativação de bactérias heterotróficas.....	53
5.1.2	<i>Esgoto tratado</i>	55
5.1.2.1	Inativação de coliformes totais.....	55
5.1.2.2	Inativação de coliformes termotolerantes.....	58
5.1.2.3	Inativação de bactérias heterotróficas.....	60
5.1.3	<i>Análise conjunta das eficiências de inativação de microrganismos em esgoto bruto e tratado</i>	63
5.1.4	<i>Efeito da radiação gama em microrganismos</i>	63
5.1.5	<i>Dose de radiação efetiva em microrganismos</i>	67
5.2	INATIVAÇÃO DE OVOS DE ASCARIS LUMBRICOIDES.....	69
5.2.1	<i>Esgoto bruto</i>	69

5.2.2	<i>Esgoto tratado</i>	73
5.2.3	<i>Análise conjunta das eficiências de inativação em esgoto bruto e tratado</i>	77
5.2.4	<i>Efeitos da irradiação em ovos de A. lumbricoides</i>	78
5.2.5	<i>Dose de radiação efetiva em ovos de A. lumbricoides</i>	79
5.3	AÇÃO RESIDUAL DA RADIAÇÃO GAMA EM MICRORGANISMOS	80
5.3.1	<i>Recolonização de microrganismos em esgoto bruto</i>	80
5.3.2	<i>Recolonização de microrganismos em esgoto tratado em reator UASB</i>	81
6	CONCLUSÕES	83
6.1	EFETIVIDADE DA RADIAÇÃO GAMA NA INATIVAÇÃO DE MICRORGANISMOS	83
6.2	EFETIVIDADE DA RADIAÇÃO GAMA NA INATIVAÇÃO DE OVOS DE ASCARIS LUMBRICOIDES	84
6.3	AÇÃO RESIDUAL RADIAÇÃO GAMA	84
6.4	CONCLUSÕES FINAIS	84
7	RECOMENDAÇÕES	85
8	REFERÊNCIAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ovos de <i>A. lumbricoides</i> (A) fértil e não-infectante e (B) larvado e infectante.....	8
Figura 3.2 – Ovo infértil de <i>A. lumbricoides</i>	8
Figura 3.3 – Processos de desinfecção de esgotos sanitários	9
Figura 3.4 – Exemplos de tecnologias oxidativas avançadas que empregam a hidroxila	14
Figura 3.5 – Inativação do DNA pela radiação UV	16
Figura 3.6 – Emissão de raios gama por um nuclídeo instável	18
Figura 3.7 – Decaimento do cobalto 60 a níquel 60.....	19
Figura 3.8 – Distribuição da dose de radiação em função da espessura do material exposto a raios gama e a aceleradores de elétrons.....	19
Figura 3.9 – Esquema dos efeitos diretos e indiretos da irradiação	21
Figura 3.10 – Esquema da radiólise da água (A) e Esquema das reações químicas decorrentes da radiólise da água (B).....	22
Figura 3.11 – Esquema de lipídio com indicação de locais onde a quebra é preferencial	23
Figura 3.12 – Danos na molécula de DNA provocados pela radiação ionizante	24
Figura 4.1 – Reator UASB em escala de demonstração utilizado na pesquisa	34
Figura 4.2 – Irradiador panorâmico do LIG	36
Figura 4.3 – Esquema de estria composta (A) e estria composta (B).....	39
Figura 4.4 – Esquema com meio de Rugai modificado por Pessoa e Silva	39
Figura 4.5 – Representação esquemática da Técnica <i>pour plate</i> para contagem de bactérias heterotróficas	41
Figura 4.6 – Inóculo de <i>A. lumbricoides</i> recuperados de fezes humanas.....	43
Figura 5.1 – Concentração de coliformes totais em esgoto bruto	48
Figura 5.2 – Inativação de coliformes totais em esgoto bruto.....	50
Figura 5.3 – Concentração de coliformes termotolerantes em esgoto bruto	51
Figura 5.4 – Inativação de coliformes termotolerantes em esgoto bruto.....	53
Figura 5.5 – Concentração de bactérias heterotróficas em esgoto bruto	53
Figura 5.6 – Inativação de bactérias heterotróficas em esgoto bruto	55
Figura 5.7 – Concentração de coliformes totais em esgoto tratado.....	56
Figura 5.8 – Inativação de coliformes totais em esgoto tratado	58
Figura 5.9 – Concentração de coliformes termotolerantes em esgoto tratado.....	58
Figura 5.10 – Inativação de coliformes termotolerantes em esgoto tratado	60
Figura 5.11 – Concentração de bactérias heterotróficas em esgoto tratado	61
Figura 5.12 – Inativação de bactérias heterotróficas em esgoto tratado.....	62
Figura 5.13 – Comparação entre as eficiências médias de remoção de coliformes totais (a), coliformes termotolerantes (b) e bactérias heterotróficas (c) em esgoto bruto e esgoto tratado.....	63

Figura 5.14 – Viabilidade de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto bruto no ensaio 1 (a), no ensaio 2 (b), e no ensaio 3 (c).....	71
Figura 5.15 – Eficiência de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto bruto no ensaio 1 (a), no ensaio 2 (b) e no ensaio 3 (c)	71
Figura 5.16 – Viabilidade de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto tratado no ensaio 1 (a), no ensaio 2 (b), e no ensaio 3 (c).....	75
Figura 5.17 – Eficiência de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto tratado no ensaio 1 (a), no ensaio 2 (b), e no ensaio 3 (c)	75
Figura 5.18 – Comparação entre as eficiência de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto bruto e esgoto tratado no ensaio 1 (A), no ensaio 2 , e no ensaio 3 (C).....	77
Figura 5.19 – Ovo de <i>A. lumbricoides</i> com alteração morfológica (A) e ovo de <i>Ascaris</i> com alteração na membrana (B), encontrados em amostras irradiadas com 5 kGy.....	78
Figura 5.20 – Recolonização de coliformes totais em amostras de esgoto bruto irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy	80
Figura 5.21 – Recolonização de coliformes termotolerantes em amostras de esgoto bruto irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy	81
Figura 5.22 – Recolonização de coliformes totais em amostras de esgoto tratado irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy	81
Figura 5.23 – Recolonização de coliformes termotolerantes em amostras de esgoto tratado irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Limites recomendados para utilização de esgotos tratados	2
Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados no projeto da Estação de tratamento de esgoto e lodo (Tucumán, Argentina)	31
Tabela 3.2 – Estimativa de custos da implantação de um irradiador, com 304 L de capacidade, em uma estação de tratamento	31
Tabela 3.3 – Estimativa de custos da operação de uma ETE com um irradiador	32
Tabela 4.1 – Características físico-químicas do esgoto bruto e do esgoto tratado em reator UASB	35
Tabela 4.2 – Dose de radiação absorvida em cada tipo de ensaio	37
Tabela 5.1 – Concentração de coliformes totais (NMP/100 mL) de esgoto bruto irradiado....	47
Tabela 5.2 – Comparação entre as concentrações de coliformes totais em esgoto bruto expostas à diferentes doses de radiação gama	48
Tabela 5.3 – Concentração de coliformes termotolerantes (NMP/100 mL) de esgoto bruto irradiado.....	50
Tabela 5.4 – Comparação entre as concentrações de coliformes termotolerantes em esgoto bruto expostas à diferentes doses de radiação gama	51
Tabela 5.5 – Concentração (UFC/mL) de bactérias heterotróficas em esgoto bruto irradiado	53
Tabela 5.6 – Comparação entre as concentrações de bactérias heterotróficas em diferentes dosagens de raios gama em esgoto bruto	54
Tabela 5.7 – Concentração de coliformes totais (NMP/100 mL) de esgoto tratado irradiado .	56
Tabela 5.8 – Comparação entre as concentrações de coliformes totais em diferentes dosagens de raios gama em esgoto tratado	57
Tabela 5.9 – Concentração de coliformes termotolerantes (NMP/100 ml) de esgoto tratado irradiado.....	58
Tabela 5.10 – Comparação entre as concentrações de coliformes termotolerantes em diferentes dosagens de raios gama em esgoto tratado	59
Tabela 5.11 – Concentração de bactérias heterotróficas (UFC/mL) em esgoto tratado irradiado.....	60
Tabela 5.12 – Comparação das concentrações de bactérias heterotróficas de esgoto tratado irradiados em diferentes doses.....	61
Tabela 5.13 – Ocorrência de microrganismos em esgoto bruto antes e após a irradiação	64
Tabela 5.14 – Ocorrência de microrganismos em esgoto tratado antes e após a irradiação	66
Tabela 5.15 – Valores de D ₁₀ dos microrganismos em esgoto bruto e tratado.....	67
Tabela 5.16 – Concentração média aritmética de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto bruto antes e depois da irradiação	70
Tabela 5.17 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto bruto irradiado nos diferentes ensaios.....	72
Tabela 5.18 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto bruto expostos a doses diferentes de raios gama.....	73

Tabela 5.19 – Concentração média de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto tratado antes e depois da irradiação	74
Tabela 5.20 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto tratado irradiado nos diferentes ensaios	76
Tabela 5.21 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto tratado expostos a diferentes doses de raios gama	77
Tabela 5.22 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de <i>A. lumbricoides</i> em esgoto bruto e tratado irradiados com diferentes doses	77

LISTA DE ABREVIATÓES

Bq – Becquerel

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

Ci – Curie

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

COT – Carbono Orgânico Total

CV – Coeficiente de variaçãõ

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EHEC – enterohemorrágica

EIEC – enteroinvasivas

EPEC – enteropatogênicas

EPA – Environmental Protection Agency

ETEC – enterotoxigênica

Fosf. – Fósforo total

IAL – Instituto Adolf Lutz

kGy – quilo-gray

MeV – Mega elétron-volt

MOGGOD – Mixed Oxidant Gases Generated on Demand

NH₃ – Amônia

NMP – Número mais provável

NTK – Nitrogênio total Kjeldahl

OD – Oxigênio dissolvido

POA – Processos oxidativos avançados

SS – Sólidos suspensos

TDH – Tempo de detençaõ hidráulica

TMH – Trihalometano

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket/ anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo

UFC – Unidade formadora de colônia

U.V. – Ultravioleta

WHO – World Health Organization

WWD – World Water Day

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas de poluição dos cursos d'água é o lançamento de esgotos. A deterioração da qualidade da água se dá pela introdução de contaminantes como matéria orgânica, detergentes, patógenos, entre outros.

Segundo Von Sperling (2005), a presença da matéria orgânica afeta o equilíbrio ecológico do corpo d'água devido ao aumento da disponibilidade de fonte de energia para os microrganismos. Isto favorece o seu crescimento exagerado, em detrimento do oxigênio dissolvido na água, o que pode desencadear uma prevalência de microrganismos anaeróbios. Os detergentes também estimulam a reprodução de algas por disponibilizar o nutriente fosfato, ou atuam na formação de espuma e perturbação da tensão superficial da água. Em consequência há um prejuízo na diversidade de espécies do corpo aquático. A poluição também pode elevar a concentração de organismos patogênicos nas águas residuárias.

Os microrganismos encontram na água condições para desenvolver parte de seu ciclo biológico, perpetuando os ciclos de doenças de veiculação hídrica. Gastroenterites bacterianas, amebíase, giardíase e ascaridíase são exemplos de algumas doenças transmitidas por essa via. Segundo a WHO (2000) a diarreia é uma das principais causas de mortes nos países em desenvolvimento. No ano de 1998 foi estimado que a diarreia mata 2,2 milhões de pessoas no mundo, sendo que a maioria possui abaixo de 5 anos de idade. A cada ano ocorrem aproximadamente 4 bilhões de casos de diarreia no mundo. A ascaridíase é uma das infecções parasitárias humanas mais comuns. Mais de 10% da população dos países em desenvolvimento são infectadas com doenças intestinais, com a maior porcentagem causada por *Ascaris lumbricoides*. A ascaridíase provoca aproximadamente 60.000 mortes por ano, principalmente em crianças (WWD, 2001).

O tratamento convencional de esgoto doméstico procura melhorar a qualidade do efluente e do corpo d'água receptor, mas não é suficiente para retirar todos os contaminantes da água poluída. O esgoto tratado ainda contém microrganismos patogênicos, o que exige um pós-tratamento e uma destinação adequada do efluente para se interromper o ciclo de transmissão das doenças de veiculação hídrica. Por exemplo os reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) possuem uma boa eficiência de remoção de matéria orgânica e sólidos em suspensão embora a concentração dos poluentes nos efluentes não se enquadram nos requisitos exigidos pela legislação ambiental (MASCARENHAS *et al.*, 2004).

O esgoto tratado pode ser utilizado para os usos urbano e industrial, para manutenção de níveis de rios durante a estação seca, para fins de irrigação, entre outros. Para garantir a proteção da população o efluente a ser utilizado deve ter seu potencial de contaminação monitorado por meio da averiguação da presença de indicadores como os coliformes e a viabilidade dos ovos de helmintos.

A maioria dos coliformes que se encontram em esgoto doméstico são constituídos por *Escherichia coli*; uma bactéria de origem fecal e termotolerante. Estes organismos são utilizados como indicadores de contaminação por fezes (BASTOS *et al.*, 2000).

Os ovos de *A. lumbricoides* viáveis presentes no efluente permite a efetivação do ciclo evolutivo da ascaridíase (NEVES, 2004). Assim, este parâmetro também é considerado um indicativo de contaminação. Os ovos viáveis de *A. lumbricoides* são bons indicadores devido à sua resistência e à sua ubiquidade (GASPARD, 1995 *apud* CAPIZZI e SCHWARTZBROD, 2001). Os limites recomendados para a utilização do esgoto prescrevem alguns critérios de qualidade para o efluente, conforme apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Limites recomendados para utilização de esgotos tratados

Tipo de utilização	Atribuições da utilização	Qualidade para a água de reuso
Uso urbano irrestrito	Irrigação de campos de esporte, parques, jardins, limpeza de ruas e outros.	Menos de 200 NMP coliformes termotolerantes/100 mL Menos de 1 ovo de helminto/L
Uso urbano restrito	Irrigação de parques, canteiros de rodovia, abatimento de poeira em estradas e usos em construções	Menos de 1x10 ⁴ NMP coliformes termotolerantes /100 mL Menos de 1 ovo de helminto/L
Uso predial	Redes de água usada para descarga em vasos sanitários	Menos de 1x10 ³ NMP coliformes termotolerantes /100 mL
Uso agrícola irrestrito	Irrigação de culturas alimentícias não ingeridas cruas e pastagens	Menos de 1x10 ⁴ NMP coliformes termotolerantes /100 mL Menos de 1 ovo de helminto/L
Uso agrícola restrito	Irrigação de culturas alimentícias ingeridas cruas	Menos de 1x10 ³ NMP coliformes termotolerantes /100 mL Menos de 1 ovo de helminto/L

Adaptado Chernicharo *et al.* (2006)

A desinfecção é fundamental para permitir um uso mais nobre do esgoto. A ação do agente desinfetante se dá através de mudanças bioquímicas que ocorrem nos organismos patogênicos existentes no meio. Existem vários métodos de desinfecção de esgoto, como a cloração, a ozonização e o emprego da radiação ultravioleta. Mas deve-se considerar que enquanto a desinfecção pode atuar na inativação de microrganismos ela também induz mudanças químicas no ambiente, que podem produzir toxicidade no efluente. Alguns dos problemas que preocupam os pesquisadores ligados à área de saneamento envolvem a formação de

subprodutos da desinfecção, como os organoclorados, em função de serem potencialmente oncogênicos, e a ineficiência dos processos para remover patógenos mais resistentes como ovos viáveis de *A. lumbricoides*.

Entre os processos de desinfecção de esgoto um que se mostra potencialmente superior aos métodos conhecidos em relação à efetividade de remoção de microrganismos patogênicos é o emprego da radiação ionizante, como por exemplo, a radiação gama.

O processo de irradiação do esgoto é considerado como uma tecnologia promissora devido à propriedade da radiação interagir com a água e seus poluentes. Uma das principais vantagens da irradiação gama é o seu potencial de oxidar a matéria e, assim, eliminar os microrganismos e, simultaneamente, o melhoramento da biodegradabilidade de substâncias poluidoras (BORRELY *et al.*, 1998).

Deste modo os efeitos múltiplos da irradiação de esgoto podem contribuir para o melhoramento da qualidade das águas residuárias antes de seu lançamento no corpo d'água, bem como o melhoramento das suas aplicações alternativas, com reflexos concretos na saúde pública.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a eficiência da irradiação gama na desinfecção de esgoto doméstico bruto e de esgoto tratado em reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

2.2 Objetivos específicos

- Avaliação da eficiência da radiação gama na inativação de coliformes e bactérias heterotróficas presentes em amostras de esgoto bruto e de esgoto tratado em reator UASB.
- Identificação das bactérias pertencentes à família Enterobacteriaceae a fim de se definir quais são as espécies mais resistentes à irradiação em amostras de esgoto bruto e de esgoto tratado em reator UASB.
- Avaliação da eficiência da radiação gama na inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides* em amostras de esgoto bruto e de esgoto tratado em reator UASB.
- Verificação da ação residual da radiação gama na desinfecção dos efluentes em questão.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Introdução

Para compreender melhor a desinfecção de esgoto pelo uso da radiação gama a revisão bibliográfica iniciou-se com uma exposição sobre alguns agentes etiológicos das doenças de veiculação hídrica presentes em esgoto doméstico. Em seguida realizou-se uma breve introdução a respeito dos principais métodos de desinfecção de esgoto. Na sequência, definiram-se alguns conceitos sobre o uso da radiação ionizante na desinfecção de esgoto, considerando a fonte radioativa e os seus mecanismos de interação com a matéria. Também se comentam alguns trabalhos sobre o uso da radiação ionizante na desinfecção de águas residuárias. Foi feita uma breve consideração a respeito do licenciamento ambiental da desinfecção de esgoto pela radiação. E, finalmente, foi realizada uma observação sucinta acerca das estimativas de custos da implantação do processo de desinfecção de águas residuárias por irradiação ionizante.

3.2 Organismos indicadores da eficiência da desinfecção

O uso inadequado de águas residuárias pode gerar riscos para a saúde pública. Para evitar a reincidência de doenças de veiculação hídrica o efluente a ser utilizado deve ter sua qualidade biológica rigorosamente monitorada.

Para se obter um efluente para uso urbano e agrícola, dentro dos padrões estabelecidos pelas legislações pertinentes, é necessária uma desinfecção eficiente de esgoto. O desempenho do processo se alicerça na sua capacidade de inativação de organismos, o que inclui os organismos indicadores de contaminação fecal. A inativação pode ser estimada pela diferença entre a concentração de organismos indicadores de contaminação fecal antes e depois da aplicação do processo.

Conforme Bastos *et al.* (2003b), um organismo indicador da eficiência do tratamento deve apresentar: uma resistência maior ao método empregado que outros patógenos; o mecanismo de inativação de ambos deve ser semelhantes e as taxas de inativação/decaimento de ambos devem ser similares.

Ainda segundo Bastos *et al.* (2003b), a avaliação da eficiência da desinfecção do esgoto não possui um único indicador que responda pela remoção de todos os organismos patogênicos que podem estar presentes. Desta forma, com base na WHO (1989), este trabalho realizou um

monitoramento microbiológico e um monitoramento parasitológico do efluente sanitário a fim de que um parâmetro complementasse o outro sobre a resistência de diversos tipos de organismos potencialmente patogênicos durante o processo de desinfecção.

3.2.1 Coliformes totais e coliformes termotolerantes

Os organismos associados ao intestino de animais homeotérmicos podem funcionar como indicadores de contaminação fecal se encontrados fora de seu habitat natural. Um exemplo de organismos que existem em números substanciais nas fezes é o grupo coliforme, mais precisamente o sub-grupo dos coliformes termotolerantes ou especificamente a bactéria *E. coli*, principal representante desse sub-grupo.

A detecção de coliformes termotolerantes ou a *E. coli* no ambiente é assumida como indicativo de contaminação fecal. Isso representa um risco potencial para a saúde pública. O contato direto de um indivíduo com microrganismos de origem intestinal não significa obrigatoriamente contaminação por doenças de transmissão oro-fecal. O risco sanitário depende do potencial patogênico dos organismos que infectam uma pessoa.

Grande parte dos coliformes termotolerantes ou das cepas de *E. coli* são comensais ou mutualísticas inofensivas (LECLERC *et al.*, 2001; TORTORA *et al.*, 2005) no intestino de animais de sangue quente e estão associadas a fezes. Mas, ainda assim podem existir outras espécies ou outras cepas de *E. coli* que causam síndromes diarréicas distintas devido aos seus fatores de virulência. As principais categorias de *E. coli* incluem as enterohemorrágicas (EHEC), as enterotoxigênicas (ETEC), as enteroinvasivas (EIEC), e as enteropatogênicas (EPEC) (WHO, 2005; LECLERC *et al.*, 2001; TORTORA *et al.*, 2005).

Segundo Tortora *et al.* (2005) os coliformes totais são definidos como bastonetes gram-negativos aeróbios ou anaeróbios facultativos, não formadores de endosporos, que fermentam lactose com produção de gás em 24 h – 48 h de incubação em caldo lactosado a 35 °C. Dentro do grupo dos coliformes totais está o grupo dos coliformes termotolerantes. Estas bactérias fermentam a lactose com produção de ácido e gás dentro de 24 horas a $44,5 \pm 0,2$ °C.

Vários autores (CERQUEIRA e HORTA, 1999; BASTOS *et al.*, 2000; LECLERC *et al.*, 2001; GRIFFO *et al.*, 2003) questionam o uso dos coliformes termotolerantes como parâmetro indicativo de contaminação fecal.

Atualmente, o indicador mais apropriado para se avaliar a poluição da água por material fecal é, em qualquer situação, a *E. coli* (BASTOS *et al.*, 2000). Mas, o custo da sua detecção por métodos cromofluorogênicos é mais elevado que o custo da detecção de coliformes termotolerantes pelo método dos tubos múltiplos.

Ao considerar os custos das metodologias, e o fato de que *E. coli*, microrganismo de origem fecal pertencente à flora normal do intestino de animais de sangue quente (TORTORA *et al.*, 2005), representa percentuais em torno de 96% a 99% dos coliformes termotolerantes (CERQUEIRA e HORTA, 1999), este parâmetro ainda pode ser utilizado, ponderando-se seus limites de sensibilidade e de confiabilidade.

3.2.2 Bactérias heterotróficas

Tortora *et al.* (2005) definem as bactérias heterotróficas e mesófilas como microrganismos que requerem uma fonte orgânica de carbono e apresentam uma temperatura ótima de crescimento entre 25 e 40°C. A contagem de microrganismos heterotróficos em placas é um procedimento para estimar o tamanho de uma população bacteriana, e pode ser empregado como um indicador primário de eficiência de desinfecção (APHA, 1998; EPA, 1999). Isso, porque permite medir mudanças nas concentrações de microrganismos durante um processo de tratamento (APHA, 1998; EPA, 1999), bem como estimar a composição orgânica total de um ambiente aquático segundo seu grau de poluição (APHA, 1998).

3.2.3 Viabilidade de ovos de *Ascaris lumbricoides*

A viabilidade do ovo de *A. lumbricoides* é um parâmetro importante para avaliação da eficiência de desinfecção. Este parâmetro também complementa os indicadores microbianos para a resposta epidemiológica sobre o risco do uso de um efluente para fins mais nobres (WHO, 1989). Isso porque a viabilidade é a capacidade da massa germinativa (embrião) dos ovos eliminados com as fezes se tornarem larva infectante em condições ambientais favoráveis (NEVES, 2004).

A presença do ovo no efluente por si só não representa risco para a saúde pública. O ciclo biológico da ascaridíase exige que o ovo fértil nas fezes de um indivíduo contaminado se desenvolva em ovo com larva infectante no ambiente, em presença de oxigênio, umidade mínima de 70% e temperaturas ótimas entre 20°C a 30°C (NEVES, 2004). Apenas o ovo larvado representa risco para a saúde pública. Daí a importância epidemiológica de se monitorar a viabilidade do ovo encontrado em um efluente. A Figura 3.1 mostra ovos de *A.*

lumbricoides (A) fértil e não infectante (B) e larvado e infectante. Na Figura 3.2 é mostrado um ovo de *A. lumbricoides* infértil.

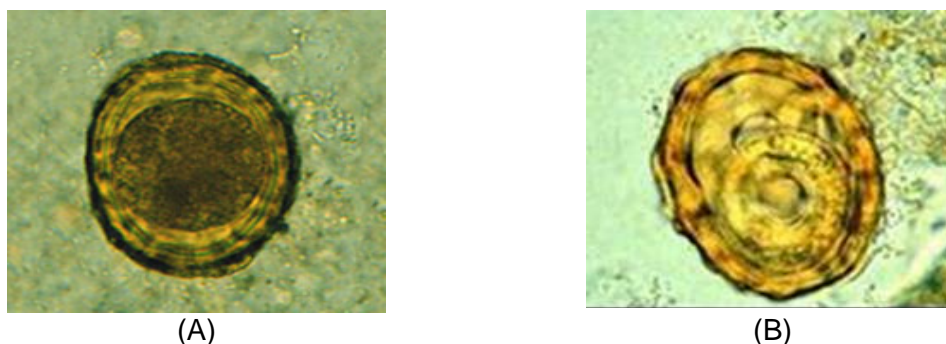


Figura 3.1 – Ovos de *A. lumbricoides* (A) fértil e não-infectante e (B) larvado e infectante

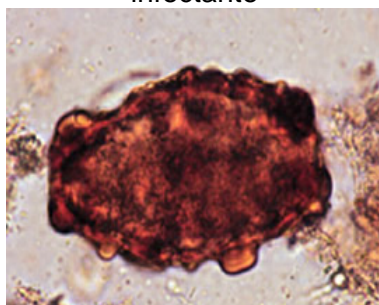


Figura 3.2 – Ovo infértil de *A. lumbricoides*

Fonte: www.dpd.cdc.gov

Os ovos viáveis de *A. lumbricoides* também constituem um ótimo indicativo da eficiência de desinfecção devido à sua ubiquidade (GASPARD, 1995 *apud* CAPIZZI e SCHWARTZBROD, 2001), e à sua resistência a agentes químicos e a agentes físicos, como pH extremamente baixo e temperaturas moderadas (YEAGER e O' BRIEN, 1983). A resistência do ovo de *A. lumbricoides* ao ataque de agentes químicos é decorrente do seu envoltório, que geralmente é impermeável à maioria das substâncias químicas devido à presença de ligações covalentes entre suas proteínas (HORAK, 1994; GODINHO, 2003).

A ascaridíase está amplamente disseminada pelo mundo porque ela ocorre com elevada frequência em regiões tropicais e subtropicais e em áreas com saneamento inadequado (WWD, 2001). Além do mais, as fêmeas de *A. lumbricoides* podem colocar mais de 200 mil ovos por dia, embora nem todos os ovos sejam férteis (NEVES, 2004), o que contribui para a ascaridíase ser uma das infecções parasitárias mais comuns nos humanos (WWD, 2001).

A inibição do desenvolvimento de ovos viáveis de *A. lumbricoides*, por meio da inativação do desenvolvimento do estágio de larva, é usado como indicador do sucesso da desinfecção (SHAMMA e AL-ADAWI, 2002). A maioria das formas convencionais de desinfecção não

possui uma alta eficiência de inativação de ovos de *A. lumbricoides* (SILVA *et al.*, 2001; ANDREOLI *et al.*, 2002; GONÇALVES *et al.*, 2003b; LAPOLLI *et al.*, 2003).

Assim, a viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* é um bom parâmetro de avaliação de eficiência de desinfecção. Isso, porque se o processo impedir a formação de larva infectante, o ciclo biológico do helminto é interrompido, o que diminui o risco de transmissão de doenças e trás reflexos positivos à saúde pública.

3.3 Desinfecção de esgoto

A desinfecção de esgotos é fundamental para a remoção da maioria dos organismos patogênicos remanescentes do tratamento convencional. Independente de qual seja o destino dos efluentes os impactos na saúde pública podem ser minimizados. Alguns tipos de processos de desinfecção de esgoto doméstico estão sumarizados na Figura 3.3.

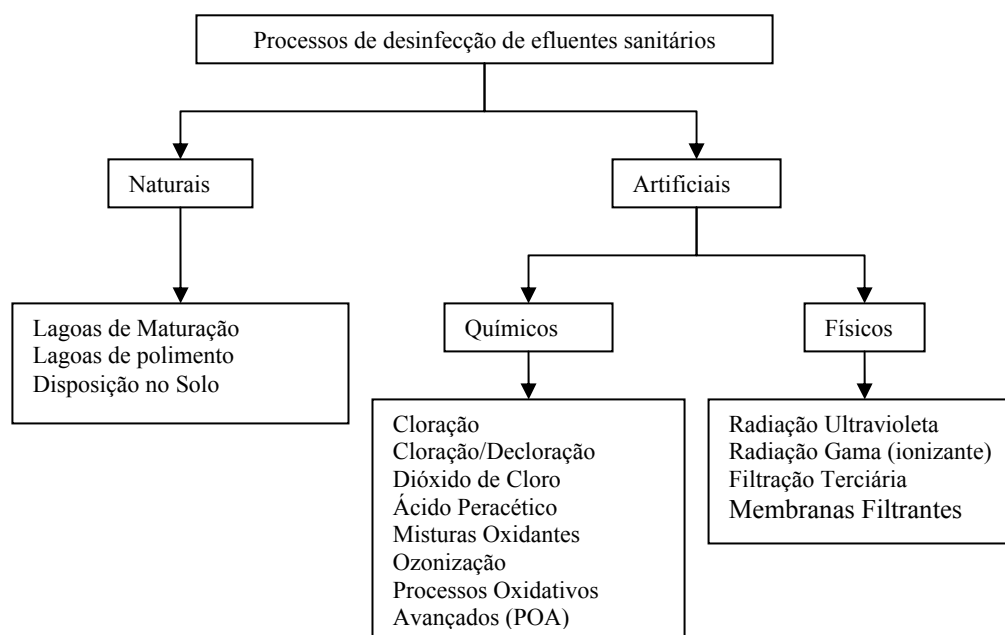


Figura 3.3 – Processos de desinfecção de esgotos sanitários

Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (2003b)

3.3.1 Desinfecção por métodos naturais

As lagoas de maturação e de polimento são exemplos do emprego de método natural para desinfecção de um efluente doméstico. A remoção de patógenos é uma das funções mais importante das lagoas. As lagoas de maturação e de polimento são rasas, o que permite a penetração da luz solar em quase toda massa líquida. A radiação solar aquece a coluna d'água, aumenta a taxa de fotossíntese, eleva o oxigênio dissolvido (OD), bem como o potencial

hidrogeniônico (pH). Estas condições favorecem o crescimento de algas e outros organismos que por sua vez diminuem a disponibilidade de nutrientes, e têm o potencial de estabelecerem relações ecológicas de amensalismo, competição e predação com os organismos patogênicos. Assim, as lagoas favorecem alterações nas condições abióticas e bióticas do meio em detrimento dos organismos patogênicos como bactérias e vírus. Já a remoção de cistos de protozoários e ovos de helmintos se dá principalmente pelo mecanismo de sedimentação (VON SPERLING, 1996; MASCARENHAS *et al.*, 2004; VON SPERLING, 2005).

Um outro método natural de se reduzir os organismos patogênicos de efluentes domésticos é a sua disposição no solo. A redução de patógenos pode ocorrer devido a fatores ambientais adversos, tais como: radiação, volatilização, desidratação, oxidação, sedimentação, filtração, além da predação. O efluente pode ser aplicado em solo para a fertirrigação, e para a recarga do lençol freático, com o devido cuidado com a qualidade biológica do efluente (BASTOS *et al.*, 2003a; CORAUCCI FILHO *et al.*, 2003; VON SPERLING, 2005).

De acordo com Von Sperling (2005) os sistemas naturais são aliados a uma maior simplicidade operacional, mas exigem um tempo de detenção hidráulica maior e grandes áreas para alcançar uma desinfecção eficiente.

3.3.2 Desinfecção por métodos artificiais

3.3.2.1 Desinfecção por métodos químicos

Os métodos químicos de desinfecção de esgoto agem pelo potencial de oxidação, que pode remover elétrons e danificar a membrana celular dos microrganismos e eventualmente causar efeitos letais aos organismos patogênicos (ACHER *et al.*, 1997).

A cloração é um método de desinfecção químico que é bastante efetivo na inativação de vários microrganismos patogênicos encontrados no esgoto. Este método deixa um residual que é facilmente medido e controlado, além de ser econômico (EPA, 1999).

O uso do cloro na desinfecção de esgoto representou uma evolução na qualidade da saúde pública. Mas, apesar de seu uso, as doenças de veiculação hídrica não desapareceram (SOUZA e DANIEL, 2005) devido à presença de organismos patogênicos resistentes à cloração, como os cistos de protozoários e ovos de helmintos. É sabido que a reação do cloro com compostos orgânicos presentes no meio gera subprodutos potencialmente oncogênicos. Por exemplo, os trihalometanos (THMs) podem prejudicar a cadeia alimentar de ecossistemas

aquáticos e gerar riscos à saúde humana (EPA, 1999; BAIRD, 2001 *apud* LAPOLLI *et al.*, 2005).

Para minimizar os efeitos negativos no ambiente gerados pelos subprodutos da cloração pode-se empregar a decloração antes da destinação do efluente tratado com cloro, através do uso de dióxido de enxofre ou outros produtos (VON SPERLING, 2005).

Um outro método químico de desinfecção é a adição de dióxido de cloro ao esgoto. O dióxido de cloro é um radical livre em sistemas aquosos, que funciona como um oxidante altamente seletivo devido ao seu mecanismo de transferência de um único elétron. Com isso o dióxido de cloro é reduzido a clorito sem produzir hipoclorito ou cloro gasoso (EPA, 1999). O dióxido de cloro também oxida a matéria orgânica incluindo os precursores dos organoclorados (CHERNICHARO *et al.*, 2001), o que pode minimizar a formação de subprodutos tóxicos (LAPOLLI *et al.*, 2005).

A efetividade do desinfetante dióxido de cloro é semelhante à efetividade do cloro na remoção de microrganismos bacterianos, mas apresenta-se ainda mais efetivo na inativação de cistos de protozoários (LAPOLLI *et al.*, 2005). O dióxido de cloro é um composto neutro, com propriedades oxidantes estáveis em uma grande faixa de pH. Esta substância é um composto volátil, pode ser explosivo se sua concentração na atmosfera for maior que 10% em volume (difícil armazenamento). O dióxido de cloro deve ser gerado *in situ* e dissolvido em água (EPA, 1999; CHERNICHARO *et al.*, 2001).

Segundo a EPA (1999), as partículas em suspensão e agregação de patógenos podem afetar a eficiência de desinfecção do dióxido de cloro. Um outro inconveniente é a geração de subprodutos. Os subprodutos gerados pelo uso do dióxido de cloro incluem o clorito, clorato e outros subprodutos orgânicos (EPA, 1999). Os estudos toxicológicos de Zavaletta (1992) *apud* Lapolli (2005), sobre o uso de dióxido de cloro no tratamento de água, evidenciaram que esse composto não trás risco para a saúde humana. Ainda assim o clorito e o clorato, produtos da desinfecção por dióxido de cloro, mostram-se potencialmente nocivos à saúde humana (CHERNICHARO *et al.*, 2001). Estudos mais detalhados sobre a toxicidade deste método de desinfecção de esgoto devem ser realizados para verificar os seus efeitos no meio ambiente e na saúde pública.

De acordo com Von Sperling (2005) há vários outros métodos desinfetantes químicos, tais como: o permanganato de potássio, o íon ferrato (VI), o ácido peracético, a água oxigenada, o

gluturaldeído e o fenol/fenato, as misturas oxidantes (MOGGOD – mixed oxidant gases generated on demand), entre outros.

O desinfetante permanganato de potássio pode atingir eficiências elevadas de remoção de microrganismos em concentrações elevadas (DE LUCA e MONTEGGIA, 2003).

O emprego de ferrato (VI) em uma dosagem igual ou superior a 6 mg/L garantiu a produção de um efluente com menos de 1000 NMP de coliformes termotolerantes/100 mL. Essa dosagem também não influenciou na coagulação e não houve oxidação de matéria orgânica (DE LUCA *et al.*, 2002). Alguns tipos de efluentes desinfetados com ferrato (VI) apresentaram toxidez aguda, salvo efluentes de lodos ativados (CARDOSO e DE LUCA, 2004).

O ácido peracético é um composto orgânico com fortes propriedades oxidativas, com o poder bactericida semelhante ao efeito do hipoclorito de sódio (KOIVUNEN e HEINONEN-TANSKI, 2005). Segundo Gehra (2003) há duas sugestões sobre o mecanismo de desinfecção com esse composto: uma é que a propriedade desinfetante seja devido à formação de oxigênio ativo, que rompe ligações do conteúdo enzimático das membranas celulares, inibindo a atividade celular; e uma segunda que defende que o mecanismo de desinfecção do ácido peracético ocorre através da liberação de radicais hidroxilas.

Uma das vantagens da desinfecção pelo uso de ácido peracético é que não há produção significativa de subprodutos tóxicos e mutagênicos ou resíduos químicos no efluente (VESCHETTI *et al.*, 2003 *apud* KOIVUNEN e HEINONEN-TANSKI, 2005; CREBELLI *et al.*, 2005). De acordo com Koivunen e Heinonen-Tanski (2005) o ácido peracético em doses de 2 a 7 mg/L e com tempo de contato de 27 minutos reduziu em três unidades logarítmicas os coliformes totais e os enterococos e em uma unidade logarítmica os colifagos.

Em concentrações elevadas de matéria orgânica, a desinfecção por ácido peracético exigiu doses maiores para reduzir os coliformes totais e os enterococos em aproximadamente 3 a 4 unidades logarítmicas (KOIVUNEN e HEINONEN-TANSKI, 2005). Vale salientar que em situações de concentração elevada de matéria orgânica o ácido peracético é mais efetivo que o hipoclorito de sódio na inativação de microrganismos (SOUZA e DANIEL, 2005).

Uma das desvantagens da desinfecção pelo uso de ácido peracético é o aumento da quantidade de carbono orgânico dissolvido no efluente devido à liberação de ácido acético,

com o potencial de permitir o recrescimento microbiano no efluente desinfetado (SOUZA e DANIEL, 2005).

De acordo com Paixão *et al.* (2000) a técnica MOGGOD (mixed oxidant gases generated on demand) é a geração de solução oxidante no local de uso. A solução é produto da reação eletroquímica do cloreto de sódio, e íon hipoclorito em equilíbrio com o ácido hipocloroso, bem como traços de outros oxidantes. Consiste na produção de uma mescla de gases oxidantes através da passagem de corrente elétrica em uma solução aquosa de sal e água. Ainda segundo estes autores, a mistura oxidante inativou 99% de *E. coli* e colifagos logo após o seu adicionamento em água bruta, o que evidenciou um grande potencial de desinfecção dessa tecnologia. A cor e a turbidez aumentam o tempo de contato necessário para uma desinfecção eficiente.

A ozonização é um método de desinfecção bastante efetivo devido ao seu alto poder oxidante. Segundo Jyoti e Pandit (2004) a propriedade oxidante se dá pelo oxigênio nascente, formado pela decomposição do ozônio, que ataca outros compostos e forma os radicais livres, entre eles o radical hidroxila que é um dos agentes oxidantes mais reativos em ambientes aquosos (EPA, 1999). Embora a ação desinfetante do ozônio não seja bem entendida especula-se que oxidantes reage com compostos orgânicos da membrana celular, o que resulta na sua ruptura e afeta o DNA e a viabilidade celular. Assim a inativação do organismo patogênico é alcançada (JYOTI e PANDIT, 2004; GEHRA *et al.*, 2003).

O ozônio é mais efetivo que o cloro e derivados para a inativação de vários organismos existentes em águas residuárias, incluindo os vírus e cistos de protozoários (GEHRA *et al.*, 2003; EPA, 1999), embora os ovos de helmintos sejam resistentes a esse método de desinfecção (LAPOLLI *et al.*, 2003). Sua efetividade não é influenciada pelo pH (EPA, 1999). A dose de 17 mg/L de ozônio chegou a remover 3 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes e de colifagos (GEHRA *et al.*, 2003).

O ozônio não forma subprodutos halogenados quando oxida a matéria orgânica natural, mas pode formar vários subprodutos orgânicos e inorgânicos; como aldeídos, cetonas, subprodutos bromados e ácidos. Além do mais o ozônio é altamente corrosivo e tóxico (EPA, 1999).

Xu *et al.* (2002) mostraram que o conteúdo orgânico de um efluente pode influenciar a demanda de ozônio. Ainda segundo esses pesquisadores, devido a problemas operacionais e

de manutenção em estações de tratamento de esgoto, a ozonização passou a ser menos atrativa para substituir a cloração que outros métodos de desinfecção.

Os processos oxidativos avançados (POA) são métodos de desinfecção que atuam por reações químicas, com geração de radicais altamente oxidantes (hidroxilas) em concentrações elevadas. Os radicais gerados têm o potencial de mineralizar matéria orgânica e íons inorgânicos a formas não tóxicas como gás carbônico e água (FERREIRA e O'SHEA 2004).

Uma ampla diversidade de POA tem sido desenvolvido para tratamento de esgoto. Os radicais de hidroxilas podem ser obtidos a partir de oxidantes fortes, como a água oxigenada, o ozônio, a irradiação com UV com ou sem catalisadores (TiO_2), a irradiação ultrasônica, a irradiação por aceleradores de elétrons, a irradiação por raios gama, e os processos fenton (POLEZI, 2003; O'SHEA e KYUNG KIM, 2004), conforme ilustrado na Figura 3.4.

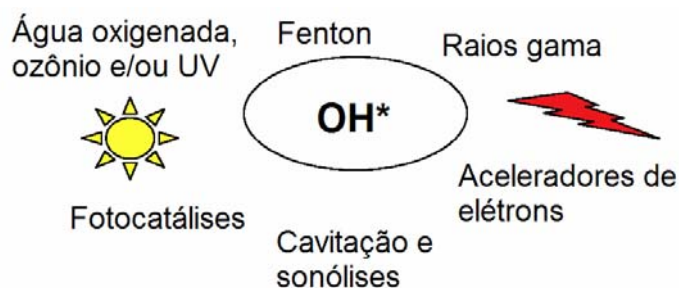


Figura 3.4 – Exemplos de tecnologias oxidativas avançadas que empregam a hidroxila.

Fonte: O'Shea e Kyung (2004)

Os POA podem ser enquadrados como método químico ou físico. De acordo com Jyoti e Pandit (2004) pode haver uma combinação entre os métodos, como por exemplo: ozônio e água oxigenada; ozônio e radiação ultravioleta; água oxigenada e radiação ultravioleta. Se as reações químicas formadoras de radicais hidroxilas forem quimicamente catalisadas os POA serão considerados métodos químicos. Se as reações químicas formadoras de radicais hidroxilas forem fotocatalisadas ou radioinduzidas os POA serão considerados métodos físicos. Se houver uma utilização de agentes químicos e físicos para gerar os radicais hidroxilas serão considerados uma combinação de ambos.

Algumas desvantagens dos processos oxidativos avançados levantadas por Polezi (2003) incluem o potencial de formação de subprodutos de reação, a exigência de tempo de retenção alto, chegando a ser utilizado reatores em batelada e mão de obra bem treinada e nível bom. Ferreira e Daniel (2004) abordaram uma possível influência da alcalinidade na eficiência do

processo devido à presença de carbono inorgânico que pode consumir as hidroxilas responsáveis pela oxidação catalítica.

3.3.2.2 Desinfecção por métodos físicos

Um aumento da consciência sobre as desvantagens do uso de desinfetantes químicos tem levado a procura de métodos físicos como alternativa. Os principais métodos físicos de desinfecção incluem a radiação ultravioleta e a radiação ionizante.

De acordo com a EPA (1999), a radiação ultravioleta (UV) é uma onda eletromagnética que inativa os organismos pela absorção da luz, que por sua vez provoca reações fotoquímicas e altera a estrutura molecular de componentes essenciais ao funcionamento normal da célula.

A absorção de radiação UV pelas células é máxima na faixa de 255 a 260 nm. A principal fonte de radiação UV no comprimento de onda germicida é a lâmpada de baixa pressão de vapor de mercúrio. Essa fonte emite ondas de 254 nm de comprimento, a faixa de energia bem próxima da absorvida pelos ácidos nucleicos (CHERNICHARO *et al.* 2001). A radiação UV com o comprimento de onda maior que 360 nm não possui efeito germicida (ACHER *et al.*, 1997).

A radiação UV atravessa a parede celular do organismo patogênico e é absorvida pelos ácidos nucleicos e, em menor extensão, pelas proteínas e por outras moléculas biologicamente importantes (DANIEL e CAMPOS, 1992). A energia absorvida pode romper as ligações não saturadas, principalmente as bases nitrogenadas pirimídicas, provocando a dimerização de pirimidinas adjacentes de um mesmo fio de cromossomo do DNA. Os dímeros formados em consequência das alterações provocadas pela radiação UV podem resultar em timina – timina (Figura 3.5), timina – citosina e citosina – citosina. As moléculas pirimídicas resultantes, uma vez unidas, deformam a estrutura helicoidal do DNA e dificultam a replicação do ácido nucleico. Caso a replicação ocorra, as novas células serão mutantes descendentes incapazes de se duplicar (GONÇALVES *et al.*, 2003^a). Isso interfere na precisão da replicação, o que pode levar a erros na transcrição, ou impedir a divisão celular, com consequente prejuízo ou morte celular (EPA, 1999; GEHRA *et al.*, 2003; GONÇALVES *et al.*, 2003^a).

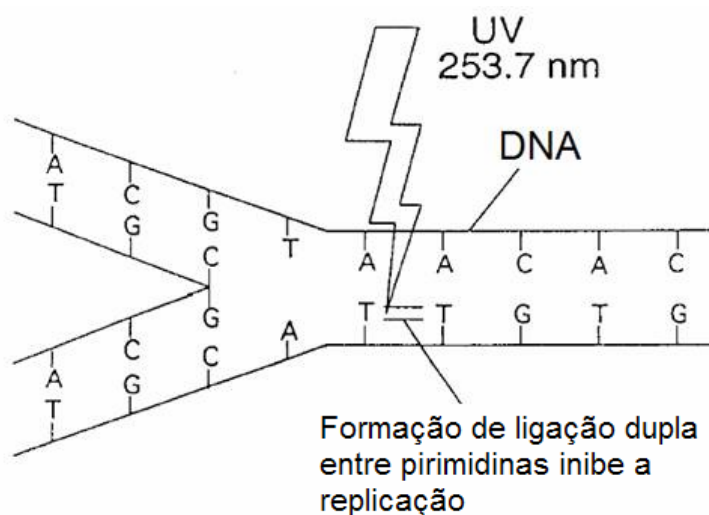


Figura 3.5 – Inativação do DNA pela radiação UV

Fonte: Adaptado de EPA (1999)

A EPA (1999) relata que a radiação UV inativa formas vegetativas e esporuladas de bactérias, vírus e microrganismos patogênicos. Ainda de acordo com EPA (1999), um sistema exposto a doses altas de radiação UV (8000 mJ/cm^2) foi capaz de inativar 2 unidades logarítmicas de oocistos de *Cryptosporidium*. A dose de 35 mJ/cm^2 foi necessária para remover de 3 ou mais unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes (GEHRA *et al.*, 2003).

Existem alguns fatores que podem afetar a performance da qualidade da desinfecção do esgoto. A absorção dos raios UV é prejudicada pela absorbância da radiação (BORRELY *et al.*, 1998), pela presença de turbidez e cor em um efluente, que podem proteger os microrganismos associados às partículas (BORRELY *et al.*, 1998; EPA, 1999; GEHRA *et al.*, 2003; GONÇALVES *et al.*, 2003^a; TAGHIPOUR, 2004); pela dose requerida para a inativação de determinados microrganismos (AL-ADAWI *et al.*, 2006), pela concentração inicial de microrganismos no esgoto, pela presença de microrganismos agregados (BORRELY *et al.*, 1998); pela formação de películas de substâncias químicas e biológicas na superfície das lâmpadas UV (EPA, 1999).

Chernicharo *et al.* (2001) encontraram uma excelente eficiência de inativação de *E. coli* e de ovos de *A. lumbricoides* pela radiação UV. Para a dose de 14 mW. s/cm^2 foram obtidas médias de eficiência de inativação de *E. coli* da ordem de 5 unidades logarítmicas para efluente do filtro biológico percolador e 4 unidades logarítmicas para efluente do reator UASB. Foi obtida também eficiência média de inativação de ovos de *A. lumbricoides* da ordem de 1 unidade logarítmica para efluente do filtro biológico percolador.

Já Al-Adawi *et al.* (2006) encontraram que a desinfecção de esgoto pelo uso da radiação UV acelerou o desenvolvimento da larva no ovo de *A. lumbricoides*. Em doses que variaram de 8,5 a 15.370 mW. s/ cm² (2s a 60min), não houve um efeito letal em ovos de *A. lumbricoides*. Os autores detectaram um aumento na taxa de desenvolvimento do ovo em função da dose de radiação aplicada.

Essas diferenças podem ser decorrentes da origem dos ovos de *A. lumbricoides* utilizados nos experimentos pelos dois autores. Chernicharo *et al.* (2001) utilizaram ovos provenientes de útero de fêmea adulta, desprovidos de membrana mamilonada e com isso possivelmente mais sensíveis à radiação UV. Al-Adawi *et al.* (2006) utilizaram ovos férteis provenientes de fezes humanas, com membrana mamilonada. No estudo de Al-Adawi *et al.* (2006) o efeito letal no ovo de *A. lumbricoides* não acontece provavelmente porque o envoltório do ovo seria resistente à penetração dos raios UV. Esses dados entram em conflito com o objetivo de desinfecção da radiação UV de controlar doenças de veiculação hídrica.

Outro tipo de desinfecção física que pode ser utilizada no tratamento de esgoto são as radiações ionizantes, como os elétrons de alta energia e a radiação gama. Vários estudos demonstram a efetividade das radiações ionizantes na desinfecção de esgoto (FAROOQ *et al.*, 1993; BORRELY *et al.*, 1998; CAPIZZI e SCHWARTZBROD, 2001; BASFAR e ABDEL REHIM, 2002; TAGHIPOUR, 2004).

3.4 Radiação ionizante

3.4.1 Considerações gerais

A radiação ionizante é uma emissão ou propagação de energia por intermédio de ondas ou por partículas dotadas de energia cinética e cargas, capaz de retirar elétrons do meio com o qual interage (NOUAILHETAS, 2003).

A radiação ionizante modifica o sistema com que interage. Isso porque a radiação é freada no material exposto e perde sua energia pela interação com os elétrons do produto irradiado. Isso provoca energia cinética adicional, nos elétrons, capaz de arrancá-los de seus orbitais. Assim, podem ocorrer quebras de ligações químicas e desestruturações de biomoléculas (TAUHATA *et al.*, 2003; NOUAILHETAS, 2003).

Vale lembrar que a quantidade de energia absorvida por uma unidade de massa exposta à determinada radiação é definida como dose absorvida. O Gray (Gy) é a unidade de dose

absorvida e é expressa em Joule/quilograma (J/kg) (BORRELY *et al.*, 1998; FAROOQ *et al.*, 1993).

3.4.2 Fontes Radioativas

Existem dois tipos principais de emissores de radiação ionizante, os aceleradores de elétrons e os irradiadores com fonte gama. No caso dos aceleradores de elétrons, a partir de um feixe de elétrons há geração de radiação eletromagnética de espectro contínuo. Já os raios gama são conseqüências da estabilização de um nuclídeo radioativo que dissipa sua energia excedente através da emissão de onda eletromagnética, na forma de fótons altamente energéticos, como ilustrado na Figura 3.6 (TAUHATA *et al.*, 2003). O fóton da radiação gama é similar ao da luz, embora seja dotado de mais energia e menor comprimento de onda (BORRELY *et al.*, 1998). A velocidade da desintegração de um átomo radioativo é a sua radioatividade. A unidade de medida das desintegrações por segundo é o Becquerel (Bq), que corresponde a s^{-1} no sistema internacional. Uma outra unidade, mais antiga, mas ainda bem difundida é o Curie (Ci). 1 Ci equivale a $3,7 \times 10^{10}$ Bq (NOUAILHETAS, 2003).

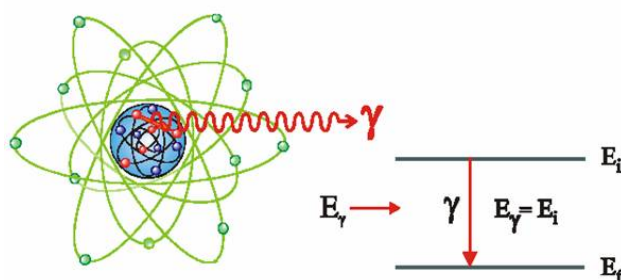


Figura 3.6 – Emissão de raios gama por um nuclídeo instável

Fonte: Thauata (2003)

O ^{60}Co é um radioisótopo artificial formado em um reator nuclear, a partir da adição de um nêutron ao metal ^{59}Co , ilustrado na reação a seguir:



A estabilidade do ^{60}Co é obtida pelo seu decaimento a ^{60}Ni , um nuclídeo estável, como mostra a reação 2 e a Figura 3.7. O ^{60}Co possui uma meia vida de 5,26 anos e libera fótons com energia de 1,17 e 1,33 MeV, o que soma uma energia total de 2,5 MeV. A título de comparação, a radiação UV libera fótons com energia de 100 eV (THOMPSON e BLATCHLEY, 1999).



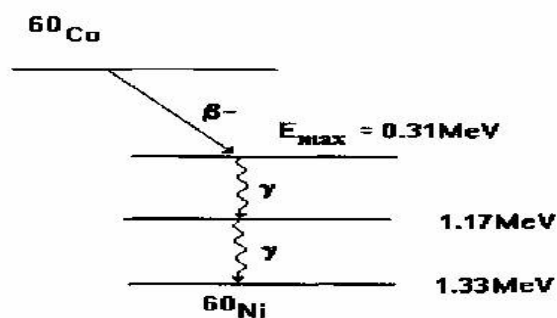


Figura 3.7 – Decaimento do cobalto 60 a níquel 60

Fonte: Borrely *et al.* (1998)

De acordo com Borrely *et al.* (1998) as diferenças básicas entre as irradiações com aceleradores de elétrons e com fonte de ^{60}Co são as taxa de dose de radiação e o poder de penetração de cada tipo de irradiação. A penetração do feixe de elétrons gerada por aceleradores no material irradiado é mais curta que a penetração da radiação gama com a mesma energia. As curvas das distribuições das doses de radiação gama e de feixes de elétrons estão ilustradas na Figura 3.8.

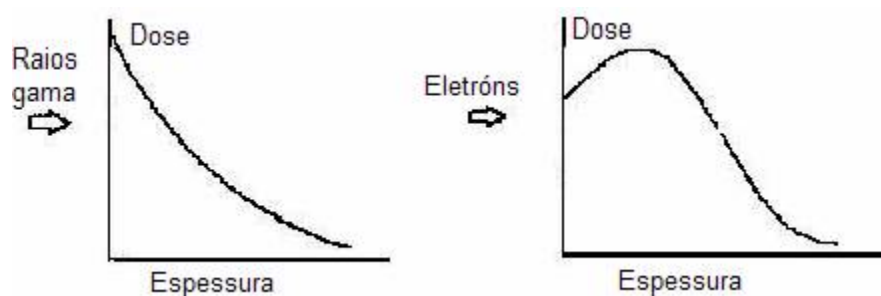


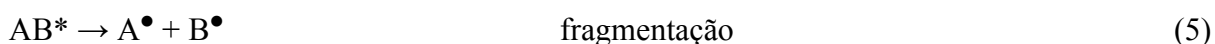
Figura 3.8 – Distribuição da dose de radiação em função da espessura do material exposto a raios gama e a aceleradores de elétrons

Fonte: Borrely (1998)

Farooq *et al.* (1993) comparou a desinfecção de esgoto por radiação gama e por aceleradores de elétrons utilizando três indicadores de desinfecção: os colifagos, os coliformes totais e termotolerantes e as bactérias heterotróficas. Foi verificado que a inativação dos microrganismos com aceleradores de elétrons reduziu suas concentrações em aproximadamente três unidades logarítmicas na dose de radiação 5 kGy. A inativação dos microrganismos com raios gama em dose de radiação similar apresentou-se superior em aproximadamente duas ordens de magnitude quando comparado com aceleradores de elétrons. Dessa forma, uma melhor eficiência de desinfecção de esgoto foi alcançada para a radiação gama.

3.4.3 Interação da irradiação com a matéria

A interação da radiação gama com o esgoto gera vários eventos, tais como a excitação atômica ou molecular e a ionização, que pode levar à oxidação, dissociação e a degradação de biomoléculas (TAUHATA *et al.*, 2003), conforme descrito pelas as equações 3 a 6, a seguir (BORRELY *et al.*, 1998).



Desta forma, as reações das substâncias à irradiação são capazes de provocar fragmentação da molécula-alvo, induzindo a formação de íons e radicais altamente reativos para iniciar os efeitos físicos, químicos e biológicos na matéria (GETOFF, 1996; BORRELY *et al.*, 1998).

A ação da radiação gama pode ter efeitos diretos ou indiretos. Na ação direta a onda eletromagnética da radiação interage diretamente na molécula alvo, enquanto que na ação indireta a molécula alvo é afetada pelos produtos radiolíticos reativos formados a partir das interações entre a matéria e a radiação. A maioria dos efeitos da irradiação de esgoto são indiretos devido à interação dos raios gama com a molécula de água, que é a responsável principal dos efeitos indiretos da irradiação. (EPN, 1997; BORRELY *et al.*, 1998). A Figura 3.9 resume os tipos de efeitos da radiação ionizante em células no meio aquoso.

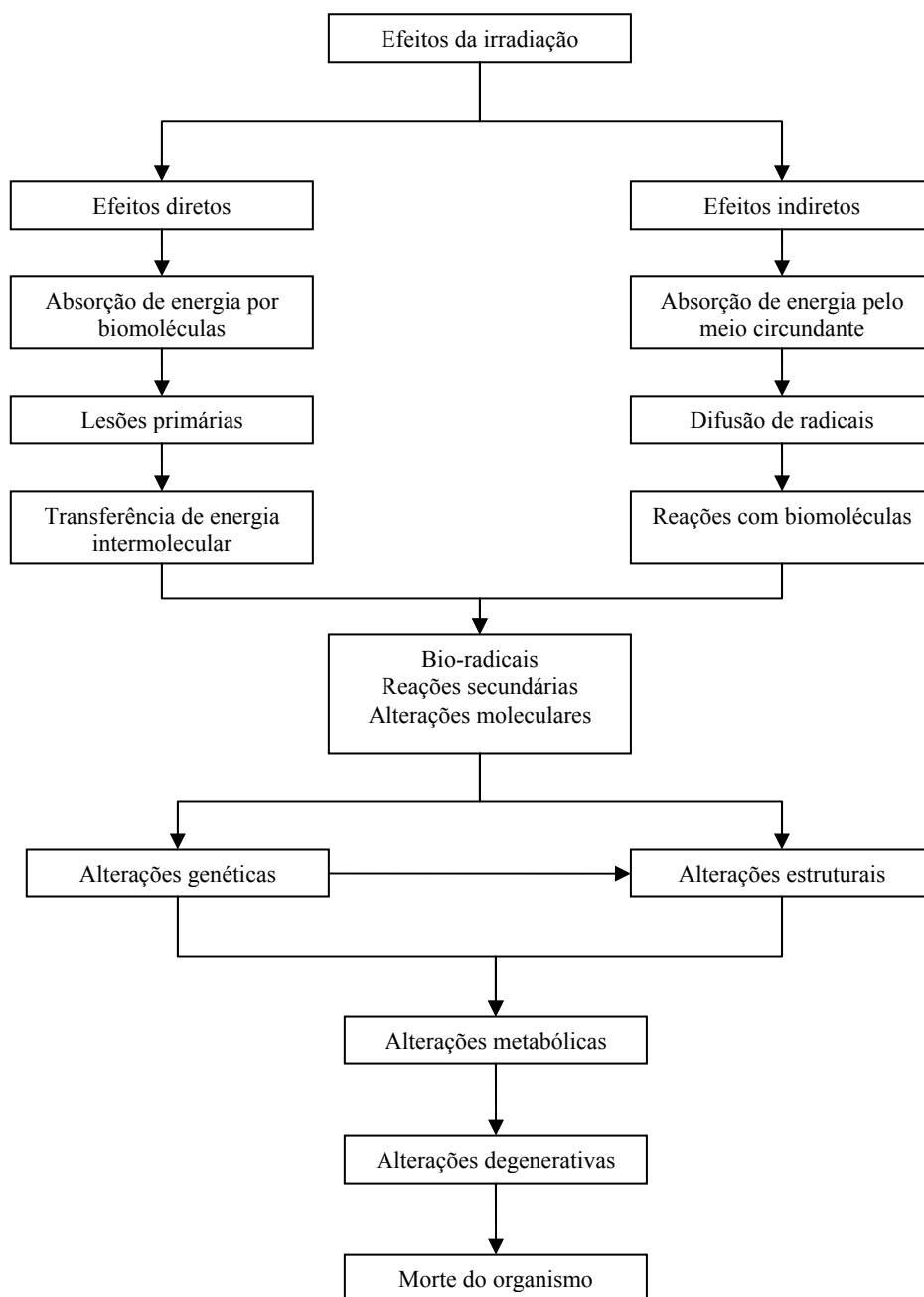


Figura 3.9 – Esquema dos efeitos diretos e indiretos da irradiação

Fonte: EPN (1997)

Durante a irradiação do esgoto ocorre a radiólise da água, onde a molécula é eletronicamente excitada e moléculas ionizadas são formadas. Assim, são observadas várias ocorrências, como a oxidação e a geração de espécies oxidativas primárias, por exemplo, OH^- , e^-_{aq} e H^+ , e produtos, como H_2O_2 e H_2 e outros radicais altamente reativos, como ilustrados na Figura 3.10 (NOUAILHETAS, 2003; FAROOQ *et al.*, 1993).

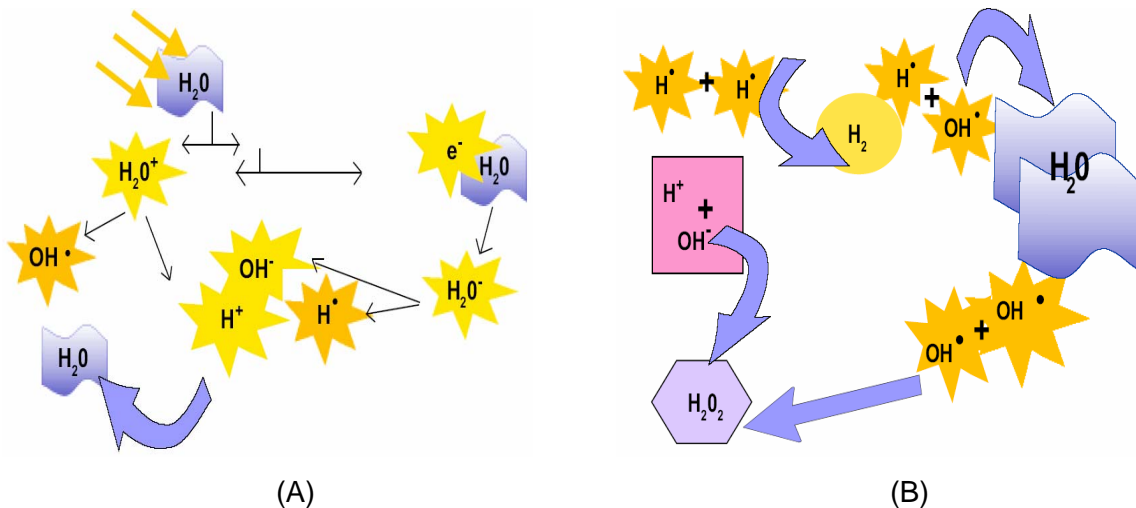
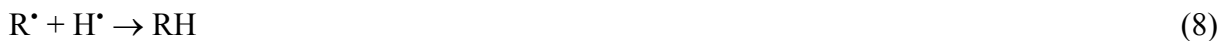


Figura 3.10 – Esquema da radiólise da água (A) e Esquema das reações químicas decorrentes da radiólise da água (B)

Fonte: Nouailhetas (2003)

O elétron aquoso reage via transferência de elétrons. O radical de hidrogênio reage através da adição ou da retirada de hidrogênio em uma molécula. A hidroxila envolve a adição ou retirada de hidrogênio, transferência de elétrons e recombinação radical-radical. A recombinação envolvendo OH^\cdot e H^\cdot , e^-_{aq} e O_2 podem formar o H_2O_2 , um forte oxidante (FAROOQ *et al.*, 1993).

As espécies reativas formadas durante a radiólise da água podem reagir com os elementos imprescindíveis à vida dos microrganismos, como é o caso do carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e fósforo. Desta forma macromoléculas como os ácidos nucleicos, as proteínas, os lipídeos, os carboidratos e os sais minerais, exemplificados pelas reações 7 a 10, são afetados e causam prejuízo à existência da célula.



(BORRELY *et al.*, 1998).

Em geral tais alterações moleculares nem sempre são prejudiciais. Para tal é necessário que a substância afetada tenha uma função celular fundamental. Por exemplo, alterações na estrutura coloidal, na membrana plasmática, na genética, no metabolismo ou/e na capacidade reprodutiva de células podem afetar suas funções essenciais, o que exerceria efeito prejudicial

ou letal nos microrganismos como bactérias, vírus, esporos, algas e parasitas em geral (BORRELY *et al.*, 1998; EPN, 1997; TAUHATA *et al.*, 2003). Assim, seria promovido o efeito desinfetante da radiação gama nos esgotos.

A alteração de lipídios, um dos componentes de membranas celulares, pela ação da irradiação pode levar a conseqüências letais para o microrganismo. A Figura 3.11 mostra o esquema de um lipídio, com a indicação de alguns possíveis locais de quebra de sua molécula por meio da atuação da radiação ionizante.

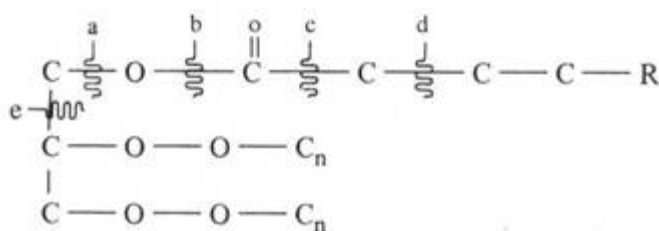


Figura 3.11 – Esquema de lipídio com indicação de locais onde a quebra é preferencial

Fonte: International Atomic Energy Agency (1982)

As proteínas são aminoácidos alinhados seqüencialmente para exercer funções estruturais ou metabólicas; tais como as proteínas plasmáticas presentes na membrana celular e as enzimas catalisadoras das reações metabólicas celulares (TORTORA *et al.*, 2005). A irradiação de proteínas pode diminuir seu peso molecular devido à sua fragmentação, alterar a conformação espacial e conseqüentemente a função protéica. Danos em suas moléculas podem levar a modificações metabólicas pela perda do poder catalítico das enzimas nas reações bioquímicas específicas, bem como alterações estruturais no organismo irradiado (EPN, 1997). Estas alterações podem inativar o organismo patogênico.

O DNA é a molécula gerenciadora da célula e tem a função de transmitir a hereditariedade e coordenar a síntese de proteínas. O DNA pode ser danificado pela radiação devido às lesões de quebras de ligações simples e de ligações duplas, e alterações, como substituições ou deleções, de seus açúcares ou bases nitrogenadas (TAUHATA *et al.*, 2003).

A Figura 3.12 ilustra os eventos que podem ocorrer na irradiação do DNA. Segundo EPN (1997) a irradiação do DNA pode formar radicais em diversas partes de sua molécula. Estes radicais podem provocar desaminação e desidroxilação, e levar ao rompimento das ligações pentose e base nitrogenada, oxidação de açúcares, entrecruzamento de fitas de DNA, entre outros eventos. Estas reações químicas podem gerar mutações ou quebra da molécula de DNA

com conseqüências drásticas na codificação de proteínas, alterações nas funções enzimáticas, no metabolismo celular, além do potencial de interferir na reprodução celular e produzir efeitos letais nos organismos em questão.

Nem todas as conseqüências do contato da radiação ionizante com a molécula de ácido nucléico acarretam obrigatoriamente em danos celulares. A radiação ou seus produtos podem alterar partes nas seqüências de DNA não codificadoras de funções orgânicas. Também existe um mecanismo de reparo do DNA que pode possibilitar uma restauração e manutenção de sua função. Um alvo atingido por uma dose de radiação baixa pode possibilitar condições de recuperar sua integridade estrutural (NOUAILHETAS, 2003; TAUHATA *et al.*, 2003).

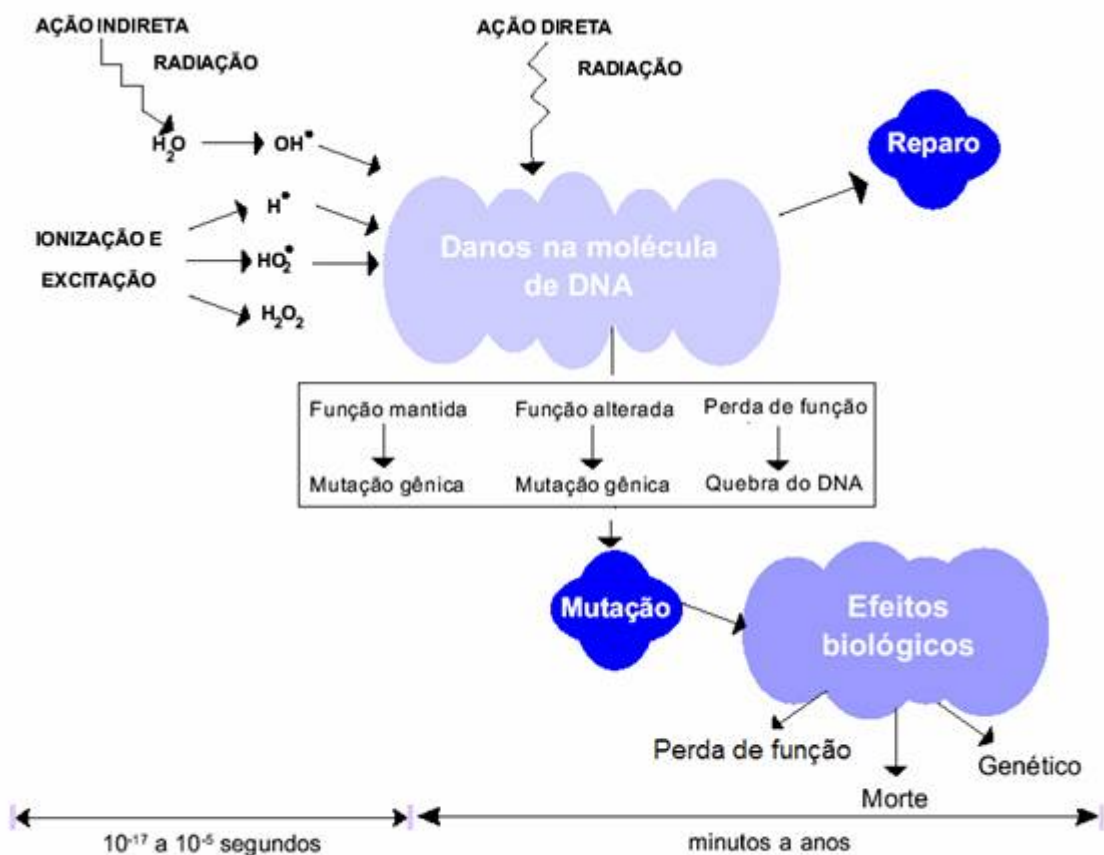


Figura 3.12 – Danos na molécula de DNA provocados pela radiação ionizante

Fonte: Nouailhetas (2003)

Conforme EPN (1997) e Borrelly *et al.* (1998) a ação da irradiação nos organismos depende de fatores como dose de irradiação, taxa de dose, distribuição da dose, da concentração inicial e tipo do organismo, e da composição química do meio irradiado. Vale lembrar que a taxa de dose é a quantidade de dose absorvida em um intervalo de tempo. A taxa de dose varia em função da distância da fonte radioativa (EPN, 1997).

A teoria do alvo defende que a ionização de moléculas alvo, moléculas fundamentais para a sobrevivência do organismo são responsáveis pelo efeito da irradiação (CASARETT, 1968 *apud* BORRELY *et al.*, 1998). O organismo só é comprometido pela irradiação gama se o alvo atingido possuir uma função básica, como é o caso da molécula de DNA.

A resposta que um determinado tipo de organismos dá a doses de irradiação caracteriza sua radiosensibilidade. A radiosensibilidade de um organismo presente no esgoto se expressa em função da dose de radiação necessária para diminuir a concentração de organismos em uma unidade logarítmica, também chamado de D₁₀ (RAWAT *et al.*, 1997). De acordo com Farooq *et al.* (1993) microrganismos são mais sensíveis à irradiação do que os ovos de parasitas, mas os vírus são os organismos mais difíceis de se remover.

O oxigênio e os íons metais de transição podem elevar o grau dos efeitos biológico da irradiação (METTLER e UPTON, 1995 *apud* PEREIRA, 1997).

3.4.4 Toxicidade na irradiação de esgoto

Os mecanismos físico-químicos empregados na desinfecção de esgoto têm o potencial de gerar toxicidade. A toxicidade é passível de inviabilizar o uso e o lançamento das águas residuárias em corpos aquáticos, e depende do desinfetante e das características físico-químicas do efluente. A radiação ionizante gera mudanças químicas no esgoto para promover a inativação de organismos patogênicos.

Por meio de testes toxicológicos com o microcrustáceo *Ceriodaphnia dubia* Blatchley *et al.* (1997) mostraram que a desinfecção de esgoto por uso de halogenação, ozonização e radiação UV foram capazes de gerar resposta toxicológica.

Neste sentido, há uma busca por tecnologias com um menor potencial de produzir toxicidade. Thompson e Blatchley (1999) também através de testes toxicológicos com *Ceriodaphnia dubia*, testaram a irradiação gama em vários tipos de efluentes com características diferentes. Os autores concluíram que a irradiação de esgoto não só produz efluentes menos tóxicos do que efluentes desinfetados com cloração / de cloração, como também diminuíram a toxicidade de efluentes não desinfetados.

Borrely *et al.* (2004) utilizaram também *C.dubia* para testar a toxicidade de esgoto irradiado com raios gama. As 30 amostras utilizadas no estudo foram provenientes de seis estações de tratamento de esgoto sanitário. Nenhuma das amostras apresentou toxicidade elevada após a

irradiação. Por meios de testes de toxicidade envolvendo *Daphnia similis* e *Vibrio fischeri* foi detectado que a irradiação de esgoto por aceleradores de elétrons também apresentou um bom desempenho para remover toxicidade para 87% das amostras analisadas.

Para algumas amostras de águas naturais um residual de peróxido de hidrogênio, após a irradiação, representa, potencialmente, um efeito negativo para o ecossistema aquático. Esse efeito pode ser minimizado se uma pequena quantidade de matéria orgânica estiver presente na água. Isso, devido ao consumo do peróxido de hidrogênio pela oxidação da matéria orgânica. Neste contexto fica evidenciada mais uma vantagem da desinfecção de esgoto sanitário por meio da radiação ionizante, principalmente se o efluente for rico em matéria carbonácea (BORRELY *et al.*, 2004).

De acordo com Moraes (2004) a radiação ionizante reduziu 79% do conteúdo de substâncias surfactantes do esgoto. A presença de surfactantes também está relacionada com a toxicidade aguda.

3.4.5 Substâncias radioprotetoras presentes no esgoto

As substâncias radioprotetoras são antioxidantes que têm o potencial de amenizar os efeitos biológicos da irradiação. Os mecanismos de atuação dessas substâncias ainda não são totalmente desvendados (PEREIRA, 1997).

Provavelmente, a ação dos antioxidantes está relacionada com a captura de radicais livres formados a partir da irradiação do meio (TUJI, 2004). Isso poderia suavizar o efeito da irradiação em moléculas alvo de organismos presentes no esgoto irradiado.

Compostos com enxofre, como as proteínas e outros compostos orgânicos, podem estar presentes no esgoto. De acordo com Pereira (1997) os compostos com enxofre reagem mais facilmente com radicais livres devido à sua afinidade as espécies reativas geradas na irradiação. Dessa maneira alguns constituintes do esgoto doméstico podem levar a uma suavização do efeito da irradiação em microrganismos presentes no esgoto irradiado.

Segundo Farooq *et al.* (1993) um efluente que contém maior quantidade de matéria orgânica oxidável, e outras substâncias em forma de partículas e turbidez, podem propiciar efeito radioprotetor aos agentes patogênicos, protegendo-os, assim, contra os efeitos deletérios da radiação ionizante.

3.5 Irradiação ionizante aplicada ao saneamento

Lessel e Suess (1984) operaram a primeira estação de tratamento de lodo de esgoto com irradiador de ^{60}Co , em Geiselbullach, Alemanha, na década de 70. A estação de tratamento foi projetada para 240.000 habitantes. O módulo irradiador foi subterrâneo. A capacidade diária da estação chegou a 145 m^3 de lodo líquido sob atividade radiotiva do ^{60}Co de 570,000 Ci. O irradiador foi operado na estação de tratamento de esgoto por 10 anos, com sucesso.

Farooq *et al.* (1993) realizaram um estudo a fim de comparar a desinfecção de esgoto doméstico bruto e após tratamento secundário por aceleradores de elétrons e por radiação gama. Para tal, foram verificadas a radiosensibilidade de colifagos, coliformes totais e bactérias heterotróficas irradiados com doses de radiação idênticas de cada fonte. Os aceleradores de elétrons, operados em escala real, removeram três unidades logarítmicas dos organismos testados; enquanto que a fonte de ^{60}Co , operado em escala laboratorial com uma atividade de 5000 Ci, removeu quatro unidades logarítmicas dos organismos testados. Ambas as fontes radioativas com dose de 5 kGy. Dessa forma, a radiação gama se mostrou mais efetiva na remoção de organismos patogênicos.

Sampa *et al.* (1995) estudaram a desinfecção de esgoto por um acelerador de elétrons em escala piloto, no Brasil. A concentração inicial de coliformes totais foi reduzida de $1,3 \times 10^7$ NMP/100 mL para $4,0 \times 10^4$ NMP/100 mL na dose de radiação de 2 kGy; para $9,0 \times 10^2$ NMP/100 mL na dose de radiação 3 kGy e para $2,4 \times 10^1$ NMP/100 mL na dose 4 kGy. E a concentração inicial de coliformes termotolerantes reduziu de $7,3 \times 10^6$ NMP/100 mL para $9,0 \times 10^2$ NMP/100 mL na dose de radiação 2 kGy, para $3,2 \times 10^1$ NMP/100 mL na dose de radiação de 3 kGy e 2 NMP/100 mL na dose de radiação 4 kGy.

Kurucz *et al.* (1995) realizaram em Miami estudos com o funcionamento de uma instalação de pesquisa com aceleradores de elétrons. Estes estudos consideraram uma escala plena de tratamento de água e esgoto doméstico, com uma vazão de 460 L/min. Foram determinadas as cinéticas bacterianas em diversos fluxos de esgoto, bem como a efetividade dos aceleradores de elétrons na remoção de poluentes industriais. Os autores utilizaram 5 kGy para tratar aproximadamente 610 L/min, e os aceleradores de elétrons se mostraram efetivos na remoção de poluentes e na desinfecção de esgoto.

Rawat *et al.* (1997) investigaram a efetividade da radiação gama para a desinfecção de esgoto municipal em um irradiador, em Baroda, Índia. A capacidade máxima do irradiador de

pesquisa é de 110m³/d; a atividade da fonte foi de 80 kCi a uma taxa de dose de radiação de 0,8 kGy/h. Observou-se que a dose de radiação gama de 2 kGy reduziu a concentração de coliformes em esgoto bruto para níveis aceitáveis de segurança menor do que 100 UFC/mL e uma redução de 20% da DBO do efluente. Houve também uma aeração do efluente a fim de aumentar a efetividade da radiação gama.

Borrely *et al.* (1998) pesquisaram sobre a radiosensibilidade de *Salmonellas* e a remoção de coliformes por irradiação. Foi observado que a *S. meleagridis* e a *S. infantis* foram menos sensíveis que a *S. typhimurium* e *S. derby*. A dose de radiação gama de 3 kGy alcançou 5 unidades logarítmicas de remoção de coliformes totais e termotolerantes em esgoto bruto. O efluente da lagoa facultativa apresentou uma melhor eficiência de inativação na mesma dose de radiação, devido a uma maior concentração de oxigênio proveniente das algas. O efluente clorado teve a população de coliformes totalmente eliminada após a irradiação.

Shah *et al.* (2001) irradiaram lodo líquido no irradiador de pesquisa para higienização do lodo, em Baroda, Índia. O irradiador foi o mesmo de Rawat *et al.* (1997). A atividade máxima da fonte de ⁶⁰Co foi de 500 kCi. O lodo possuía de 3 a 4 % de sólidos. As doses de radiação do experimento variaram de 0,5 kGy a 5 kGy. Eles concluíram que a dose de radiação de 2 kGy foi adequada para a higienização do lodo. Com essa dose de radiação, foram removidas 3,6 unidades logarítmicas de coliformes totais, 1,9 unidades logarítmicas de bactérias heterotróficas e 3,5 unidades logarítmicas de salmonela e shigela totais.

Taghipour (2004) verificou o efeito da irradiação gama, da irradiação UV e da combinação de ambas na inativação de *E. coli* em amostras de efluentes primários e secundários de esgoto doméstico. As irradiações foram efetivas, mas a irradiação UV seguida da irradiação gama foi mais eficiente. Isso porque os microrganismos associados a partículas foram protegidos da exposição aos raios UV, mas foram inativados pela radiação gama, e por sua vez a prévia irradiação do esgoto com UV minimizou a energia total que seria requerida pela radiação ionizante. O autor sugere a associação entre a radiação UV e a radiação gama para minimizar a energia total necessária e o custo total requerido pela irradiação com raios gama.

Sommer *et al.* (2001) verificaram a ação desinfetante dos raios UV e da radiação ionizante em bacteriófagos. Ambas as radiações alcançaram 4 unidades logarítmicas de remoção. Estes resultados são condizentes com o estudo de Taghipour (2004), que também encontrou que ambas as radiações UV e gama são eficazes na desinfecção.

Graíño (2001) projetou uma instalação com irradiador para o tratamento de lodo em larga escala, na cidade de Tucumán, Argentina. A estação foi projetada para servir uma população de 100000 a 400000 habitantes; com a capacidade máxima de processar 140m³/d de lodo. Foi sugerida a dose de radiação de 3 kGy para uma desinfecção efetiva devido à necessidade de inativação de vírus, que são mais radiorresistentes que os outros organismos patogênicos. Se houver oxigenação do efluente irradiado a dose de radiação pode ser reduzida para 2 kGy.

Basfar e Abdel Rehim (2002) realizaram um estudo em escala de laboratório para verificar a ação da radiação gama na desinfecção e no melhoramento da qualidade do esgoto municipal da Estação de Tratamento de Riyadh, Arábia Saudita. Para tal, foi monitorada a concentração de coliformes, de bactérias heterotróficas, de DBO, de DQO e de COT. A taxa de dose para todo o experimento foi 12,7 kGy/h. A inativação completa de coliformes totais e coliformes termotolerantes foi alcançada na dose de radiação de 1,3 kGy, além da remoção de duas unidades logarítmicas de bactérias heterotróficas. Os valores de DBO e DQO apresentaram 23% de redução com a dose de radiação de 4 kGy. O COT apresentou 10% de remoção a 4 kGy.

Shamma e Al-Adawi (2002) irradiaram amostras de lodo contendo ovos de *A. lumbricoides* da Estação de Tratamento de Damascus, Síria. Os ovos de *A. lumbricoides* irradiados na dose de radiação de 1,5 kGy, 3,0 kGy e 5 kGy foram inviabilizados e não apresentaram larva infectiva após o período de incubação. Os ovos de *A. lumbricoides* irradiados a 6 kGy e 8,0 kGy apresentaram ausência da camada interna do ovo e um extravasamento do seu conteúdo.

3.6 Considerações sobre o Licenciamento ambiental do processo

Todo procedimento relativo ao licenciamento de instalações radioativas no âmbito de localização, construção e operação seguem à norma CNEN 6.02. O processo geral para concessão de licenças e autorizações para implantação de um módulo de irradiação em uma estação de tratamento de esgoto (instalações radioativas com fonte selada de grande porte) envolve a solicitação pelo requerente e a emissão pela CNEN das seguintes etapas:

- Aprovação prévia – exigem dados que permitam analisar a viabilidade do local proposto para a instalação radiativa, tais como: características de utilização das cercanias e distribuição da população local; características gerais de projeto e de operação da instalação proposta e uma análise preliminar das influências ambientais decorrentes de operação normal e em casos de acidente.

- Licença de Construção – Abrange aspectos tais como:
 - Qualificações técnicas do responsável pela construção; a descrição e análise da instalação, com atenção especial às características de projeto e de operação;
 - Análise preliminar e avaliação do projeto e desempenho de estruturas, sistemas e componentes da instalação, com o objetivo de avaliar os aspectos de radioproteção;
 - Controles administrativos a serem aplicados durante a construção;
 - Planos preliminares para procedimentos em situações de emergência;
 - Plano preliminar de radioproteção.
- Autorização para aquisição de material radioativo – Compreende na comprovação de que o projeto da instalação satisfaz as condições exigidas por normas específicas da CNEN, em particular aquelas relativas à gerência de rejeitos radioativos.
- Autorização para operação – É orientada com base:
 - Na construção da instalação completamente concluída de acordo com as disposições legais, regulamentares e normativas e com as condições das Licenças de Construção e seus aditamentos;
 - Na comprovação de que a operação prevista será conduzida sem risco radiológico.

As informações básicas devem ser apresentadas em um relatório que inclui:

- Projeto final da instalação; a organização do pessoal e responsabilidades; o plano de treinamento do pessoal;
- Plano para condução das operações; a garantia da qualidade dos produtos do requerente e de seus contratados;
- Controles administrativos a serem aplicados durante a operação;
- Plano de emergência; as especificações técnicas a serem adotadas para operação;
- Plano de radioproteção, de acordo com Normas específicas.

3.7 Considerações sobre a viabilidade econômica do processo

Os custos do tratamento de esgoto ou dos resíduos gerados em seu tratamento dependem da dose requerida para a desinfecção desejada, do volume do resíduo a ser tratado, do tamanho da instalação de tratamento e do tempo de utilização da instalação (KURUCZ et al. 1995).

Graiño (2001) projetou uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), em escala plena, na cidade de Tucumán, Argentina. O lodo gerado foi tratado anaerobicamente e em batelada. O lodo apresentou de 5% a 8% de concentração de sólidos. Um irradiador foi planejado para tratar com fonte de ^{60}Co o lodo gerado na ETE.

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados no projeto da Estação de tratamento de esgoto e lodo (Tucumán, Argentina)

Parâmetro	Quantidade
População servida	100.000 a 400.000 habitantes
Quantidade de lodo produzida	0,35 L/hab.dia
Volume anual tratado	47.500 m ³
Tempo de operação anual	8.150 h
Capacidade radioativa máxima	700.000 Ci
Tempo de irradiação	30 min
Dose absorvida sem oxigenação	3 kGy
Dose absorvida com oxigenação	2 kGy
Volume (batelada)	6 m ³
Volume tratado de lodo	140 m ³ /dia
Quantidade anual de lodo (peso seco)	4.750 ton
Diâmetro do tanque	1,60 m
Taxa de recirculação	240 m ³ /h

Fonte: Adaptado Graiño (2001)

O estudo de custo realizado por Graiño (2001) considerou a demanda de trabalhadores civis e de instalações eletro-mecânica utilizada na construção da estação de tratamento com irradiador, bem como de sua operação. A tabela 3.2. sumariza as estimativas de gastos para a construção de tal empreendimento.

Tabela 3.2 – Estimativa de custos da implantação de um irradiador, com 304 L de capacidade, em uma estação de tratamento

Item	Valor (US\$)
Construções civis	900.000
Instalações eletro-mecânica	1.600.000
Fonte ^{60}Co (700,00 Ci)	2.100.000
Total	4.600.000

Fonte: Adaptado Graiño (2001)

Ainda segundo Graiño (2001), a Tabela 3.3 mostra a estimativa de custo da operação dessa mesma estação de tratamento com um módulo irradiador.

Tabela 3.3 – Estimativa de custos da operação de uma ETE com um irradiador

Gastos operacionais	Valor (US\$)
Pessoas contratadas	70.000
Recarga da fonte ⁶⁰ Co (média)	50.000
Manutenção e reparo	28.000
Energia elétrica	25.000
Transporte do lodo	50.000
Oxigenação	10.000
Imprevistos	11.000
Amortização (25 anos 5%)	225.000
Total	469.000

Fonte: Adaptado Graiño (2001)

Graiño (2001) estimou ainda que o custo anual por habitante seja de US\$1,17 (400,000 habitantes), que o custo anual por tonelada seca de lodo é US\$ 99,00.

3.8 Conclusões sobre a revisão de literatura

As principais conclusões da revisão de literatura são as seguintes:

- Embora existam questionamentos sobre o uso de coliformes termotolerantes como indicadores de contaminação fecal esse parâmetro pode ser utilizado para estimar a eficiência de um processo de desinfecção.
- A viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* é um bom indicativo de eficiência de um processo de desinfecção. Se o ovo não se tornar viável, o ciclo biológico do parasita é interrompido. Quanto mais um método de desinfecção inviabilizar o ovo de *A. lumbricoides*, mais efetivo é o processo.
- Os métodos naturais de desinfecção de esgoto são eficientes na inativação de microrganismos e remoção de ovos de helmintos, mas exigem elevadas áreas e elevado tempo de detenção. Ao considerar um uso múltiplo do efluente a desinfecção natural não garante a remoção de poluentes não biodegradáveis.
- Os métodos químicos de desinfecção de esgoto são eficazes na inativação de muitos microrganismos. Ainda assim, existem espécies resistentes aos agentes químicos, como é o caso dos ovos de helmintos. A desinfecção química também traz inconvenientes de produzir subprodutos tóxicos.

- Os métodos físicos de desinfecção de esgoto se mostraram mais vantajosos que os métodos químicos. Esses aparentemente não geram efeitos residuais que possam prejudicar seres humanos ou a vida aquática. No caso dos raios UV, existem fatores que podem interferir na efetividade do processo de desinfecção; a qualidade do efluente pode minimizar a ação da radiação UV em microrganismos. Já a radiação ionizante se mostra bastante efetiva na remoção de todos os tipos de organismos, além de qualidade do efluente não apresentar uma influência negativa em sua efetividade.
- O emprego da radiação ionizante gera menos toxicidade que os métodos de desinfecção química, além de oxidar compostos tóxicos não biodegradáveis como resíduos de pesticidas e outros poluentes tóxicos, o que diminui a toxicidade de um efluente.
- A literatura mostrou que a fonte de ^{60}Co tende a ser utilizada em irradiadores que visam tratar lodo de esgoto sanitário, enquanto que os aceleradores de elétrons tendem a serem utilizados em irradiadores que visam irradiar esgoto. Essa tendência pode ser observada porque o alcance da irradiação gama é maior que o alcance da irradiação por aceleradores de elétrons. E estes se apresentam mais práticos e com custos menores.
- A desinfecção de esgoto com o uso de irradiação ionizante vem sendo pesquisada há bastante tempo. Mesmo assim não é comum o uso de irradiadores em estações de tratamento de esgoto. Isso devido a questões como a política, a opinião pública, e os custos de instalação e operação.

4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta informações gerais sobre os efluentes estudados, a forma como o material de estudo foi amostrado e preparado, as condições nas quais as amostras foram irradiadas, e a maneira pela qual foi obtida a eficiência de desinfecção do esgoto pelo processo de irradiação com raios gama.

4.2 Objetos de estudo

O esgoto do presente estudo foi gerado na Bacia do Ribeirão Arrudas, na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. O foco da pesquisa foram os efluentes domésticos brutos e efluentes domésticos tratados em reatores UASB, instalado na ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) Experimental UFMG/COPASA, como mostrado a Figura 4.1. Vale salientar que as águas residuárias deste estudo são predominantemente domésticas, mas também apresentaram um pequeno percentual de contribuição industrial.

O esgoto bruto foi submetido apenas à etapa de tratamento preliminar, estando isenta de sólidos grosseiros e areia. Por sua vez as amostras de esgoto tratado foram oriundas de um reator UASB em escala de demonstração (população equivalente a 300 habitantes).



Figura 4.1 – Reator UASB em escala de demonstração utilizado na pesquisa

O reator objeto da pesquisa apresentou no decorrer do tempo variações em suas condições operacionais, no que diz respeito à altura útil (m), vazão (m^3/d), TDH (tempo de detenção hidráulica), velocidade ascensional, e área de influência dos tubos distribuidores. As condições dinâmicas do reator anaeróbio não foram considerados neste estudo.

A Tabela 4.1 apresenta as principais características físico-químicas dos esgotos em estudo, de acordo com as pesquisas no âmbito do PROSAB 4.

Tabela 4.1 – Características físico-químicas do esgoto bruto e do esgoto tratado em reator UASB

Parâmetros (mg/L)	Esgoto Bruto			Esgoto Tratado		
	Média	N*	DP**	Média	N	DP
DBO total	202	24	24	68	24	26
DQO total	418	37	99	200	40	85
SST	193	61	46	98	67	47
SSV	159	60	39	75	67	37
NTK	31	11	8	33	10	7
NH3	23	11	5	27	10	6
Fosfato Total	4	11	2	4	11	1

*N – quantidade de amostras; **DP – desvio padrão

Fonte:PROSAB 4

4.3 Amostragem

As amostras de esgoto bruto foram coletadas diretamente do canal de alimentação dos decantadores primários da ETE Arrudas.

As amostras de esgoto bruto e tratado destinadas às análises microbiológicas foram compostas durante 10 minutos, com coleta de 500 mL a cada 2 minutos. Os 2,5 L de esgoto, após coletados e homogeneização prévia, foram distribuídos em cinco frascos estéreis de 500 mL. Cada frasco foi destinado à irradiação por uma dose diferente.

As amostras de esgoto bruto e de esgoto tratado destinadas às análises de viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* foram compostas por amostradores automáticos que coletaram 1 L de esgoto a cada hora, por 24 horas. Desses 24 L, previamente homogeneizados, foram retirados 2 litros que em seguida foram subdivididos em dois frascos de 1L. Caracterizou-se assim a coleta em duplicata para cada dose de radiação aplicada.

As amostras de esgoto bruto e tratado destinadas às análises da ação residual da irradiação gama foram compostas durante 15 minutos, com coleta de 500 mL a cada 5 minutos. O 1,5 L de esgoto coletados foram homogeneizados e distribuído em frascos previamente esterilizados de 500 mL. Houve um frasco para cada dose de radiação aplicada.

Todas as coletas e procedimentos experimentais foram realizados em triplicata.

4.4 Irradiação das amostras

As irradiações das amostras de esgoto bruto e de esgoto tratado foram realizadas no Laboratório de Irradiação Gama (LIG) do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN) em Belo Horizonte. Foi utilizado um equipamento de irradiação panorâmico. A fonte radioativa foi o ^{60}Co , com a atividade de 37.000 Ci (2005). O irradiador deste estudo está ilustrado na Figura 4.2.

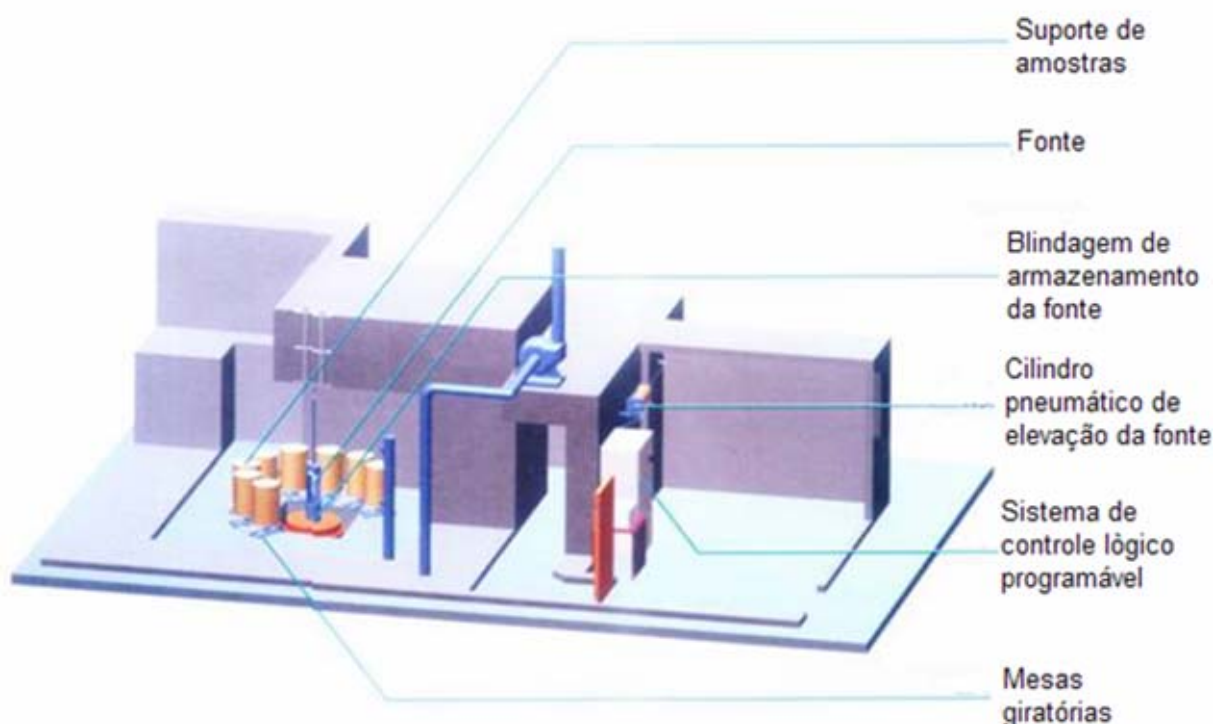


Figura 4.2 – Irradiador panorâmico do LIG

A distância das amostra à fonte radioativa foi constante e igual a 15 cm a fim de se obter uma taxa de dose semelhante durante todo o experimento. No início da pesquisa (março / 2005) a taxa de dose do experimento foi de 5,18 Gy/h e no final da pesquisa (março de 2006) a taxa de dose foi de 4,54 Gy/h.

A dose de radiação recebida pelas amostras foi calculada em função da taxa de dose e do tempo de exposição dos materiais à fonte, como definida na equação 4.1, a seguir:

$$D = R \times T \quad (4.1)$$

Onde:

D = dose absorvida (kGy)

R = taxa de dose da radiação gama (Gy/h)

T = tempo da irradiação (h)

Cada uma das amostras destinadas ao estudo da influência da radiação na população microbiana e na viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* recebeu doses de radiação gama de acordo com a Tabela 4.2. As irradiações ocorreram em batelada.

Tabela 4.2 – Dose de radiação absorvida em cada tipo de ensaio

Tipo de amostra	Dose (kGy)	*Tempo (min)
Análises microbiológicas	0,4	4:30 – 5:08
	0,8	9:00 – 10:15
	1,2	13:29 – 15:23
	2,5	28:06 – 32:03
	3,0	33:43 – 38:27

Análises de ovos viáveis de <i>A. lumbricoides</i>	0,5	5:37 – 6:25
	1,0	11:14 – 12:49
	1,5	16:52 – 19:14
	2,5	28:06 – 32:03
	5,0	56:12 – 60:04

OBS: * Esta unidade variou porque a fonte radioativa ⁶⁰Co diminui a sua atividade com o tempo.

4.5 Etapas do trabalho

O estudo da eficiência da aplicação da radiação gama na inativação de organismos patogênicos existentes em esgoto bruto e em esgoto tratado foi realizado em três etapas:

1ª - Avaliação da eficiência de inativação de microrganismos.

2ª - Avaliação da eficiência de inativação de ovos de *A. lumbricoides*.

3ª – Avaliação da ação residual da radiação gama na desinfecção do esgoto.

Todos os processos experimentais desta pesquisa relativo às análises microbiológicas e parasitológicas foram realizados no Laboratório de Bacteriologia da Água do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

1ª Etapa – Avaliação da eficiência de inativação de microrganismos

4.5.1.1 Introdução

Esta etapa avaliou as eficiências de inativação de microrganismos em esgoto bruto e em esgoto tratado, considerando as diversas doses de irradiação apresentadas na Tabela 4.2.

Para tal, foi realizado o estudo da influência da irradiação nas: concentrações de coliformes, concentrações de bactérias heterotróficas, e em outras espécies de bactérias pertencentes à família Enterobacteriaceae.

A quantificação de coliformes totais e coliformes termotolerantes em esgoto bruto e em esgoto tratado em reator UASB foram detectadas através da técnica dos tubos múltiplos, descrita em APHA (1998). A caracterização das espécies pertencentes à família Enterobacteriaceae foi feita pelo isolamento de colônias de enterobactérias seguida da identificação em série bioquímica (APHA, 1998). A quantificação de bactérias heterotróficas foi feita através da técnica de contagem padrão em placa denominada técnica *Pour Plate* (APHA, 1998).

Na seqüência, são descritas as técnicas menos usuais na rotina do monitoramento microbiológico do esgoto.

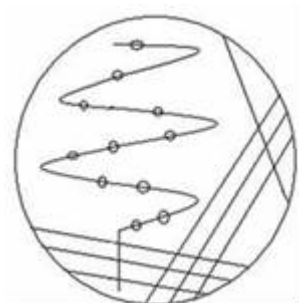
4.5.1.2 Descrição da caracterização das Enterobactérias

Para a realização da caracterização e identificação das enterobactérias foram empregados: estufa a 35°C, da marca Fanem; incubadora de DBO, modelo 205 da marca Hach, a 44,5°C; autoclave da marca Phoenix; capela de fluxo laminar da marca Veco; alça e agulha bacteriológica e bico de busen.

Segundo (APHA, 1998), colônias de enterobactérias podem ser isoladas em meios de cultivo sólido e seletivo, bem como identificadas através inoculação em sistemas multi-testes bioquímicos comercial.

Alíquotas de 5 mL de amostras de esgoto, previamente homogêneas, foram centrifugadas a 2500 rpm por 7 minutos. Em seguida foram descartadas três mL de sobrenadante. O restante foi inoculado em caldo Infuso Cérebro Coração (Brain Heart Infusion - BHI), da marca Biobrás, para enriquecimento e, posteriormente, incubados a 35°C por 24h. Obteve-se assim um cultivo bacteriano misto.

Este cultivo foi semeado por estrias compostas em meio seletivo para Enterobacteriaceae, ágar MacConkey, da marca Acumédia, e incubado a 35° por 24 h para obtenção de colônias isoladas e puras de bactérias, conforme esquematizado na Figura 4.3. O ágar MacConkey constituído por sais biliares e cristal violeta, o que inibe o crescimento de outras bactérias que não seja enterobactérias (KONEMAN, 2001).



(A)



(B)

Figura 4.3 – Esquema de estria composta (A) e estria composta (B)

A identificação das colônias isoladas em diferentes doses de radiação gama foi realizada a partir de série bioquímica IAL-RUGAI (RUGAI e ARAÚJO, 1968) modificado por Pessoa e Silva (1972). O meio é um conjunto de provas bioquímicas em um único tubo (KONEMAN, 2001), como ilustrado na Figura 4.4.

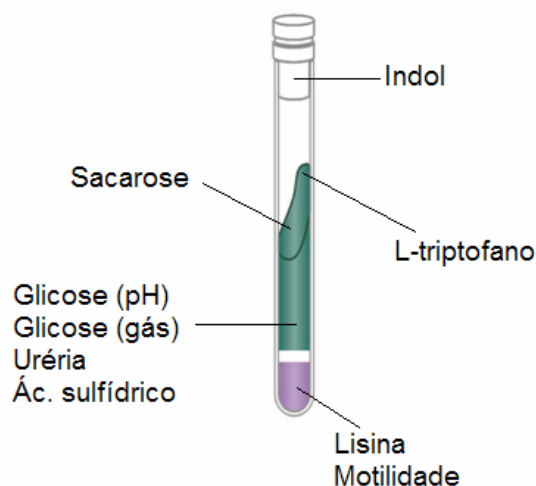


Figura 4.4 – Esquema com meio de Rugai modificado por Pessoa e Silva

O tubo com meio de Rugai permite a observação de características metabólicas dos microrganismos, como: a capacidade de desaminação do L-triptofano (LTD), produção de indol, fermentação de sacarose, fermentação de glicose, hidrólise de uréia, produção de H_2S , descarboxilação de lisina e motilidade. Na parte superior do tubo encontra-se o meio de Rugai, separado por uma interface composta de cera de carnaúba e vaselina que garante condições anaeróbias na sua parte inferior, necessárias para a degradação da lisina. Na parte inferior também é verificada a motilidade do microrganismo, que é a capacidade de movimentação no meio semi-sólido.

As colônias de bactérias foram repicadas do ágar MacConkey para o IAL. Com uma agulha de níquel-cromo foi pescada uma única colônia suspeita. Em seqüência introduziu-se a agulha

no tubo, realizando o inócuo nas duas fases do tubo; retirou-se a agulha e semeou-se sob a forma de estrias na superfície inclinada do meio. O tubo foi vedado e incubado em estufa a 35°C durante 18 a 24 horas. Após incubação procedeu-se à análise comparativa, usando a Tabela de características metabólicas de enterobactérias de interesse na patologia humana, da Newprov Produtos para Laboratório Ltda, e pelo quadro de identificação presuntiva de bacilos gram-negativos a partir do desenvolvimento em MacConkey, no meio Rugai com lisina (RUGAI e ARAÚJO, 1968; PESSOA e SILVA, 1972; HOLT, 1984) Vide Anexo A.

4.5.1.3 Descrição da técnica *Pour Plate*

Para a realização da análise de bactérias heterotróficas, além dos equipamentos utilizados para as análises de coliformes, utilizou-se também um contador de colônias bacterianas.

O meio de cultura utilizado foi o ágar Standard Methods, da marca Acumédia. Foram feitas diluições seriadas em solução salina 0,85% p/v, e alíquotas de 1 mL de cada diluição foram inoculadas em duplicata em placas estéreis. As placas foram incubadas a 35 °C por 48 h, como ilustrado na Figura 4.5.

Transcorrido esse período, o número de colônias foi contado e expresso em unidades formadoras de colônias por 1 mL da amostra. Consideraram-se apenas as placas que apresentaram entre 30 e 300 colônias para a contagem. O cálculo do número de bactérias por mililitro foi obtido pela equação 4.2 (APHA, 1998):

$$UFC / mL = \left(\frac{N^{\circ} col}{Vol} \right) \quad (4.2)$$

Na qual:

UFC/mL = unidade formadora de colônia por mililitro da amostra.

N° col = número de colônias contadas na placa.

Vol = volume da amostra na placa (em mililitros).

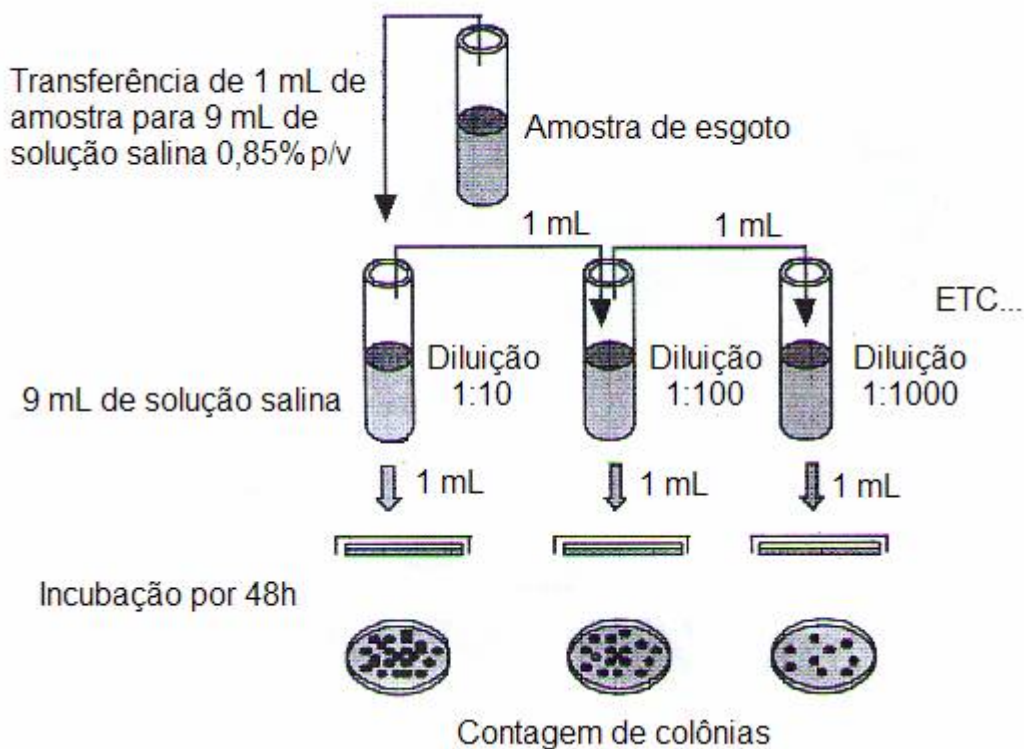


Figura 4.5 – Representação esquemática da Técnica *pour plate* para contagem de bactérias heterotróficas

4.5.1.4 Detalhamento da 1ª etapa

O cálculo da eficiência da irradiação gama na inativação de microrganismos entéricos de esgoto foi realizado com o auxílio da equação 4.3.

$$E = \left(1 - \frac{N_f}{N_o}\right) \times 100 \quad (4.3)$$

Na qual:

E = eficiência de inativação de microrganismos (%).

N_f = número final de microrganismos, após a aplicação de determinada dose de radiação gama (NMP coliformes/100 mL ou UFC/mL).

N_o = número inicial de microrganismos, antes da irradiação (NMP coliformes/100 mL ou UFC/mL).

A eficiência de inativação de microrganismos pela irradiação gama se deu através da contagem de microrganismos vivos antes e depois à irradiação.

A radiosensibilidade de coliformes e bactérias heterotróficas foi estimada a partir do cálculo da dose necessária para reduzir 90% da quantidade inicial de microrganismos, de acordo com a equação 4.4 (EPN, 1997):

$$D_{10} = \frac{D}{\left(\log_{10} \left(\frac{N}{N_0} \right) \right)} \quad (4.4)$$

Na qual:

D_{10} = dose de redução decimal (kGy).

D = dose aplicada (kGy).

N_0 = concentração inicial de microrganismos (NMP coliformes/100 mL ou UFC/mL).

N = concentração de microrganismos na dose aplicada (NMP coliformes/100 mL ou UFC/mL).

A fim de se verificar algumas espécies de enterobactérias resistentes à irradiação gama caracterizou-se algumas colônias suspeitas, em várias doses.

2ª Etapa - Avaliação da eficiência de inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides*

4.5.1.5 Introdução

Esta etapa avaliou as eficiências de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto e em esgoto tratado, por irradiação gama, de acordo com as doses apresentadas na Tabela 4.2. Para tal, realizou-se um estudo sobre a influência da irradiação na porcentagem de viabilidade de ovos de *A. lumbricoides*, que foi efetuada através da técnica de incubação adaptada (ZERBINI e CHERNICHARO, 2001). Esta técnica possibilita observar a viabilidade dos ovos em pequenos volumes, mas com grande quantidade de ovos.

4.5.1.6 Descrição da recuperação de ovos *A. lumbricoides* de fezes humanas

A ocorrência relativamente baixa de ovos de *A. lumbricoides* nas amostras de esgoto em estudo exigiu uma inoculação de ovos a fim de se obter resultados passíveis de tratamento estatístico. Ovos férteis de *A. lumbricoides* foram obtidos de sedimentos lavados de fezes humanas. Aliquotas de 2 mL de sedimentos lavados de fezes foram inoculadas nas amostras de esgoto, buscando-se obter as maiores concentrações possíveis de ovos/L. (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Inóculo de *A. lumbricoides* recuperados de fezes humanas

Para obter ovos de *A. lumbricoides* férteis recuperados de fezes humanas primeiro diluiu-se uma amostra de fezes infectada em 125 mL de água. Em seguida transferiu-se o material diluído para tubos de plástico da marca Falcon até o marco de 12 mL. Centrifugou-se a amostra a 1500 rpm por 3 minutos. Descartou-se o sobrenadante e lavou-se o sedimento complementando com água para 12 mL, por duas vezes. Ressuspendeu-se o sedimento com água até a marca 6 mL, seguido de uma sedimentação de aproximadamente 30 minutos. Desta forma o material fecal não entrou em contato com reagentes potencialmente prejudiciais ao desenvolvimento embrionário dos ovos. Esse procedimento foi realizado gentilmente pelos técnicos do LABORATÓRIO DE ANÁLISES CLÍNICAS HERMES PARDINI.

4.5.1.7 Descrição da técnica de incubação adaptada

Segundo Zerbini e Chernicharo (2001) para a execução da técnica de incubação adaptada são necessários: frascos de plástico com tampa de rosca com capacidade para 1 litro; tubos de centrífuga de 50 mL de capacidade para centrífuga; centrífuga para operar a 2500 rpm; vórtex; equipamento de filtração para membrana de 47 mm de diâmetro; sistema de vácuo; microscópio óptico comum com objetivas de 10 X, 40 X e 100 X; membranas de éster de celulose e porosidade de 45 µm; placas de petri; câmara de Sedgewick Rafter; solução salina isotônica (NaCl a 0,85% em água destilada); solução de sulfato de zinco a 33,1% (p/v); solução triton X-100 e solução de ácido sulfúrico a 0,1 N.

As amostras foram acondicionadas em um béquer de volume 1 litro. Com base na velocidade de sedimentação do ovo de *A. lumbricoides* de 0,65 m/h (SILVA *et al.*, 2000) as amostras foram deixadas em repouso por 3 h a fim de possibilitar a deposição dos ovos na parte mais inferior do recipiente.

Após esse período, o sobrenadante foi removido utilizando-se uma bomba de sucção, e foi deixado em cada béquer 200 mL de amostra. Em seguida, as amostras foram transferidas para tubos de centrifuga e lavadas por centrifugações sucessivas de cinco minutos a 2500 rpm, com solução salina 0,85% e solução triton X-100 até a clarificação do sobrenadante. O sedimento remanescente foi flotado em solução de sulfato de zinco com a densidade semelhante ao do ovo de *A. lumbricoides* e em seguida centrifugado por três minutos a 2500 rpm. As amostras foram então filtradas em membrana de 47 mm e 0,45 µm de porosidade.

O material retido na membrana foi raspado com uma lamínula e incubado em placa de petri contendo aproximadamente 10 mL solução de ácido sulfúrico 0,1 N (FAIRBAIRN, 1961). As placas contendo ovos de helmintos foram aeradas em dias alternados a fim de se fornecer o oxigênio necessário para que o ovo fértil se tornasse larvado. Após 28 dias de incubação foram retiradas de cada placa bem homogeneizada três alíquotas de 1 mL. Cada alíquota teve a quantidade de ovos viáveis e ovos não viáveis contadas com o auxílio da câmara de Sedgewick Rafter. Foi medido o volume final de cada placa, com o intuito de calcular a quantidade de ovos por litro de amostra, conforme descrito na equação 4.5 (ZERBINI e CHERNICHARO, 2001):

$$N = \left(\frac{Nc \times Vf}{Vi \times Vc} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

Na qual:

N= número de ovos por litro.

Nc= número médio de ovos contados na câmara de Sedgewick Rafter.

Vf= volume do conteúdo final das placas de petri (mL).

Vc= volume da câmara de Sedgewick Rafter (1 mL).

Vi= volume inicial da amostra.

4.5.1.8 Detalhamento da 2ª etapa

O cálculo da eficiência da irradiação gama na inativação de ovos de *A. lumbricoides* presentes em esgoto foi feito de acordo com a equação 4.6.

$$E = \left(1 - \frac{Nf}{No}\right) \times 100 \quad (4.6)$$

Na qual:

E = eficiência de inativação de ovos de *A. lumbricoides* (%).

Nf = número de ovos viáveis, após a irradiação (ovos/L).

No = número total de ovos férteis, antes da irradiação (ovos/L).

Assim, a eficiência de inativação de ovos de *A. lumbricoides* pela irradiação gama se deu através da quantificação dos ovos totais e ovos viáveis após o período de incubação de 28 dias, em condições favoráveis de temperatura, umidade e oxigenação, segundo a técnica de incubação adaptada (ZERBINI e CHERNICHARO, 2001). Vale lembrar que o ovo com larva infectante após o período de incubação é viável e que o ovo que não consegue formar larva infectante neste mesmo período de incubação é inviável.

A eficiência de inativação é a porcentagem de ovos helmintos que tiveram o desenvolvimento embrionário prejudicado pela irradiação gama em cada dose recebida. Quanto maior o poder de inativação maior é a eficiência de desinfecção do método em questão.

3ª Etapa – Avaliação da ação desinfetante residual da radiação gama na desinfecção do esgoto

A ação desinfetante residual da irradiação gama em esgoto foi testada da seguinte maneira:

- Contagem de coliformes totais e termotolerantes logo após a irradiação.
- Contagem de coliformes totais e termotolerantes 7 dias após a irradiação.
- Comparação das quantidades de coliformes totais e termotolerantes entre o 1º dia e o 7º dia após a irradiação.

A quantidade de dias do experimento foi escolhido aleatoriamente de forma que houvesse tempo em excesso para a potencial reprodução dos coliformes em questão.

As contagens de coliformes ocorreram de acordo com a técnica dos tubos múltiplos (APHA, 1998).

4.6 Análise estatística

Para realização das análises estatísticas foram utilizados os “softwares” Microsoft Excel[®] e STATISTICA 6.0.

Empregando o “software” Microsoft Excel[®] obteve-se a estatística descritiva dos resultados. Com esse mesmo programa expressou-se a análise de regressão linear simples para a cinética de decaimento bacteriano em função da dose de radiação.

A medida de tendência central dos organismos em estudo foi adotada considerando as ordens de magnitude de suas variações. Como as concentrações de coliformes e bactérias heterotróficas apresentaram uma grande variação, e um único valor extremamente elevado aumentaria significativamente a média aritmética, optou-se como medida de tendência central para microrganismos a média geométrica. A medida de tendência central adotada para helmintos, considerando que houve uma variação menor em sua ordem de magnitude, foi a média aritmética (VON SPERLING, 2001).

Já o software STATISTICA 6.0 foi utilizado para verificar se os resultados apresentaram distribuição normal, bem como para verificar as diferenças entre os ensaios, as doses de radiação aplicadas, e entre os tipos de esgoto utilizados no experimento. Para tal, lançou-se mão dos testes estatísticos não paramétricos de Wilcoxon e de Kruskal-Wallis a um nível de significância de 5%. Os valores de p menores que 0,05 reforçam a aceitação da hipótese nula de que existe uma diferença estatística significativa entre as amostras comparadas.

O Teste de Wilcoxon é uma alternativa para o teste t para amostras dependentes e evidencia diferenças entre dados amostrais emparelhados. É baseado no teste de hipóteses sobre a mediana da população.

O teste de Kruskal-Wallis é usado para testar hipóteses de que diferentes amostras provenham da mesma população. Para tal, comparam-se três ou mais amostras, e evidencia-se se elas pertencem à distribuição populacional com medianas semelhantes. Assim, a sua interpretação é basicamente similar ao teste estatístico paramétrico ANOVA.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta as análises dos dados a respeito do uso da radiação gama na desinfecção de esgoto doméstico bruto e esgoto doméstico tratado em reator UASB. Para tal consideraram-se como indicadores da eficiência do processo: a sobrevivência de microrganismos, a viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* e a ação residual da radiação.

Através do pacote STATISTICA 6.0 verificou-se que os dados biológicos deste estudo não apresentaram distribuição normal. Devido a essa fato adotou-se métodos estatísticos não paramétricos para testar hipóteses da existência de diferenças estatísticas significativas entre as amostras em questão.

Para observar maiores detalhes dos resultados vide Anexos B e C.

5.1 *Inativação de microrganismos*

5.1.1 *Esgoto bruto*

Os comentários relativo a inativação de microrganismos pela ação da radiação gama, em esgoto bruto, foram divididos em três itens: inativação de coliformes totais, inativação de coliformes termotolerantes e a inativação das bactérias heterotróficas. Conforme descrito na metodologia foram efetuadas de três a quatro repetições das coletas para se verificar a influência da irradiação de esgoto na população dos microrganismos.

5.1.1.1 Inativação de coliformes totais

Os resultados das concentrações de coliformes totais em esgoto bruto irradiado estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Concentração de coliformes totais (NMP/100 mL) de esgoto bruto irradiado

Variável estatística	Dose de radiação (kGy)					
	0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Média Geométrica	3,57E+07	2,59E+06	3,78E+05	4,22E+04	1,27E+03	1,13E+01
Máximo	1,3E+08	5,00E+06	3,00E+06	2,40E+05	1,60E+04	3,60E+01
Mínimo	7,5E+06	1,30E+06	8,00E+04	5,00E+03	8,00E+01	0,00E+00

Ao considerar as médias geométricas de coliformes totais no decorrer das doses de radiação aplicadas no experimento observou-se um decréscimo acentuado nas concentrações das amostras em estudo. Ainda assim, os dados apresentaram uma variação exarcebada, provavelmente, porque cada ensaio foi realizado em dias diferentes.

A Figura 5.1 mostra a concentração de coliformes totais, expressa em unidades logarítmicas, em esgoto bruto irradiados com diferentes doses radiação gama. Foi demonstrado que a concentração de coliformes totais diminuiu ao se elevar a dose de radiação, e pôde-se verificar que a taxa de inativação ocorreu de forma constante.

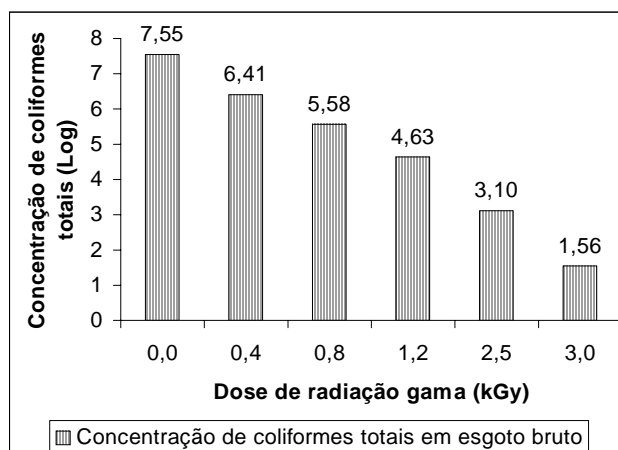


Figura 5.1 – Concentração de coliformes totais em esgoto bruto

Para testar a hipótese de que as concentrações de coliformes totais nas amostras irradiadas de esgoto bruto possuem diferença estatística significativa ao aumentar da dose de radiação, utilizou-se o teste de comparação múltipla de amostras independentes Kruskal-Wallis. A Tabela 5.2 mostra os resultados deste teste.

Tabela 5.2 – Comparação entre as concentrações de coliformes totais em esgoto bruto expostas à diferentes doses de radiação gama

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado de teste valor de p	Significado estatístico
0,4 X 0,0	1,000000	semelhante
0,4 X 0,8	1,000000	semelhante
0,4 X 1,2	1,000000	semelhante
0,4 X 2,5	0,202993	semelhante
0,4 X 3,0	0,066592	semelhante
0,8 X 0,0	1,000000	semelhante
0,8 X 1,2	1,000000	semelhante
0,8 X 2,5	1,000000	semelhante
0,8 X 3,0	0,332035	semelhante
1,2 X 0,0	0,278501	semelhante
1,2 X 2,5	1,000000	semelhante
1,2 X 3,0	1,000000	semelhante
2,5 X 0,0	0,000906	diferente
2,5 X 3,0	1,000000	semelhante
3,0 X 0,0	0,000801	diferente

O teste de Kruskal-Wallis evidenciou que apenas houve diferenças estatística significativa entre as concentrações de coliformes totais das amostras de esgoto não irradiadas

comparando-se com as amostras irradiadas com as doses 2,5 kGy e 3,0 kGy. As doses de radiação subsequente a outra não apresentaram diferenças estatísticas significativas. Observou-se também que as doses de radiação de 2,5 e de 3,0 kGy não apresentaram diferenças significativas entre si.

A dose de radiação de 2,5 kGy reduziu a concentração inicial de coliformes totais em 4,45 unidades logarítmicas, sendo que o efluente final desta dose de radiação apresentou 1.272 NMP /100 mL. Já a dose de 3 kGy inativou 6 unidades logarítmicas da concentração inicial de coliformes totais, e o efluente final exposto à esta dose registrou apenas 11 NMP /100 mL. Embora as diretrizes gerais para a reutilização de esgoto tratado (CHERNICHARO *et al.*, 2006) e a WHO (1989) não exigem o parâmetro coliformes totais, estes sempre se apresentam em concentrações maiores ou iguais aos coliformes termotolerantes. Dessa forma, pode-se considerar que as concentrações de coliformes totais da dose de radiação de 2,5 kGy se enquadram nos limites recomendados para utilização do esgoto tratado para o uso restrito urbano e agrícola e para o uso predial. Já as concentrações de coliformes totais da dose de radiação de 3,0 kGy alcançaram os limites previstos pelos limites recomendados para utilização de esgotos tratados para uso irrestrito urbano e agrícola, bem como para o uso predial (CHERNICHARO *et al.*, 2006; WHO, 1989). Vale ressaltar que a concentração de coliformes termotolerantes sempre é inferior ou no máximo igual à concentração de coliformes totais.

A partir dessas observações pode-se afirmar que ambas as doses de radiação gama (2,5 e 3,0 kGy) melhorou notadamente a qualidade do efluente irradiado. A dose empregada deve ser compatível com o objetivo do uso do efluente irradiado.

Ainda com relação ao comportamento da população de coliformes totais em esgoto irradiado observou-se a sua cinética de inativação. Verificou-se que esta obedece à lei de Chick. A lei de Chick segue a natureza de uma reação cinética de primeira ordem, e permite definir doses que possam ser utilizadas na desinfecção (USEPA, 1986 *apud* GONÇALVES *et al.*, 2003a). A equação 5.1 define a lei de Chick:

$$N=N_0 \cdot e^{-kx} \quad (5.1)$$

Na qual:

N = concentração de microrganismos sobreviventes após a irradiação (NMP/100mL).

N_0 = concentração inicial de microrganismos.

k = constante de inativação (kGy^{-1}).

x = dose de radiação aplicada (kGy).

Vale salientar que o eixo das ordenadas de todos os gráficos de relativos às cinéticas de inativações dos microrganismos foram apresentadas em escala logarítmica. A Figura 5.2 ilustra o processo de desinfecção de esgoto através da ação da irradiação gama, que obedece à lei de Chick.

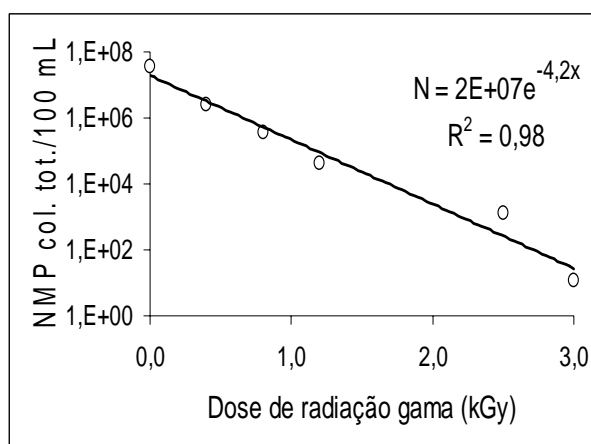


Figura 5.2 – Inativação de coliformes totais em esgoto bruto

O ajuste entre a equação da reta gerada pela remoção de coliformes em função da dose e a lei de Chick é confirmado pelo R^2 igual a 0,98. Isso significa que a equação da reta descrita explica 98% da variância dos dados em questão. Os coeficientes de inativação do modelo de desinfecção para coliformes totais foram obtidos por regressão linear dos dados experimentais.

5.1.1.2 Inativação de coliformes termotolerantes

Os dados das concentrações de coliformes termotolerantes de esgoto bruto em diversas dosagens de radiação gama se encontram na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Concentração de coliformes termotolerantes (NMP/100 mL) de esgoto bruto irradiado

Variável estatística	Dose de radiação (kGy)					
	0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Média Geométrica	1,84E+07	2,02E+06	2,89E+05	3,71E+04	8,82E+02	5,24E+00
Máximo	8,00E+07	3,00E+06	1,70E+06	2,40E+05	1,60E+04	3,60E+01
Mínimo	3,80E+06	8,00E+05	8,00E+04	3,00E+03	2,00E+01	2,00E+00

A resposta dos coliformes termotolerantes à irradiação gama acompanha o comportamento da população de coliformes totais do esgoto bruto. As concentrações de coliformes termotolerantes de esgoto bruto expressas em unidade logarítmica são apresentadas na Figura 5.3. Assim como observado no item dos coliformes totais, as concentrações de coliformes termotolerantes é inversamente proporcional ao aumento da dose de radiação gama.

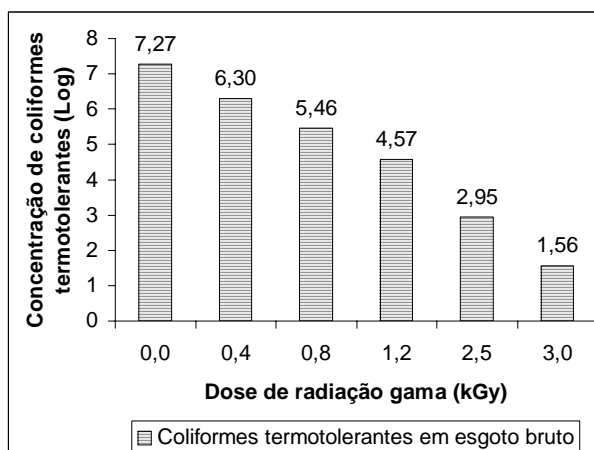


Figura 5.3 – Concentração de coliformes termotolerantes em esgoto bruto

A fim de verificar se as concentrações de coliformes termotolerantes de esgoto bruto possuem diferenças significativas após a exposição às doses de radiação gama diferentes realizou-se o teste de comparação múltipla de amostras independentes Kruskal-Wallis. A Tabela 5.4 mostra os resultados deste teste.

Tabela 5.4 – Comparação entre as concentrações de coliformes termotolerantes em esgoto bruto expostas à diferentes doses de radiação gama

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,4 X 0,0	1,000000	semelhante
0,4 X 0,8	1,000000	semelhante
0,4 X 1,2	0,245121	semelhante
0,4 X 2,5	0,165253	semelhante
0,4 X 3,0	0,065219	semelhante
0,8 X 0,0	1,000000	semelhante
0,8 X 1,2	1,000000	semelhante
0,8 X 2,5	1,000000	semelhante
0,8 X 3,0	0,444128	semelhante
1,2 X 0,0	0,245121	semelhante
1,2 X 2,5	1,000000	semelhante
1,2 X 3,0	1,000000	semelhante
2,5 X 0,0	0,000906	diferente
2,5 X 3,0	1,000000	semelhante
3,0 X 00	0,001022	diferente

Segundo o teste de comparação múltipla de amostras independentes Kruskal-Wallis, apenas apresentam diferenças estatísticas significativas nas concentrações de coliformes

termotolerantes das amostras irradiadas às doses 2,5 e 3,0 kGy, em relação às amostras de esgoto não irradiado. Observou-se também uma propensão das doses de radiação mais próximas serem semelhantes estatisticamente, o que inclui as doses de radiação de 2,5 e 3,0 kGy.

Durante a exposição do esgoto bruto à dose de radiação 2,5 kGy houve uma diminuição na concentração de coliformes termotolerantes na ordem de 4,32 unidades logarítmicas, e o efluente irradiado a essa dose apresentou 882 NMP/100 mL de esgoto. O esgoto irradiado à dose 3,0 kGy obteve diminuição na concentração de coliformes termotolerantes na ordem de 5,71 unidades logarítmicas e seu efluente apresentou 5 NMP/100 mL. Considerando-se as concentrações de coliformes termotolerantes, isso corrobora com a hipótese que as amostras irradiadas às doses 2,5 e 3,0 kGy possuem o efeito de inativação semelhante. Ambas as doses diminuíram as concentrações de coliformes termotolerantes para os limites prescritos ao uso restrito urbano, uso predial e uso irrestrito agrícola (CHERNICHARO *et al.*, 2006). O uso agrícola irrestrito também é sugerido pela WHO (1989).

Ainda assim, vale salientar que a irradiação do esgoto à dose 3,0 kGy melhorou mais a sua qualidade do que a irradiação à dose 2,5 kGy. A concentração de coliformes termotolerantes após a dose de radiação 3,0 kGy enquadrado o efluente também no uso urbano irrestrito preconizado pelos limites recomendados para utilização de esgotos tratados (CHERNICHARO *et al.*, 2006). A dose de radiação gama a ser aplicada na desinfecção do esgoto depende do uso previsto para o efluente irradiado.

Observou-se que a irradiação do esgoto apresentou taxas de inativação de coliformes totais e termotolerantes semelhantes. A inativação de coliformes totais apresentou um coeficiente de $4,2^{-kGy}$, enquanto que a inativação de coliformes termotolerantes apresentou um coeficiente de $4,09^{-kGy}$. O decaimento de coliformes termotolerantes decorrente da irradiação, também segundo a lei de Chick, é confirmado pelo R^2 igual a 0,99. A Figura 5.4 ilustra o desempenho da irradiação gama na redução da concentração de coliformes termotolerantes em esgoto bruto.

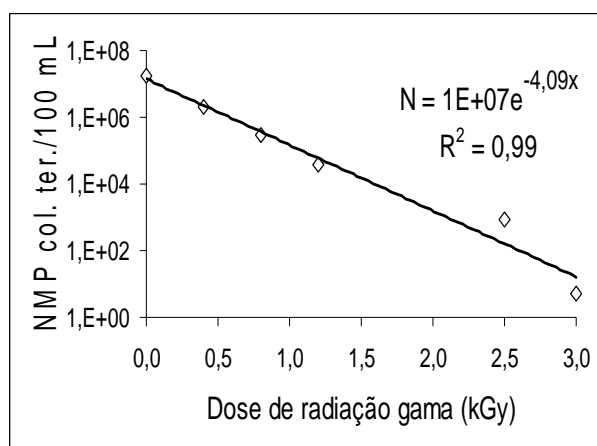


Figura 5.4 – Inativação de coliformes termotolerantes em esgoto bruto

5.1.1.3 Inativação de bactérias heterotróficas

Os elementos de informações referentes às concentrações de bactérias heterotróficas em esgoto bruto são apresentados na Tabela 5.5. Observou-se um declínio na população de bactérias heterotróficas, mas de uma maneira mais amena do que a encontrada para o declínio populacional do grupo coliforme.

Tabela 5.5 – Concentração (UFC/mL) de bactérias heterotróficas em esgoto bruto irradiado

Variável estatística	Dose de radiação (kGy)					
	0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Média Geométrica	8,11E+06	6,70E+05	2,85E+05	1,19E+05	2,20E+04	4,58E+03
Máximo	1,58E+07	9,25E+05	4,80E+05	2,36E+05	6,05E+04	5,70E+03
Mínimo	3,65E+06	3,70E+05	1,54E+05	4,95E+04	6,20E+03	3,30E+03

As concentrações de bactérias heterotróficas de esgoto bruto expressas em unidade logarítmicas são apresentadas em linhas gerais na Figura 5.5.

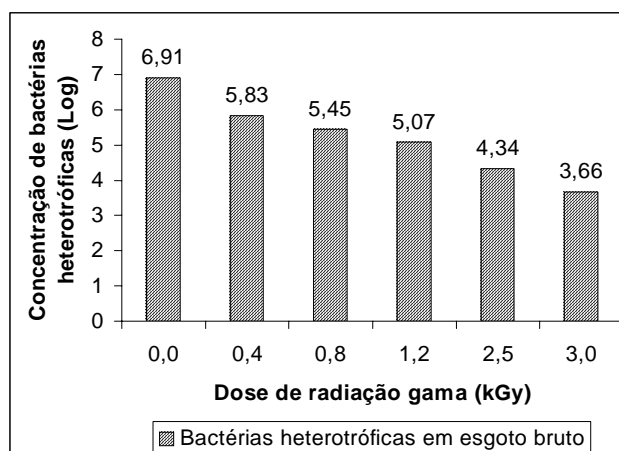


Figura 5.5 – Concentração de bactérias heterotróficas em esgoto bruto

Seguindo o comportamento dos outros microrganismos, as concentrações de bactérias heterotróficas diminuem com o aumento da dose de radiação, embora com uma tendência

aparentemente menor entre as diferenças em doses de radiação maiores. O teste não paramétrico Kruskal-Wallis também evidenciou que as concentrações de bactérias heterotróficas possuem semelhanças em doses de radiação subseqüentes, de acordo com o conteúdo da Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Comparação entre as concentrações de bactérias heterotróficas em diferentes dosagens de raios gama em esgoto bruto

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,4 X 0,0	1,000000	semelhante
0,4 X 0,8	1,000000	semelhante
0,4 X 1,2	0,327405	semelhante
0,4 X 2,5	0,417546	semelhante
0,4 X 3,0	0,112231	semelhante
0,8 X 0,0	1,000000	semelhante
0,8 X 1,2	1,000000	semelhante
0,8 X 2,5	1,000000	semelhante
0,8 X 3,0	0,281117	semelhante
1,2 X 0,0	0,327405	semelhante
1,2 X 2,5	1,000000	semelhante
1,2 X 3,0	1,000000	semelhante
2,5 X 0,0	0,001453	diferente
2,5 X 3,0	1,000000	semelhante
3,0 X 0,0	0,000915	diferente

O teste estatístico mostrou que a redução da concentração de bactérias heterotróficas após a irradiação apenas detectou diferenças estatísticas significativas nas amostras irradiadas pelas doses de radiação de 2,5 kGy e 3,0 kGy em relação às amostras de esgoto não irradiadas. Este teste também evidenciou que o efeito da radiação gama provocado pela dose 2,5 kGy é similar ao efeito da dose de radiação 3,0 kGy. Isso favorece a hipótese que na desinfecção de esgoto, a ação das doses de radiação de 2,5 kGy e 3,0 kGy seria semelhantes.

A dose de radiação gama de 2,5 kGy inativaram 2,57 unidades logarítmicas de bactérias heterotróficas e apresentou uma concentração de bactérias heterotróficas de 21.260 UFC/mL de efluente, enquanto que a dose de radiação 3,0 kGy inativou 3,25 unidades logarítmica se apresentou uma concentração de bactérias heterotróficas de 4.578 UFC/mL. Vale lembrar que a concentrações de bactérias heterotróficas não constituem parâmetro microbiológico para avaliação da qualidade do esgoto a ser reutilizado, mas sua detecção é importante como medida primária da eficiência de desinfecção, tendo em vista que são mais resistentes que o grupo coliformes, e que tem o potencial de apresentarem microrganismos patogênicos.

A Figura 5.6 mostra que o efeito da irradiação gama na população de bactérias heterotróficas em esgoto bruto também ocorre segundo a lei de Chick e é confirmado pelo R^2 igual a 0.92.

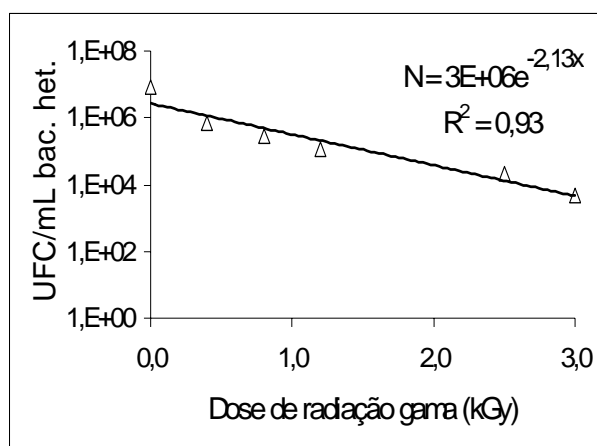


Figura 5.6 – Inativação de bactérias heterotróficas em esgoto bruto

Observou-se que os coeficientes de inativação de microrganismos variaram conforme o seu tipo. Conforme visto anteriormente os coliformes termotolerantes apresentaram o coeficiente de inativação semelhante aos dos coliformes totais (na ordem de 4 kGy^{-1}). Já as bactérias heterotróficas apresentaram um coeficiente de inativação menor (na ordem de 2 kGy^{-1}). Isso permite inferir que o grupo coliforme resiste menos que as bactérias heterotróficas aos efeitos da irradiação.

5.1.2 Esgoto tratado

A discussão acerca da inativação de microrganismos pela ação da irradiação gama em esgoto tratado também foi exposta em três partes: inativação de coliformes totais, inativação de coliformes termotolerantes e a inativação das bactérias heterotróficas. De acordo com a metodologia, também foram realizadas três repetições para se verificar a influência da irradiação de esgoto tratado em reator UASB, sobre a população dos microrganismos.

5.1.2.1 Inativação de coliformes totais

A Tabela 5.7 mostra as concentrações de coliformes totais de esgoto tratado em reator UASB após a irradiação em várias doses da fonte ^{60}Co . Os dados a tabela evidenciaram uma queda significativa na quantidade de coliformes totais existentes nas amostras de esgoto tratado.

Tabela 5.7 – Concentração de coliformes totais (NMP/100 mL) de esgoto tratado irradiado

Variável estatística	Dose de radiação (kGy)					
	0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Média Geométrica	1,06E+07	4,54E+05	4,48E+04	7,09E+02	2,27E+01	2,00E+00
Máximo	2,40E+07	3,00E+05	3,00E+05	1,70E+03	9,20E+01	2,00E+00
Mínimo	4,30E+06	2,30E+03	2,30E+03	3,00E+02	0,00E+00	2,00E+00

A Figura 5.7 mostra as concentrações dos coliformes totais (expressa em unidades logarítmicas) de esgoto tratado nas diferentes doses de radiação gama aplicada. As concentrações de coliformes totais em esgoto tratado mostraram uma conduta análoga aos itens anteriores, diminuiriam ao se elevar a dose de radiação.

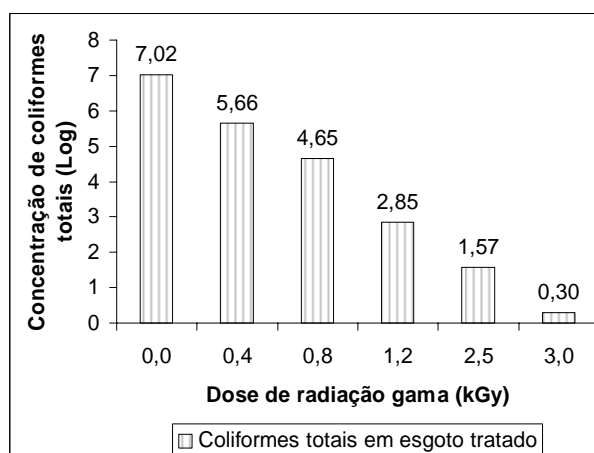


Figura 5.7 – Concentração de coliformes totais em esgoto tratado

A fim de se verificar as concentrações de coliformes totais nas amostras de esgoto tratado apresentaram diferenças estatística significativa ao serem irradiadas pelos raios gama foi realizado o teste Kruskal-Wallis, como mostra a Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Comparação entre as concentrações de coliformes totais em diferentes dosagens de raios gama em esgoto tratado

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,4 X 0,0	1,000000	semelhante
0,4 X 0,8	1,000000	semelhante
0,4 X 1,2	1,000000	semelhante
0,4 X 2,5	0,555843	semelhante
0,4 X 3,0	0,469159	semelhante
0,8 X 0,0	1,000000	semelhante
0,8 X 1,2	1,000000	semelhante
0,8 X 2,5	1,000000	semelhante
0,8 X 3,0	0,892792	semelhante
1,2 X 0,0	0,428515	semelhante
1,2 X 2,5	1,000000	semelhante
1,2 X 3,0	1,000000	semelhante
2,5 X 0,0	0,001611	diferente
2,5 X 3,0	1,000000	semelhante
3,0 X 0,0	0,012535	diferente

As diferenças entre as concentrações de coliformes totais nas amostras de esgoto tratado irradiado com diferentes doses de radiação gama foram detectadas pelo teste estatístico apenas para as doses de 2,5 kGy e 3,0 kGy em relação às amostras não irradiadas. Ainda assim, vale lembrar que o teste estatístico considerou similares as doses de radiação de 1,2 kGy, 2,5 kGy e 3,0 kGy. A dose de radiação 1,2 kGy removeu 4,17 unidades logarítmicas de coliformes totais, e a concentração do efluente foi de 709 NMP/100 mL, que é aceita para irrigação de cultivos alimentícios ingeridos crus (WHO 1989). Já A dose 2,5 kGy foi capaz de inativar 5,46 unidades logarítmicas de coliformes totais, e o efluente apresentou a concentração igual a 23 NMP/100 mL, após essa dose de irradiação. E a dose de radiação 3,0 kGy foi capaz de reduzir 7,02 unidades logarítmicas de coliformes totais, e a concentração de coliformes totais foi de 2 NMP/100 mL. Vale salientar que as concentrações de coliformes totais obtidas nas doses de radiação 2,5 kGy e 3,0 kGy se enquadraram nos requisitos preconizados pelos limites recomendados para utilização de esgotos tratados para o uso irrestrito urbano e agrícola, além do uso predial (CHERNICHARO *et al.*, 2006)

Os resultados encontrados mostraram que a irradiação de esgoto tratado pela dose de radiação gama 1,2 kGy foi efetiva, mas irradiações com as doses 2,5 e 3,0 kGy foram mais eficientes. Estas doses de radiação diminuíram as concentrações de coliformes totais à níveis preconizados para os mesmos tipos de usos previstos. Isso corrobora com a hipótese da similaridade da ação dessas duas doses de radiação em questão.

A Figura 5.8 mostra que a remoção de coliformes totais de esgoto tratado também segue a lei de Chick, conforme provado pelo R^2 igual a 0,91.

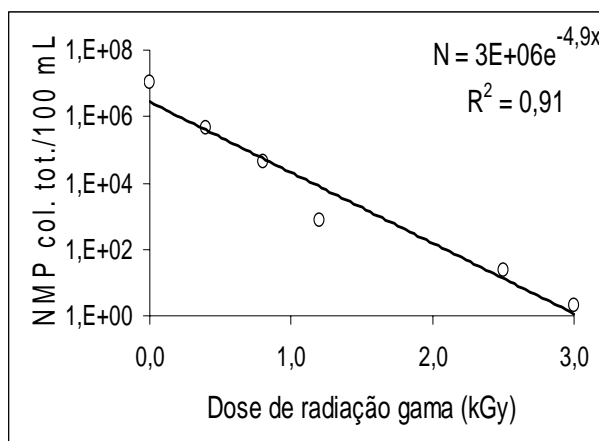


Figura 5.8 – Inativação de coliformes totais em esgoto tratado

5.1.2.2 Inativação de coliformes termotolerantes

Os dados referentes ao decaimento das concentrações de coliformes termotolerantes de esgoto tratado irradiado estão apresentados na Tabela 5.9 e ilustrados na Figura 5.9.

Tabela 5.9 – Concentração de coliformes termotolerantes (NMP/100 ml) de esgoto tratado irradiado

Variável estatística	Dose de radiação (kGy)					
	0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Média Geométrica	6,55E+06	4,54E+05	3,70E+04	5,35E+02	1,05E+01	2,00E+00
Máximo	2,40E+07	1,70E+05	1,70E+05	1,70E+03	9,20E+01	2,00E+00
Mínimo	2,20E+06	2,30E+03	2,30E+03	3,00E+02	2,00E+00	2,00E+00

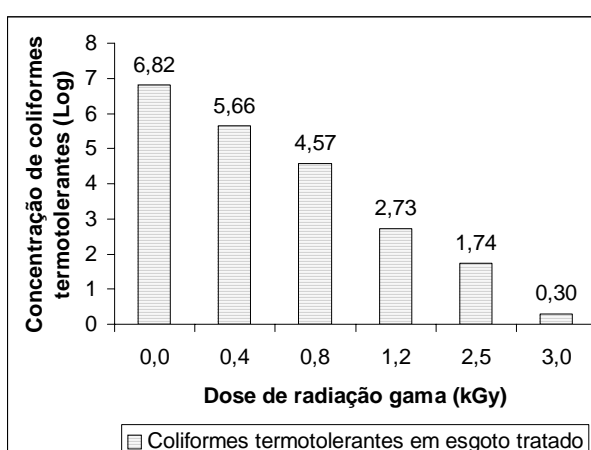


Figura 5.9 – Concentração de coliformes termotolerantes em esgoto tratado

Percebeu-se que, como nos itens anteriores, houve uma diminuição na concentração de coliformes termotolerantes ao se aumentar a dose de radiação gama aplicada.

Utilizou-se o teste estatístico de comparação múltipla de amostras independentes Kruskal-Wallis para verificar diferenças nas concentrações de coliformes termotolerantes irradiadas com doses diferentes. A resposta do teste está apresentada na Tabela 5.10.

O teste em questão apenas detectou diferenças estatística significativa entre as concentrações de coliformes termotolerantes em amostras de esgoto tratado irradiados com raios gama para as doses de 2,5 kGy e 3,0 kGy em relação às amostras não irradiadas.

Tabela 5.10 – Comparação entre as concentrações de coliformes termotolerantes em diferentes dosagens de raios gama em esgoto tratado

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,4 X 0,0	1,000000	semelhante
0,4 X 0,8	1,000000	semelhante
0,4 X 1,2	1,000000	semelhante
0,4 X 2,5	0,366734	semelhante
0,4 X 3,0	0,290600	semelhante
0,8 X 0,0	1,000000	semelhante
0,8 X 1,2	1,000000	semelhante
0,8 X 2,5	1,000000	semelhante
0,8 X 3,0	0,796469	semelhante
1,2 X 0,0	0,630283	semelhante
1,2 X 2,5	1,000000	semelhante
1,2 X 3,0	1,000000	semelhante
2,5 X 0,0	0,002388	diferente
2,5 X 3,0	1,000000	semelhante
3,0 X 00	0,006155	diferente

O teste estatístico também mostrou similaridade entre as doses de radiação de 1,2 kGy, 2,5 kGy e 3,0 kGy. A dose de radiação 1,2 kGy reduziu a concentração de coliformes termotolerante das amostras em 4,09 unidades logarítmicas, sendo que o efluente apresentou uma concentração de 534 NMP/100 mL. Já a dose 2,5 kGy teve o potencial de diminuir as proporções de coliformes termotolerantes em 5,07 unidades logarítmicas em esgoto tratado, sendo a concentração de coliformes termotolerantes alcançada foi de 11 NMP/100 mL. Por sua vez, a dose de radiação 3,0 kGy diminuiu a concentração de coliformes termotolerantes em 6,82 unidades logarítmicas no esgoto tratado, o que corresponde a 2 NMP/100 mL.

A dose de radiação 1,2 kGy reduziu as concentrações de coliformes termotolerantes aos níveis recomendados para a utilização urbano restrito, agrícola irrestrito e predial do esgoto. Já doses de radiação gama, 2,5 kGy e 3,0 kGy, diminuíram as concentrações de coliformes termotolerantes aos níveis previstos pelos limites recomendados para utilização de esgotos tratados no caso do uso irrestrito urbano e agrícola e uso predial (CHERNICHARO *et al.*,

2006). Assim, pode-se inferir que as doses de radiação 1,2 kGy, 2,5 kGy e 3,0 kGy são efetivas na inativação de coliformes termotolerantes presentes em esgoto tratado.

Observou-se também o decaimento dos coliformes termotolerantes ocorre segundo a lei de Chick, conforme pode ser apresentado através da Figura 5.10 e justificado pelo R^2 igual a 0,89.

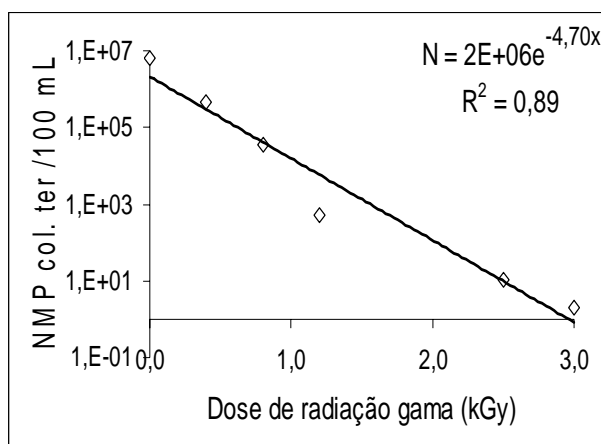


Figura 5.10 – Inativação de coliformes termotolerantes em esgoto tratado

5.1.2.3 Inativação de bactérias heterotróficas

A Tabela 5.11 apresenta as concentrações de bactérias heterotróficas em esgoto tratado após a irradiação.

Tabela 5.11 – Concentração de bactérias heterotróficas (UFC/mL) em esgoto tratado irradiado.

Variáveis estatísticas	Dose de radiação gama (kGy)					
	0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Média Geométrica	2,32E+06	4,16E+05	7,04E+04	1,15E+04	2,87E+03	1,27E+03
CV %	1,08E+07	1,27E+05	1,27E+05	1,51E+04	4,15E+03	3,40E+03
Máximo	5,00E+05	2,31E+04	2,31E+04	7,45E+03	9,70E+02	5,30E+02
Mínimo	2,32E+06	4,16E+05	7,04E+04	1,15E+04	2,87E+03	1,27E+03

A Figura 5.11 apresenta as concentração de bactérias heterotróficas, expressas em unidades logarítmicas, em esgoto tratado irradiado. De maneira semelhante aos itens anteriores, observou-se uma diminuição da concentração de bactérias heterotróficas em esgoto tratado ao aumentar a dose de radiação aplicada. A Tabela 5.12 mostra o resultado do teste Kruskal-Wallis, que foi utilizado para investigar se existem diferenças significativas às eficiências de remoção destes organismos em doses de radiação diferentes.

Basfar e Abdel Rehim (2002) estudaram efluente proveniente de reatores de lodos ativados, após a irradiação. Esses autores conseguiram detectar uma taxa de inativação de bactérias heterotróficas acima de 99% à dose de radiação de 4 kGy.

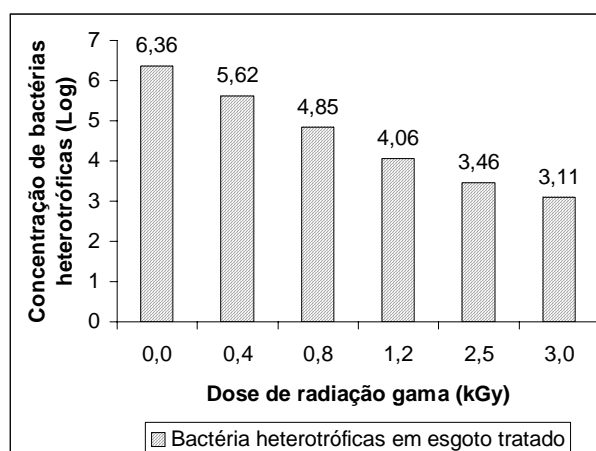


Figura 5.11 – Concentração de bactérias heterotróficas em esgoto tratado

Tabela 5.12 – Comparação das concentrações de bactérias heterotróficas de esgoto tratado irradiados em diferentes doses

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,4 X 0,0	1,000000	semelhante
0,4 X 0,8	1,000000	semelhante
0,4 X 1,2	1,000000	semelhante
0,4 X 2,5	0,417103	semelhante
0,4 X 3,0	0,229707	semelhante
0,8 X 0,0	1,000000	semelhante
0,8 X 1,2	1,000000	semelhante
0,8 X 2,5	1,000000	semelhante
0,8 X 3,0	0,649622	semelhante
1,2 X 0,0	0,630283	semelhante
1,2 X 2,5	1,000000	semelhante
1,2 X 3,0	1,000000	semelhante
2,5 X 0,0	0,003047	diferente
2,5 X 3,0	1,000000	semelhante
3,0 X 00	0,004197	diferente

Os resultados do teste estatístico mostraram que, similarmente aos outros microrganismos presentes em esgoto tratado, só houve diferença significativa entre as concentrações de bactérias heterotróficas das amostras irradiadas com as doses de raios gama de 2,5 kGy e 3,0 kGy em relação às amostras não irradiadas.

Foi observado que a dose de radiação de 2,5 kGy inativou em 2,91 unidades logarítmicas das bactérias heterotróficas do esgoto tratado e a sua concentração foi 2.870 UFC/mL. No caso da dose de 3,0 kGy, houve uma redução da concentração de bactérias heterotróficas da ordem de

3,10 unidades logarítmicas. A concentração de bactérias heterotróficas nessa dose de radiação foi 1.270 UFC/mL.

As doses de radiação 2,5 e 3,0 kGy não apresentaram diferenças estatísticas significativa. Assim, o efeito da radiação gama no esgoto também pode ser considerado similar nas amostras irradiadas com as doses 2,5 kGy e 3,0 kGy.

A Figura 5.12 mostra que a redução das bactérias heterotróficas em esgoto tratado pela ação da irradiação também seguiu a lei de Chick, confirmado pelo R^2 foi igual a 0,87.

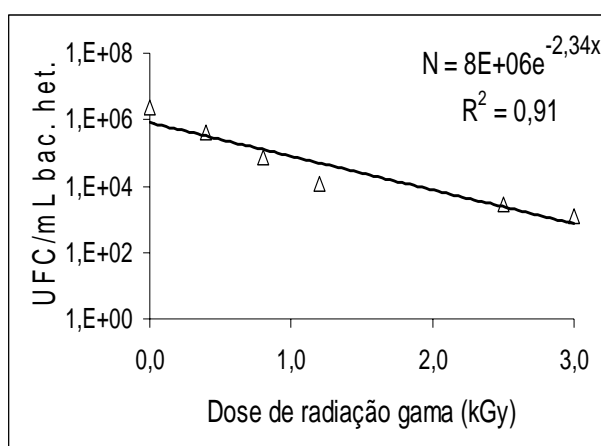


Figura 5.12 – Inativação de bactérias heterotróficas em esgoto tratado

Assim como no esgoto bruto, os coeficientes de inativação de microrganismos variaram de acordo com o seu tipo. O grupo coliforme apresentou coeficiente de inativação semelhante (4,9 kGy⁻¹ para coliformes totais, e 4,7 kGy⁻¹ para coliformes termotolerantes) e maior que o coeficiente de inativação das bactérias heterotróficas (2,34 kGy⁻¹). Já Farooq *et al.* (1993) encontraram que os coliformes e as bactérias heterotróficas possuíam o mesmo nível de inativação para cada dose de radiação aplicada.

5.1.3 Análise conjunta das eficiências de inativação de microrganismos em esgoto bruto e tratado

A comparação da remoção de microrganismos em esgoto bruto e esgoto tratado são apresentados na Figura 5.13.

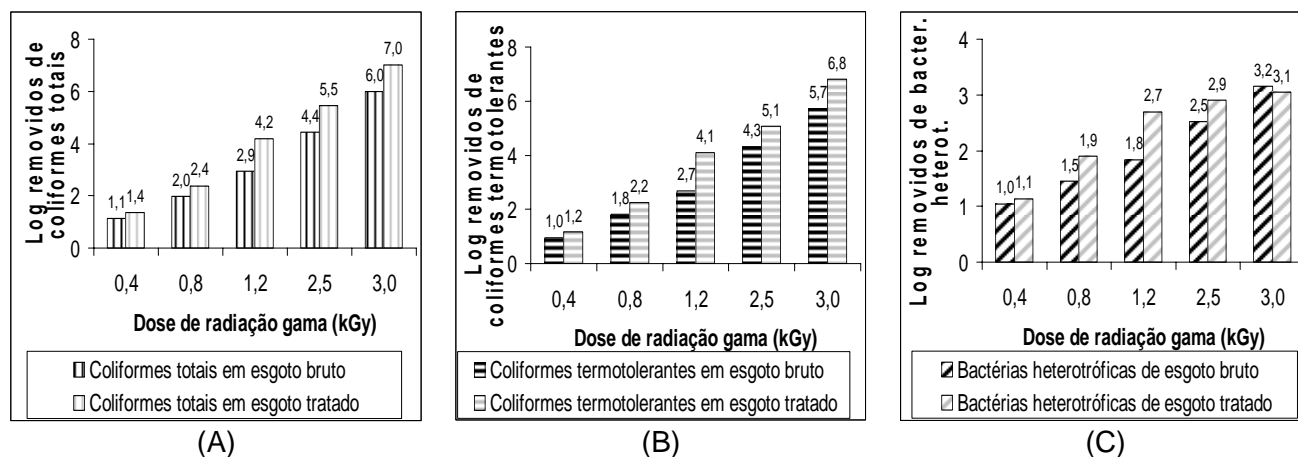


Figura 5.13 – Comparação entre as eficiências médias de remoção de coliformes totais (A), coliformes termotolerantes (B) e bactérias heterotróficas (C) em esgoto bruto e esgoto tratado

As figuras mostram que a remoção de microrganismos em esgoto bruto é menor que a remoção de microrganismos em esgoto tratado. Os coeficientes de inativação (kGy^{-1}) dos microrganismos corroboraram com essa observação. Os valores dos coeficientes de inativação de microrganismos em esgoto bruto (4,2; 4,1; e 2,1 kGy^{-1}) foram menores que os coeficientes de inativação de microrganismos em esgoto tratado (4,9; 4,7; 2,3 kGy^{-1}). Uma hipótese para explicar tal fato seria que o esgoto bruto apresenta uma maior concentração de substâncias que funcionariam como radioprotetoras. Essas substâncias prejudicariam a efetividade de remoção de microrganismos. Em contrapartida, o esgoto tratado apresentaria uma menor concentração dessas substâncias, o que acarretaria em uma maior eficiência de remoção de microrganismos nesse tipo de efluente.

5.1.4 Efeito da radiação gama em microrganismos

A ação da radiação gama em microrganismos presentes no esgoto doméstico se dá principalmente pelos efeitos indiretos. A diversidade metabólica possibilita respostas diferentes dos microrganismos expostos à irradiação.

A Tabela 5.13 mostra a ocorrência de espécies de enterobactérias isoladas amostras de esgoto bruto sem radiação e expostas a várias doses de radiação gama.

Tabela 5.13 – Ocorrência de microrganismos em esgoto bruto antes e após a irradiação

		Dose de radiação gama (kGy)					
		0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Espécies de microrganismos isolados do esgoto bruto	<i>Enterobacter aerogenes</i>		<i>Citrobacter freundii</i>	<i>Citrobacter diversus</i>	<i>Enterobacter agglomerans</i>	<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Enterobacter aerogenes</i>
	<i>Escherichia coli</i>		<i>Enterobacter agglomerans</i>	<i>Citrobacter freundii</i>	<i>Enterobacter sakazakii</i>	<i>Enterobacter cloacae</i>	<i>Klebsiella ozaenae</i>
	<i>Klebsiella oxytoca</i>		<i>Escherichia coli</i>	<i>Enterobacter agglomerans</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	<i>Klebsiella ozaenae</i>		<i>Escherichia hermannii</i>	<i>Enterobacter gergoviae</i>	<i>Escherichia hermannii</i>	<i>Escherichia hermannii</i>	<i>Shigella dysenteriae</i>
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>		<i>Klebsiella ozaenae</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Klebsiella ozaenae</i>	<i>Klebsiella ozaenae i</i>	
	<i>Morganella morganii</i>		<i>Morganella morganii</i>	<i>Morganella morganii</i>	<i>Morganella morganii</i>	<i>Morganella morganii</i>	
	<i>Proteus vulgaris</i>		<i>Proteus mirabilis</i>	<i>Proteus penneri</i>	<i>Proteus penneri</i>	<i>Proteus mirabilis</i>	
	<i>Providencia alcalifaciens</i>		<i>Providencia alcalifaciens</i>	<i>Providencia alcalifaciens</i>	<i>Providencia alcalifaciens</i>	<i>Proteus penneri</i>	
	<i>Providencia rettgeri</i>			<i>Shigella flexneri</i>		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>			<i>Vibrio cholerae</i>		<i>Serratia marcescens</i>	
	<i>Serratia marcescens</i>			<i>Vibrio paraemolyticus</i>		<i>Vibrio paraemolyticus</i>	
	<i>Serratia rubidae</i>						
	<i>Shigella flexneri</i>						
	<i>Vibrio cholerae</i>						
	<i>Vibrio paraemolyticus</i>						
<i>Yersinia enterocolitica</i>							

O método de isolamento de microrganismos não permitiu uma quantificação e identificação completa de todas as espécies bacterianas que ocorreram no esgoto bruto. É sabido que apenas 1% das bactérias existentes tem o potencial de se desenvolver em meios de cultivo. Além do mais, o método não possibilita a identificação prática de todos os microrganismos presentes nas culturas mistas enriquecidas do esgoto. Provavelmente, por isso, a riqueza de enterobactérias não decresceu da forma esperada em cada dose de radiação subsequente. Ainda assim, observou-se uma menor riqueza de bactérias para as amostras irradiadas com doses de radiação mais altas. A riqueza de um ecossistema pode ser definida como a quantidade de espécies diferentes encontradas, em determinado local.

As espécies *Enterobacter aerogenes*, *Klebsiella ozaenae*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Shigella dysenteriae*, isoladas de esgoto doméstico bruto foram mais as resistentes, sendo isoladas de amostras expostas a dose de radiação de 3,0 kGy.

As espécies de enterobactérias isoladas do esgoto sanitário tratado em reator UASB, após exposição nas diversas doses de radiação gama, são apresentadas na Tabela 5.14.

Já no esgoto tratado, foi possível observar um decréscimo da riqueza de enterobactérias com o aumento da dose de radiação gama aplicada. Isso, considerando os erros intrínsecos ao método de isolamento e identificação de bactérias. Assim como no esgoto bruto, o esgoto tratado também apresentou uma riqueza menor de microrganismos em doses de radiação mais altas. As enterobactérias que se apresentaram radiorresistentes à dose de radiação gama de 3,0 kGy foram: *Enterobacter agglomerans*, *Serratia rubidae* e *Pseudomonas aeruginosa*.

Tabela 5.14 – Ocorrência de microrganismos em esgoto tratado antes e após a irradiação

		Dose de radiação gama (kGy)					
		0,0	0,4	0,8	1,2	2,5	3,0
Espécies de microrganismos isolados do esgoto tratado	<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Enterobacter agglomerans</i>
	<i>Enterobacter cloacae</i>		<i>Escherichia coli</i>	<i>Escherichia hermannii</i>	<i>Enterobacter gergoviae</i>	<i>Klebsiella ozaenae</i>	<i>Serratia rubidaea</i>
	<i>Enterobacter sakazakii</i>		<i>Klebsiella ozaenae</i>	<i>Klebsiella ozaenae</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	<i>Escherichia coli</i>		<i>Klebsiella pneumoniae</i>	<i>Morganella morganii</i>	<i>Escherichia hermannii</i>		
	<i>Escherichia hermannii</i>		<i>Morganella morganii</i>	<i>Shigella flexneri</i>	<i>Klebsiella ozaenae</i>		
	<i>Klebsiella oxytoca</i>		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Vibrio paraemoliticus</i>	<i>Morganella morganii</i>		
	<i>Klebsiella ozaenae</i>		<i>Serratia rubidaea</i>	<i>Serratia rubidaea</i>			
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>		<i>Shigella sonnei</i>	<i>Vibrio paraemoliticus</i>			
	<i>Morganella morganii</i>		<i>Vibrio cholerae</i>				
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		<i>Yersinia enterocolitica</i>				
	<i>Serratia rubidaea</i>						
	<i>Vibrio paraemoliticu</i>						

Conforme mencionado na metodologia, a radiosensibilidade pode ser estimada pelo valor de D_{10} , dose de radiação necessária para inativar 1 unidade logarítmica do número inicial de microrganismos (EPN, 1997).

A Tabela 5.15 apresenta os valores de D_{10} , dose necessária para inativar uma unidade logarítmica, para os microrganismos presentes em esgoto bruto e tratado em reatores UASB..

Tabela 5.15 – Valores de D_{10} dos microrganismos em esgoto bruto e tratado

Tipo de esgoto	Coliformes totais	Coliformes termotolerantes	Bactérias heterotróficas
Esgoto Bruto	0,32	0,34	0,34
Esgoto Tratado	0,36	0,36	0,41

Os valores de D_{10} encontrados para coliformes são semelhantes aos valores encontrados por Basfar e Abdel Rehim (2002), $D_{10} = 0,3$ kGy para coliformes totais e $D_{10} = 0,4$ kGy para coliformes termotolerantes, em efluentes tratados em reatores de lodos ativados. Esse mesmo estudo encontrou $D_{10} = 0,3$ kGy para coliformes de esgoto bruto. Rawat *et al* (1997) encontraram o valor de D_{10} de 0,22 kGy para coliformes do efluente final do tanque de sedimentação. Embora o cálculo dos valores de D_{10} do grupo coliforme seja comparáveis com os valores de D_{10} de bactérias heterotróficas, de acordo com os resultados anteriores esse grupo se mostrou mais radorresistentes (vide Figuras 5.6 e 5.12).

5.1.5 Dose de radiação efetiva em microrganismos

Após a aplicação da dose de 2,5 kGy, os dois tipos de esgoto apresentaram concentrações médias de coliformes termotolerantes (882 NMP /100 mL de esgoto bruto e 11 NMP/100 mL de esgoto tratado) abaixo das concentrações preconizadas pelos limites recomendados para utilização de esgotos tratados para o uso urbano restrito (menos de 10000 NMP/100 mL), para o uso predial (menos de 1000 NMP/100 mL) e para o uso agrícola irrestrito (menos de 1000 NMP/100 mL), sendo que para o esgoto tratado a concentração de coliformes termotolerantes se enquadrou também para o uso urbano irrestrito (menos de 200 NMP/100 mL) (CHERNICHARO *et al.*, 2006).

Ainda assim é válido ressaltar que a eficiência da inativação de microrganismos pela dose de radiação gama de 3,0 kGy, que é apenas 20% maior que a dose de 2,5 kGy, apresentou resultados bem melhores para a desinfecção dos dois tipos de esgotos. A concentração média de coliformes termotolerantes alcançadas após a irradiação com a dose 3,0 kGy foi de 5 NMP/100 mL de esgoto bruto e 2 NMP/100 mL de esgoto tratado. Isso significa que tanto o

esgoto bruto e o esgoto tratado apresentaram concentrações de coliformes termotolerantes que se enquadraram nos limites mais rigorosos sugerido pelos limites preconizados para utilização de esgotos tratados, no caso, o uso urbano irrestrito (menos de 200 NMP/100 mL) (CHERNICHARO *et al.*, 2006).

Thompson (1999) relatou que os desinfetantes usuais removem aproximadamente de 2 a 3,5 unidades logarítmicas do grupo coliforme. Embora existam algumas divergências na definição de dose de radiação efetiva de irradiação gama para inativação de microrganismos, uma quantidade considerável de unidades logarítmicas é removida por esse método.

Farooq *et al.* (1993) reportaram que foram inativados 4 unidades logarítmicas de coliformes em efluente de lodos ativados na dose de radiação de 5 kGy.

Borrely (1995) sugeriu a dose de radiação de 4 kGy para garantir uma desinfecção eficiente em amostras de esgoto bruto e tratado em lagoas de estabilização. Borrely *et al.* (1998) demonstraram que a irradiação de esgoto bruto a 3,0 kGy removeu 5 unidades logarítmicas da concentração de coliformes.

Segundo Rawat *et al.* (1997) a dose de radiação de 2,0 kGy reduziu a concentração de coliformes de esgoto bruto em 4 unidades logarítmicas. A carga inicial foi de 4×10^5 UFC/mL e, lograram-se diminuir a concentração da população de microrganismos para níveis seguros, menores que 100 UFC/mL. Basfar e Abdel Rehim (2002) revelaram que a inativação completa de coliformes totais e termotolerantes de esgoto tratado em lodos ativados, acompanhada de não recrescimento, foi alcançada na dose de radiação de 1,3 kGy. A inativação completa à essa dose de radiação mais baixa pode ser decorrente de um possível sinergismo entre a irradiação e o oxigênio remanescente do tratamento de esgoto por lodos ativados.

Nesta pesquisa foi observado que a dose de radiação 2,5 kGy removeu 4,32 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes em esgoto bruto e 5,07 unidades logarítmicas em esgoto tratado em reator UASB; bem como a dose de radiação 3,0 kGy removeu 5,71 unidades logarítmicas de coliformes termotolerantes em esgoto bruto e 6,82 unidades logarítmicas em esgoto tratado em reator UASB.

Este estudo ainda registrou uma remoção de 2,57 unidades logarítmicas de bactérias heterotróficas em esgoto bruto e 2,91 unidades logarítmicas de bactérias heterotróficas em

esgoto tratado irradiados com a dose 2,5 kGy. Além disso, foram encontradas, uma inativação de 3,25 unidades logarítmicas de bactérias heterotróficas em esgoto bruto e 3,26 unidades logarítmicas de bactérias heterotróficas em esgoto tratado para a dose de radiação de 3,0 kGy. Estes dados corroboram com os dados obtidos por Borrely (1995) sobre bactérias heterotróficas, no caso de esgoto bruto. A autora mostrou que foi necessária a dose de radiação 3,0 kGy para reduzir a concentração de bactérias heterotróficas em 2,83 unidades logarítmicas.

As diferenças entre as eficiências da irradiação gama para a inativação de microrganismos encontrados pelos diversos autores pode ser devido às variações das substâncias químicas que compõem as amostras em estudo, o que poderia gerar respostas microbiológicas diferentes.

Neste contexto, esta pesquisa sugere a dose de radiação de 2,5 kGy ou 3m0 kGy de radiação gama para uma desinfecção eficiente tanto de esgoto bruto como de efluentes previamente tratados em reatores UASB. A dose de radiação vai depender do uso previsto para o efluente a ser desinfetado.

5.2 Inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides*

5.2.1 Esgoto bruto

Conforme descrito na metodologia, foram realizados 3 ensaios de inativação, sendo que para cada teste foram feitas leituras de duas amostras, em triplicata.

O controle deste estudo obteve porcentagem de viabilidade média de 96% ovos de *A. lumbricoides* viáveis. As concentrações médias de ovos de *A. lumbricoides* /litro encontradas nos experimentos apresentaram grandes variações. A alta variabilidade detectada na concentração de ovos de *A. lumbricoides* /L das amostras de esgoto pode ser atribuídas à heterogeneidade das concentrações iniciais dos inóculos contendo ovos. Dessa forma a concentração inicial de ovos no experimento variou acentuadamente nos ensaios em questão.

Foi observado que a porcentagem de ovos viáveis diminuiu com o aumento da dose de radiação gama aplicada. Isso evidencia que, apesar das diferenças entre as porcentagens de inativação nos ensaios, a radiação gama é efetiva contra os ovos de *A. lumbricoides*.

Os resultados das concentrações médias de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto são apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Concentração média aritmética de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto antes e depois da irradiação

Dose (kGy)	Ensaio	Estatística	Nº ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis	% de viabilidade
0,0	1	x	x	x	0,96
	2	x	x	x	0,96
	3	x	x	x	0,97
0,5		Média Arit.	727,2	190,9	0,79
	1	Desvio Padrão	171,4	82,1	0,1
		CV %	4,2	2,3	9,4
		Média Arit.	2218,1	295,8	0,88
	2	Desvio Padrão	422,1	94,0	0,0
		CV %	5,3	3,1	26,1
Média Arit.		275,3	46,4	0,85	
3	Desvio Padrão	105,9	20,0	0,1	
	CV %	2,6	2,3	12,9	
		Média Arit.	69,7	414,6	0,15
1,0	1	Desvio Padrão	12,8	119,6	0,0
		CV %	5,4	3,5	4,0
		Média Arit.	762,1	1038,3	0,42
	2	Desvio Padrão	226,0	181,6	0,0
		CV %	3,4	5,7	10,0
		Média Arit.	394,5	230,7	0,64
3	Desvio Padrão	117,8	99,7	0,1	
	CV %	3,3	2,3	8,7	
		Média Arit.	96,2	2570,6	0,04
1,5	1	Desvio Padrão	25,6	584,4	0,0
		CV %	3,8	4,4	3,7
		Média Arit.	297,7	1143,2	0,21
	2	Desvio Padrão	80,8	144,8	0,0
		CV %	3,7	7,9	5,2
		Média Arit.	144,0	549,9	0,22
3	Desvio Padrão	32,6	158,1	0,1	
	CV %	4,4	3,5	3,3	
		Média Arit.	7,5	1670,7	0,01
2,5	1	Desvio Padrão	10,0	484,3	0,0
		CV %	0,7	3,4	0,7
		Média Arit.	11,6	1295,8	0,01
	2	Desvio Padrão	14,9	160,5	0,0
		CV %	0,8	8,1	0,8
		Média Arit.	17,0	843,3	0,02
3	Desvio Padrão	7,8	65,7	0,0	
	CV %	2,2	12,8	2,3	
		Média Arit.	0,0	3410,4	0,00
5	1	Desvio Padrão	0,0	893,6	0,0
		CV %	0,0	3,8	0,0
		Média Arit.	0,0	1430,1	0,00
	2	Desvio Padrão	0,0	223,8	0,0
		CV %	0,0	6,4	0,0
		Média Arit.	0,0	820,3	0,00
3	Desvio Padrão	0,0	109,1	0,0	
	CV %	0,0	7,5	0,0	
		Média Arit.	0,0	0,0	0,00

Para facilitar as comparações entre a efetividade da dose de radiação gama empregada, optou-se por trabalhar com as porcentagens médias de viabilidade ou porcentagens de inativação dos ovos de *A. lumbricoides*, como são respectivamente apresentadas nas Figuras 5.14 e 5.15.

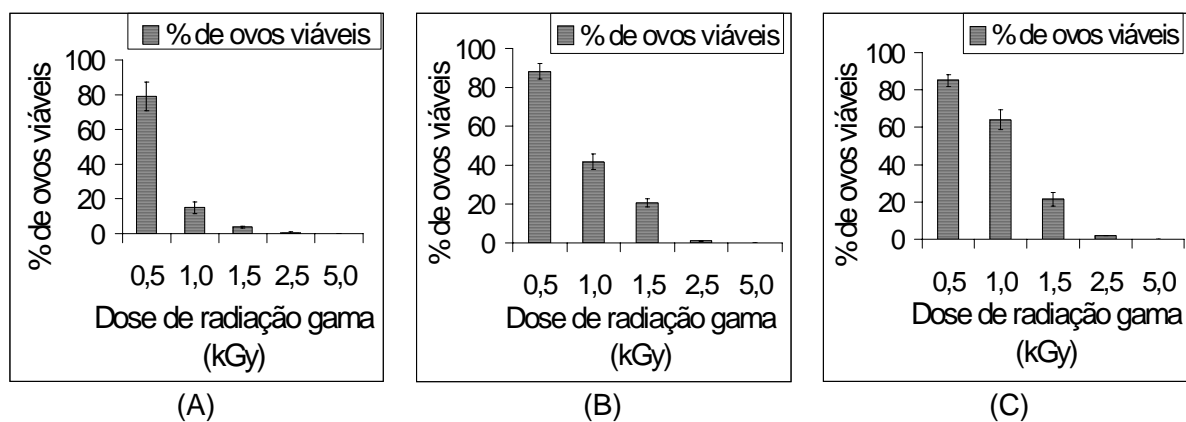


Figura 5.14 – Viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto no ensaio 1 (A), no ensaio 2 (B), e no ensaio 3 (C)

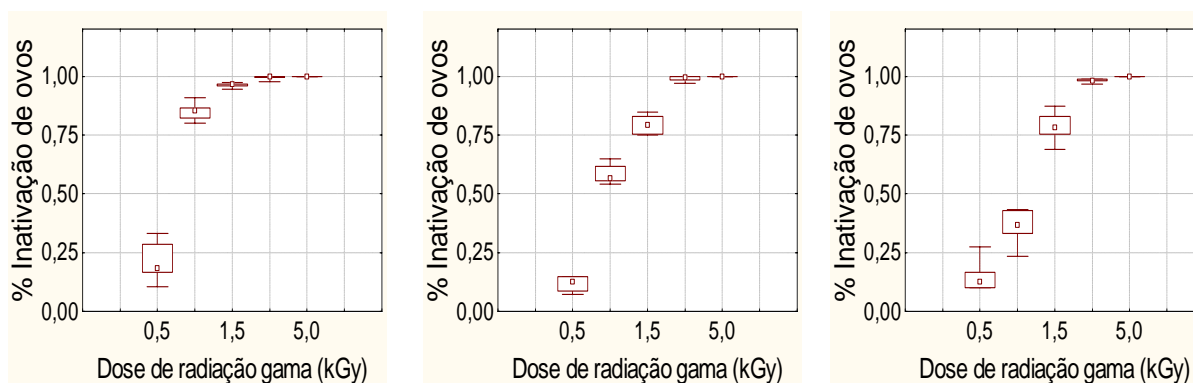


Figura 5.15 – Eficiência de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto no ensaio 1 (A), no ensaio 2 (B) e no ensaio 3 (C)

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios apresentaram altas variações das concentrações de ovos de *A. lumbricoides* /L e alcançaram diferentes porcentagens médias de inativação para uma mesma dose de radiação. Para verificar a existência de uma diferença significativa entre as porcentagens de inativação dos ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto em cada dose de radiação nas repetições dos ensaios foi realizado o teste da soma de postos de Wilcoxon para duas amostras independentes. Os resultados são apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto irradiado nos diferentes ensaios

Dose de radiação gama (kGy)	Possibilidades de Comparações entre ensaios	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,5	1 X 2	0,115853	semelhante
	1 X 3	0,248865	semelhante
	2 X 3	0,463072	semelhante
1,0	1 X 2	0,027709	diferente
	1 X 3	0,027709	diferente
	2 X 3	0,027709	diferente
1,5	1 X 2	0,027709	diferente
	1 X 3	0,027709	diferente
	2 X 3	0,753153	semelhante
2,5	1 X 2	0,465209	semelhante
	1 X 3	0,027709	diferente
	2 X 3	0,172956	semelhante

Observou-se que as principais variações foram nas doses de radiações 1,0 kGy e 1,5 kGy, como pode ser confirmado pelo resultado do teste estatístico.

Conjetura-se que a alta variabilidade das porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* nos ensaios pode ter acontecido em razão de uma provável influência da concentração inicial de ovos na eficiência do processo. Como visto as quantidades de ovos por litro detectada nos experimentos variaram bastante, o que pode ter gerado diferenças nas proporções encontradas entre ovos totais e ovos viáveis nas amostras durante os três ensaios. Isso aconteceu, provavelmente, devido a diferenças na quantidade de ovos inoculados nas amostras em estudo. Não foi possível manter a concentração de ovos do inóculo constante nos experimentos. O número de ensaios realizados não permite inferir se há um aumento ou uma diminuição nas diferenças da proporção entre ovos totais e ovos viáveis com o aumento quantitativo dos ovos. Mas, ainda assim, foi possível observar um decréscimo do número de ovos de helmintos viáveis no esgoto conseqüente do aumento da dose de radiação.

As porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* aumentam aproximadamente de forma exponencial. No caso, a dose de radiação de 2,5 kGy inativou 98,9% dos ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto. A concentração média de ovos/L variou entre 5,6 e 17 ovos/L, sendo acima da concentração máxima sugerida pelos limites recomendados para utilização de esgotos tratados, para uso urbano e agrícola restrito e irrestrito (menor que 1 ovo/L) (CHERNICHARO *et al.*, 2006).

Para investigar se as porcentagens de inativação no esgoto bruto variam significativamente

em doses de radiação diferentes foi realizado o teste de comparação múltipla de amostras independentes Kruskal-Wallis. Os resultados são apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto expostos a doses diferentes de raios gama

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,5 X 1,0	0,161667	semelhante
0,5 X 1,5	0,001672	diferente
0,5 X 2,5	0,000000	diferente
0,5 X 5,0	0,000000	diferente
1,0 X 1,5	1,000000	semelhante
1,0 X 2,5	0,000328	diferente
1,0 X 5,0	0,000001	diferente
1,5 X 2,5	0,052014	semelhante
1,5 X 5,0	0,000445	diferente
2,5 X 5,0	1,000000	semelhante

Os resultados evidenciam que as porcentagens de inativação em cada dose de radiação gama foram estatisticamente semelhantes em doses subseqüentes. Dessa forma, a diferença entre a porcentagem de inativação de ovos de *A. lumbricoides* nas doses de radiação 2,5 e 5,0 kGy é insignificante, o que permite inferir que a dose de radiação 2,5 kGy possui um efeito inativador de ovos de *A. lumbricoides* bem próximo ao efeito inativador da dose de radiação 5,0 kGy. Mas, o esgoto bruto irradiado à 2,5 kGy apresentou até 17 ovos viáveis/L. Com isso, a hipótese que 2,5 kGy pode ser a dose de radiação efetiva para inativação de ovo as de *A. lumbricoides* em esgoto doméstico bruto fica comprometida. A dose de radiação 5,0 kGy inativou 100% dos ovos.

5.2.2 Esgoto tratado

Os resultados sobre a inativação de ovos de *A. lumbricoides* no esgoto tratado em UASB são apresentados na Tabela 5.19.

Assim como no esgoto bruto, as repetições dos ensaios envolvendo a viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* também foram realizadas três vezes, com leituras de duas amostras, em triplicata.

Tabela 5.19 – Concentração média de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado antes e depois da irradiação

Dose (kGy)	Ensaio	Estatística	Nº ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis	% de viabilidade
0,0	1	x	x	x	0,96
	2	x	x	x	0,96
	3	x	x	x	0,97
0,5		Média Arit.	185,38	1338,13	0,12
	1	Desvio Padrão	71,96	287,58	0,04
		CV %	2,58	4,65	2,94
		Média Arit.	2256,53	723,73	0,76
	2	Desvio Padrão	318,61	97,28	0,03
		CV %	7,08	7,44	23,33
		Média Arit.	516,95	149,50	0,80
	3	Desvio Padrão	112,58	129,74	0,12
		CV %	4,59	1,15	6,62
		Média Arit.	81,55	2003,82	0,04
1,0	1	Desvio Padrão	26,05	254,96	0,01
		CV %	3,13	7,86	2,71
		Média Arit.	626,67	1007,20	0,38
	2	Desvio Padrão	105,81	154,43	0,03
		CV %	5,92	6,52	13,94
		Média Arit.	681,53	476,10	0,59
	3	Desvio Padrão	179,19	121,44	0,03
		CV %	3,80	3,92	21,38
			Média Arit.	66,19	2126,23
1,5	1	Desvio Padrão	35,90	750,41	0,01
		CV %	1,84	2,83	2,03
		Média Arit.	309,17	1177,07	0,21
	2	Desvio Padrão	88,14	95,33	0,04
		CV %	3,51	12,35	5,01
		Média Arit.	149,70	935,27	0,14
	3	Desvio Padrão	83,51	320,00	0,06
		CV %	1,79	2,92	2,32
			Média Arit.	3,51	1686,25
2,5	1	Desvio Padrão	3,97	700,45	0,00
		CV %	0,89	2,41	0,86
		Média Arit.	23,80	1353,48	0,02
	2	Desvio Padrão	19,83	148,36	0,01
		CV %	1,20	9,12	1,36
		Média Arit.	21,93	742,60	0,03
	3	Desvio Padrão	18,24	81,13	0,02
		CV %	1,20	9,15	1,28
			Média Arit.	0,00	4200,88
5	1	Desvio Padrão	0,00	1596,62	0,00
		CV %	0,00	2,63	0,00
		Média Arit.	0,00	1426,00	0,00
	2	Desvio Padrão	0,00	372,92	0,00
		CV %	0,00	3,82	0,00
		Média Arit.	0,00	547,43	0,00
	3	Desvio Padrão	0,00	133,05	0,00
		CV %	0,00	4,11	0,00
			Média Arit.	0,00	4200,88

Os resultados também apontaram altas variações nas concentrações médias de ovos /L entre os ensaios, embora a porcentagem de viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* também diminua com o aumento da dose de radiação gama aplicada. Assim, também se optou por expressar os dados como porcentagens de inativações dos helmintos.

Os resultados da viabilidade e a porcentagem de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado estão, respectivamente, ilustrados nas Figuras 5.16 e 5.17

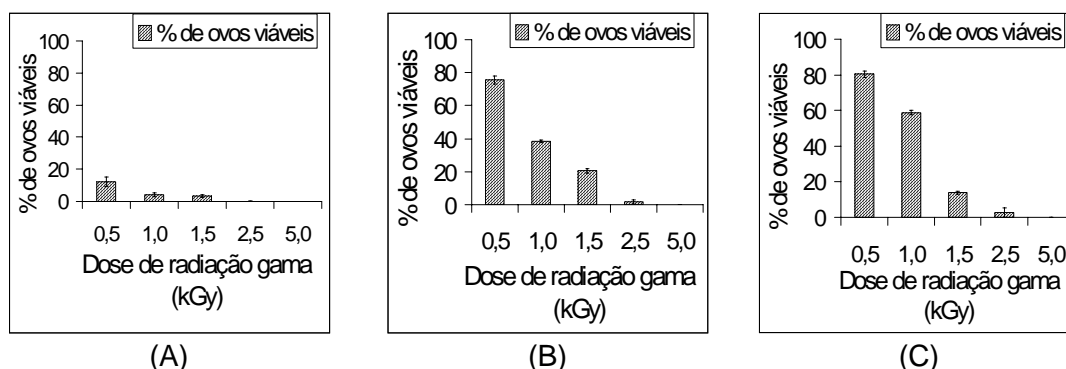


Figura 5.16 – Viabilidade de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado no ensaio 1 (A), no ensaio 2 (B), E no ensaio 3 (C)

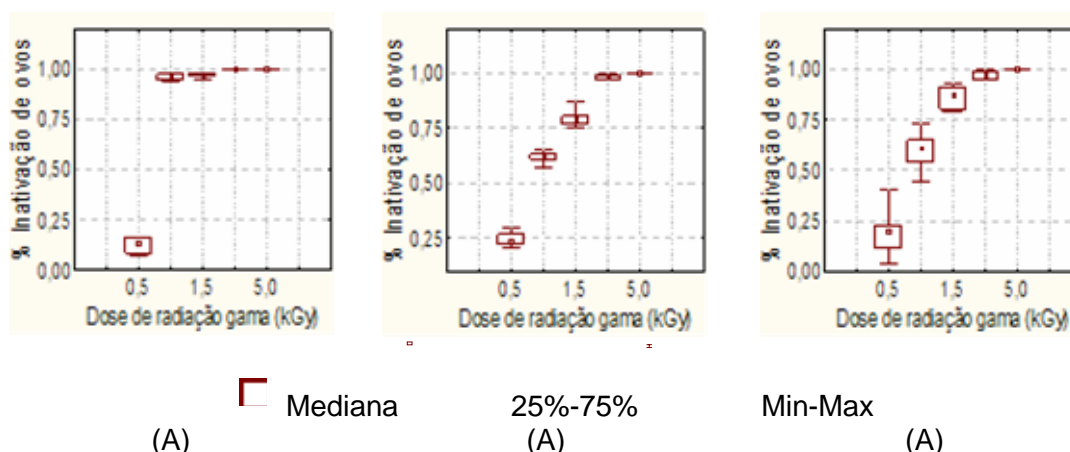


Figura 5.17 – Eficiência de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado no ensaio 1 (A), no ensaio 2 (B), e no ensaio 3 (C)

Os ensaios apresentam uma alta variabilidade nas porcentagens médias de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado, provavelmente pelos mesmos motivos expostos no item referente ao esgoto bruto. O teste da soma de postos de Wilcoxon procurou verificar essa hipótese para confirmar uma propensão a diferenças nos percentuais de inativação de ovos entre os ensaios, conforme evidenciado na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado irradiado nos diferentes ensaios

Dose de radiação gama (kGy)	Possibilidades de comparações entre ensaio	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,5	1 X 2	0,027709	diferente
	1 X 3	0,345448	semelhante
	2 X 3	0,248865	semelhante
1,0	1 X 2	0,027709	diferente
	1 X 3	0,027709	diferente
	2 X 3	0,600180	semelhante
1,5	1 X 2	0,027709	diferente
	1 X 3	0,027709	diferente
	2 X 3	0,115853	semelhante
2,5	1 X 2	0,043115	diferente
	1 X 3	0,043115	diferente
	2 X 3	0,345448	semelhante

No esgoto tratado, os ensaios expressaram diferenças nas porcentagens médias de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em quase todas as doses de radiação, salvo para os ensaios 2 e 3 que aparentemente mantiveram proporções de inativação semelhantes, mesmo com a concentração média de ovos de diferente entre si. As diferenças nas porcentagens de inativações de ovos de *A. lumbricoides* também podem ser atribuídas à concentração média de ovos. A dose de radiação de 2,5 kGy inativou 98,46% dos ovos de *A. lumbricoides* presentes no esgoto tratado.

No esgoto tratado a hipótese de que as porcentagens de inativação se diferenciam conforme a dose de radiação aplicada na amostra foi testada também pelo teste de comparação múltipla de amostras independentes Kruskal-Wallis, como mostra a Tabela 5.21.

O teste estatístico considerou que a porcentagem de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado não difere em doses de radiação próximas; o que pode admitir o efeito similar da dose de radiação de 2,5 kGy e 5,0 kGy. Mas, o efluente tratado em reator UASB e irradiado a 2,5 kGy não apresentou concentração de ovos do efluente condizente com os limites recomendados pela WHO (1989). Como não foi testada uma dose de radiação gama entre 2,5 kGy e 5,0 kGy, pode-se concluir que a dose ótima de desinfecção de esgoto está entre essas dosagens.

Tabela 5.21 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto tratado expostos a diferentes doses de raios gama

Possibilidades de comparações entre doses (kGy)	Resultado do teste valor de p	Significado estatístico
0,5 X 1,0	0,068310	semelhante
0,5 X 1,5	0,001875	diferente
0,5 X 2,5	0,000000	diferente
0,5 X 5,0	0,000000	diferente
1,0 X 1,5	1,000000	semelhante
1,0 X 2,5	0,003166	diferente
1,0 X 5,0	0,000002	diferente
1,5 X 2,5	0,101405	semelhante
1,5 X 5,0	0,000281	diferente
2,5 X 5,0	1,000000	semelhante

5.2.3 Análise conjunta das eficiências de inativação em esgoto bruto e tratado

A Figura 5.18 mostra os valores de porcentagem de inativação de ovos viáveis de *A. lumbricoides* em esgotos brutos e tratados expostos a doses de radiação diferentes nos três ensaios.

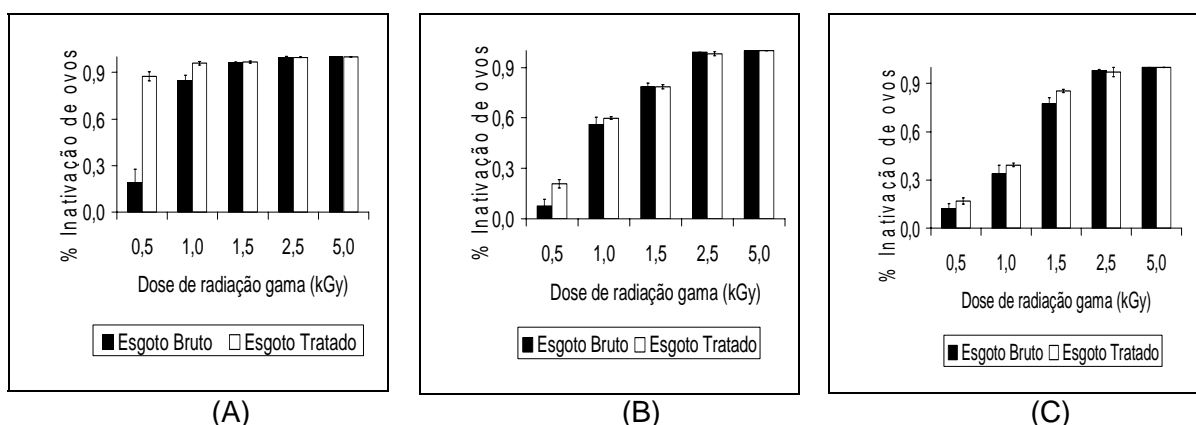


Figura 5.18 – Comparação entre as eficiência de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto e esgoto tratado no ensaio 1 (A), no ensaio 2 , e no ensaio 3 (C)

As doses de radiação mais baixas do experimento demonstraram uma tendência a diferenças nas porcentagens de ovos inativados. Para sustentar esta hipótese foi efetuado um teste estatístico da soma de postos de Wilcoxon. A Tabela 5.22 mostra estes resultados.

Tabela 5.22 – Comparação entre as porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto e tratado irradiados com diferentes doses

Dose de radiação gama (kGy)	Resultado do teste – valor de p	Significado estatístico
0,5	0,000629	diferente
1,0	0,000386	diferente
1,5	0,085390	semelhante
2,5	0,306625	semelhante
5,0	x	x

Ponderou-se que nas doses de radiação mais baixas (0,5 e 1,0 kGy) houve uma diferença estatística significativa nas porcentagens de ovos inativados em esgoto bruto e tratado, submetidos à mesma dosagem, conforme mostra a Tabela 5.22. Esses resultados ratificaram a hipótese de que em doses de radiação acima de 1,5 kGy a diferença estatística significativa entre a porcentagem de inativação de ovos em esgoto bruto e esgoto tratado passa a ser insignificante ou inexpressiva estatisticamente.

O meio no qual os ovos são irradiados pode influenciar as porcentagens de viabilidade (CAPIZZI e SCHWARTZBROD, 2001). Dentre vários fatores bióticos e abióticos, uma pressuposição para explicar as diferenças nas porcentagens de ovos viáveis nos dois tipos de esgotos é a presença de alguma(s) substância(s) interceptora(s) de radicais livres capaz(es) de atenuar o efeito da radiação, como ácidos graxos, matéria orgânica e vitaminas. Tal(is) substância(s) estariam em maior quantidade em esgoto bruto, o que justificaria as maiores porcentagens de ovos viáveis encontradas nessas amostras. O efeito radioprotetor evitaria danos aos ovos que conseguiram atingir a etapa final do desenvolvimento embrionário formando a larva infectante (ovo viável). Acima da dose de radiação de 1,5 kGy, presume-se que o efeito radioprotetor mostrou-se inexpressivo, para as condições dos testes efetuados e características do esgoto utilizados.

5.2.4 Efeitos da irradiação em ovos de *A. lumbricoides*

Os resultados obtidos mostraram que a irradiação gama prejudicou a formação do estágio larval infectante da maioria dos ovos. Observaram-se e registraram-se alterações na morfologia da membrana externa de alguns poucos ovos (membrana mamilonada), em várias doses de radiação, como mostra as Figuras 5.19 (A) e (B).

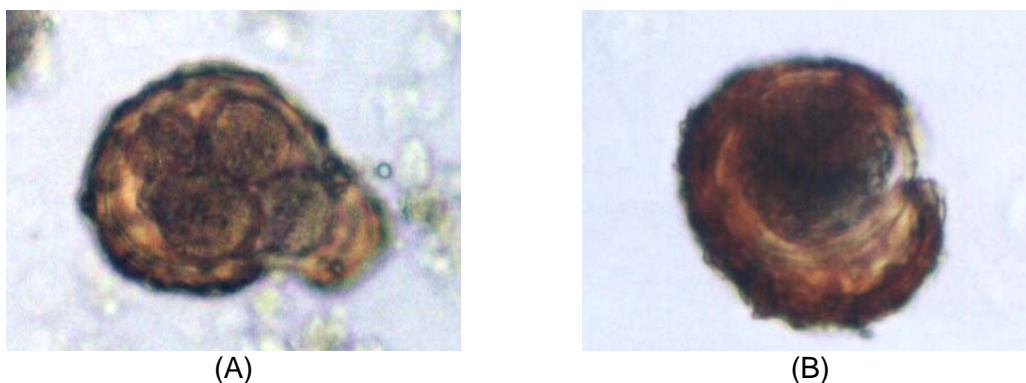


Figura 5.19 – Ovo de *A. lumbricoides* com alteração morfológica (A) e ovo de *Ascaris* com alteração na membrana (B), encontrados em amostras irradiadas com 5 kGy
Microscópio óptico comum - aumento de 40 vezes – Laboratório do DESA

Segundo Borrely *et al.* (1998), o efeito indireto é predominante na ação total da radiação em ambientes aquosos, como é o caso do esgoto.

Este trabalho estabeleceu a hipótese de que as alterações e os danos ao desenvolvimento embrionário observados nos ovos provavelmente foram obtidos principalmente pela ação direta da radiação gama, e não pelo efeito predominante da ação indireta.

Isso, porque o envoltório do ovo em questão é extremamente resistente à maioria das substâncias químicas existentes no meio. Um indício de que a casca do ovo de *A. lumbricoides* é resistente aos subprodutos responsáveis pela ação indireta da radiação é a pouca efetividade de ozônio para sua inativação (LAPOLLI *et al.*, 2003). O efeito da desinfecção por ozonização é alcançado em virtude do alto potencial de oxidação do ozônio e de seus produtos de degradação em água (radicais livres de oxigênio e íons hidroxila) (LAPOLLI *et al.*, 2003).

Dessa forma, a inativação dos ovos devem se dar fundamentalmente pelo efeito direto da irradiação, provocando vários eventos no seu interior, tais como a radiólise da água e desestruturação de suas biomoléculas, e não pela penetração, através do revestimento do ovo, de radicais livres e outras espécies reativas geradas pela irradiação do esgoto.

5.2.5 Dose de radiação efetiva em ovos de *A. lumbricoides*

Como mencionado nos itens anteriores, este estudo sugere a dose de radiação entre 2,5 kGy e 5,0 kGy como dose de radiação efetiva na inativação de ovos de *A. lumbricoides*. A dose de 2,5 kGy inviabilizou em média 98% dos ovos, enquanto que a dose de 5,0 kGy inviabilizou 100% dos ovos de *A. lumbricoides*.

Esse resultado é conflitante quando comparado com trabalho de Shamma e Al-Adawi (2002), onde encontraram que a dose de radiação de 1,5 kGy da fonte de ^{60}Co promoveu a inativação de 100% de ovos de *A. lumbricoides* em lodo. Vale salientar que o controle do experimento de Shamma e Al-Adawi (2002) apresentou a porcentagem de viabilidade de apenas 59,6%, enquanto que este estudo obteve porcentagem de viabilidade média de 96%. A porcentagem de viabilidade mais baixa do controle no experimento envolvendo lodo poderia justificar doses mais baixas que 2,5 kGy para inativação de ovos de *A. lumbricoides*, encontrada para o esgoto doméstico. Sivinski (1975) detectou uma inibição completa no desenvolvimento de ovos de *A. lumbricoides* a 0,95 kGy da fonte de ^{60}Co em solução salina. Capizzi *et al.* (1999)

demonstraram que nenhum ovo de *A. lumbricoides* foi viável após a exposição à dose de radiação de 0,75 kGy da fonte de aceleradores de elétrons em suspensão de água deionizada. Horak (1994) observou a inibição do desenvolvimento e a destruição do embrião no interior do ovo de *Ascaris soon* irradiados a 1,1 kGy.

Este estudo levou em consideração fatores importantes. Os ovos de *A. lumbricoides* são provenientes de fezes humanas, o que possibilitou que a resistência dos ovos aos agentes externos fosse semelhante à resistência dos ovos existentes no ambiente. O meio nos quais os ovos de *A. lumbricoides* foram irradiados, esgoto doméstico, também facilitou a obtenção de uma resposta de eficiência de inativação mais aproximada da realidade. De acordo com a legislação da Agência de Proteção Ambiental (USEPA, 1993 *apud* Capizzi *et al.*, 1999), a dose de radiação recomendada para o tratamento de lodo é 10 kGy.

Assim, esta pesquisa sugere para inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto doméstico uma dose de radiação entre 2,5 kGy e 5 kGy.

5.3 Ação residual da radiação gama em microrganismos

5.3.1 Recolonização de microrganismos em esgoto bruto

Os resultados sobre a recolonização de coliformes totais e de coliformes termotolerantes em esgoto bruto, previamente desinfetado por irradiação gama, estão expostos nas Figuras 5.20 e 5.21.

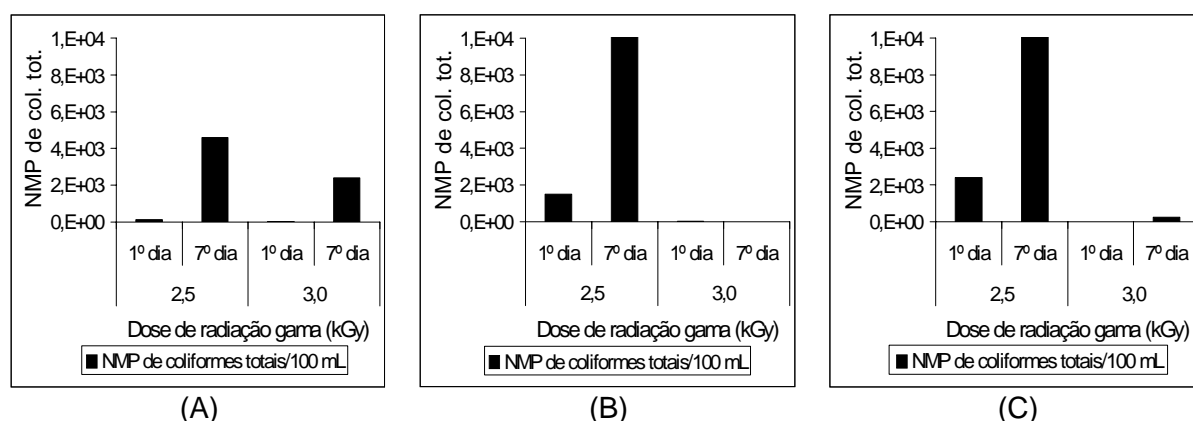


Figura 5.20 – Recolonização de coliformes totais em amostras de esgoto bruto irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy

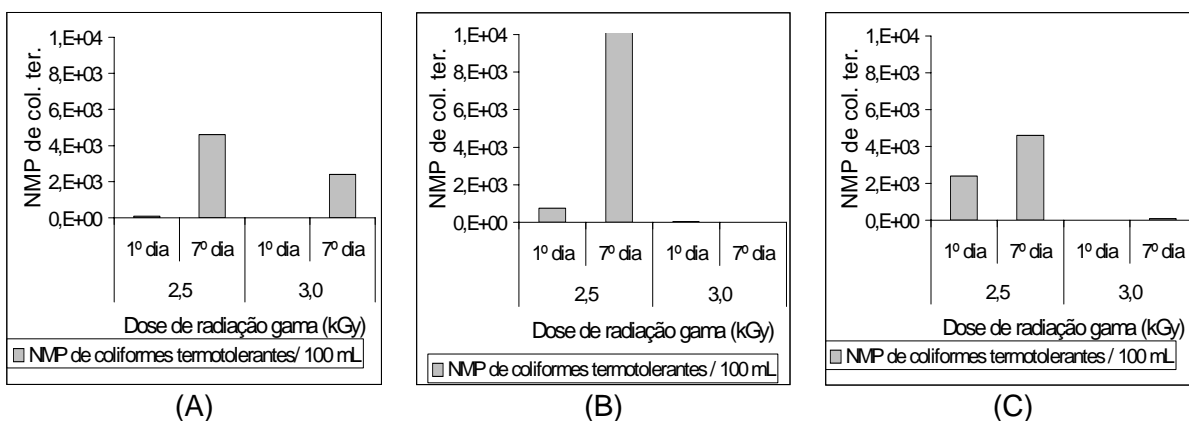


Figura 5.21 – Recolonização de coliformes termotolerantes em amostras de esgoto bruto irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy

Nos três ensaios realizados, a dose de radiação 2,5 kGy possibilitou uma recolonização nítida até 7º dia em esgoto bruto, tanto de coliformes totais, quanto de coliformes termotolerantes. Em geral, a dose de radiação 3,0 kGy foi suficiente para inibir um crescimento posterior de coliformes, embora no ensaio 1 tenha-se detectado recolonização.

5.3.2 Recolonização de microrganismos em esgoto tratado em reator UASB

Os resultados a respeito da recolonização de coliformes totais e de coliformes termotolerantes em esgoto tratado, após desinfecção por irradiação gama, estão demonstrados nas Figuras 5.22 e 5.23.

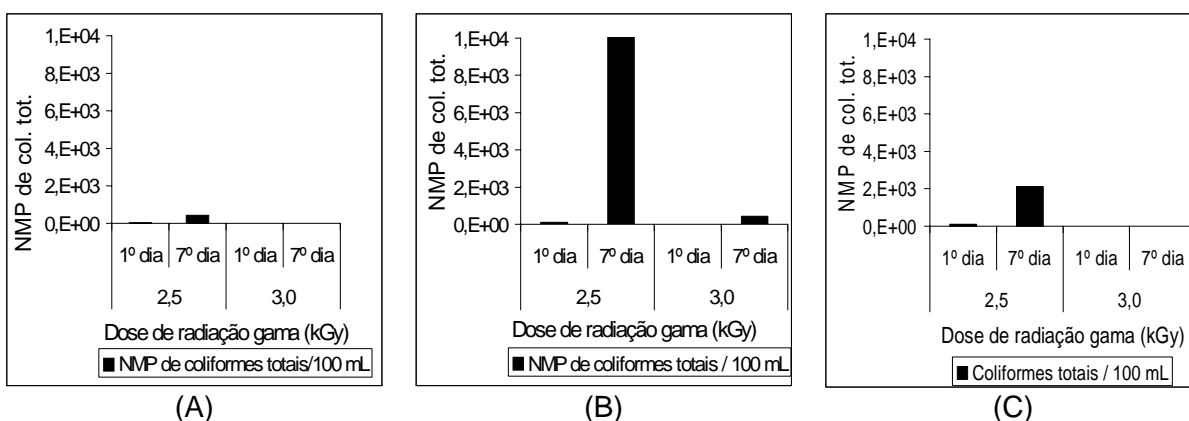


Figura 5.22 – Recolonização de coliformes totais em amostras de esgoto tratado irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy

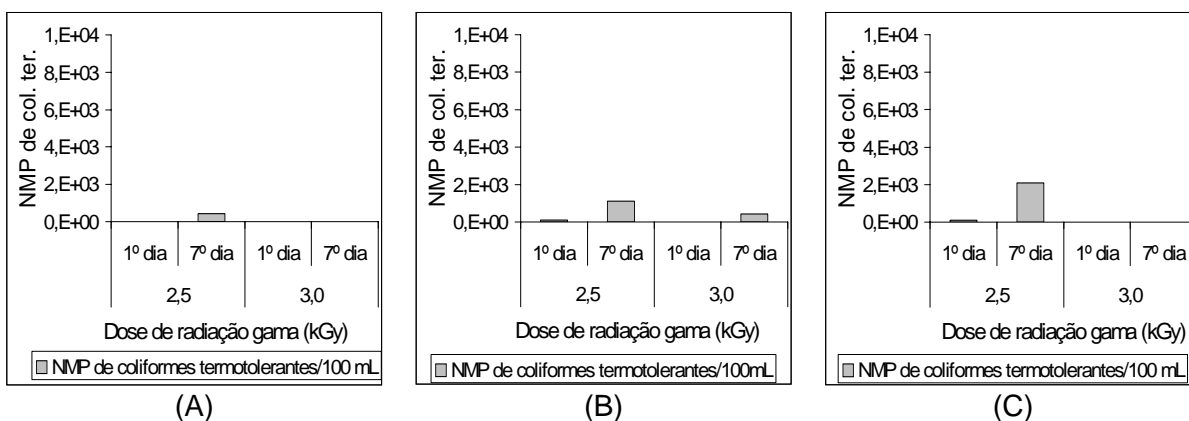


Figura 5.23 – Recolonização de coliformes termotolerantes em amostras de esgoto tratado irradiadas no ensaio 1 (A), ensaio 2 (B) e, ensaio 3 (C) irradiados a 2,5 e 3,0 kGy

Da mesma maneira que no esgoto bruto, os três ensaios realizados apresentaram recolonização de coliformes totais e coliformes termotolerantes no 7º dia após a radiação de 2,5 kGy. Praticamente todos os ensaios com coliformes totais não apresentaram recolonização na dose de radiação de 3,0 kGy. Já os coliformes termotolerantes apresentaram recrescimento no ensaio 2. Especula-se que para garantir que não ocorra recolonização doses maiores de radiação gama devam ser empregada nesse processo.

Shah *et al.* (2001) encontraram um recrescimento de coliformes totais em amostras de lodo líquido irradiadas de 0,5 kGy e 5 kGy, após 7 a 8 horas da irradiação com raios gama provenientes de ^{60}Co . Em contrapartida, Basfar e Abdel Rehim (2002) não encontraram recolonização na dose de radiação de 1,3 kGy.

Para observar maiores detalhes dos resultados referentes à ação residual da radiação gama vide Anexo D.

6 CONCLUSÕES

6.1 Efetividade da radiação gama na inativação de microrganismos

- A desinfecção de esgoto sanitário pelo uso da irradiação gama se apresentou extremamente eficiente.
- Com uma dose de radiação gama de 2,5 kGy foi possível obter uma desinfecção eficiente de esgoto doméstico bruto. Ao se considerar o parâmetro coliformes termotolerantes, foram alcançadas inativações de 4,32 unidades logarítmicas, o que correspondeu à concentração média de 882 NMP/100 mL. Tais concentrações foram abaixo dos limites previstos pelas diretrizes recomendadas para utilização do esgoto tratado, para o uso urbano restrito, do uso predial, e uso agrícola irrestrito.
- A dose de radiação de 2,5 kGy também foi efetiva para promover uma desinfecção em esgoto tratado em reator UASB. Essa dose de radiação reduziu a concentração média de coliformes termotolerantes em 5,46 unidades logarítmicas, e o efluente apresentou apenas 11 NMP/100 mL, que é menor que as concentrações preconizadas pelos limites recomendados para utilização de esgotos tratados para o uso urbano e agrícola irrestrito e uso predial.
- A taxa de inativação de microrganismos obedeceu à lei de Chick, e apresenta uma inativação exponencial dos organismos alvo.
- Elevadas cargas de matéria orgânica e outros poluentes existentes no esgoto podem exigir maior dose de radiação gama garantindo assim uma desinfecção eficiente, por conferir um maior potencial radioprotetor. Isso pode justificar as diferentes taxas de inativações de microrganismos encontradas para esgoto bruto e para esgoto tratado em reator UASB.
- As espécies de enterobactérias que se apresentaram mais radorresistentes à irradiação gama foram a *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter agglomerans*, a *Klebsiella ozaenae*, a *Pseudomonas aeruginosa*, *Serratia rubidaea*, e a *Shigella dysenteria*.
- O grupo coliforme se apresentou mais radiosensível que o grupo das bactérias heterotróficas.

6.2 Efetividade da radiação gama na inativação de ovos de *Ascaris lumbricoides*

- A radiação gama entre 2,5 e 5,0 kGy se mostrou bastante efetiva na inativação de ovos de *A. Lumbricoides* tanto para esgoto bruto quanto para esgoto tratado.
- As diferenças entre as porcentagens de inativação de ovos de *A. lumbricoides* em esgoto bruto e tratado são decorrentes das características físico-químicas do efluente.
- O efeito da irradiação gama na inativação de ovos de *A. lumbricoides* se dá principalmente pela ação direta.

6.3 Ação residual radiação gama

- Para garantir um não recrescimento dos coliformes totais e termotolerantes após a irradiação de esgoto doméstico, doses de radiação acima de 3,0 kGy devem ser empregadas.

6.4 Conclusões finais

- A desinfecção de esgoto por radiação gama a dose de 2,5 kGy pode ser considerada um método eficaz para garantir concentrações médias de coliformes termotolerantes preconizadas pelos limites preconizados para utilização de esgotos tratados para o uso urbano irrestrito (menos de 200 NMP/100 mL), uso predial (menos de 1000 NMP/100 mL) e uso agrícola irrestrito (menos de 1000 NMP/100 mL).
- Doses de radiações maiores que 2,5 kGy podem ser aplicadas a depender do uso previsto para o efluente irradiado.
- Considerando que a concentração inicial de ovos férteis em efluentes domésticos brutos ou tratados não são tão altas a dose de radiação 2,5 kGy pode ser efetiva na sua desinfecção.
- Existem inconvenientes em relações aos custos e à opinião pública, mas à medida que o recurso água se tornar mais escasso o uso de radiações no saneamento aumentará as chances de ser concretizado.

7 RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento desta pesquisa encontrou algumas dificuldades para a sua concretização. Com base nas limitações deste estudo, a seguir estão listadas algumas sugestões para pesquisas futuras.

- Estudo da dose ótima de inativação de ovos de *A. lumbricoides*, situada entre as dose de radiação 2,5 kGy e 5,0 kGy.
- Determinação dos constituintes químicos do efluente, como a matéria orgânica específica (carboidratos, lipídeos e proteínas), nutriente (nitrogênio e fósforo), vitaminas, entre outros, bem como o pH e o OD, a fim de se verificar os efeitos radioprotetores e a influência da irradiação gama em organismos existentes no esgoto.
- Determinação do efeito da irradiação gama na biodegradabilidade do esgoto e dos resíduos da estação de tratamento de esgoto, como o lodo e a espuma.
- Estudo sobre o efeito da irradiação de esgoto bruto antes de passar em uma unidade de tratamento.
- Estudo específico sobre o licenciamento ambiental da implantação de um módulo de irradiação em uma estação de tratamento de esgoto.
- Estudo detalhado sobre a viabilidade econômica do processo.
- Estudo do efeito da irradiação de esgoto na genética de população dos microrganismos e suas possíveis influências no ambiente.



8 REFERÊNCIAS

- ACHER, A.; FISCHER, E.; TURNHEIM, R.; MANOR, Y. Ecologically friendly wastewater disinfection techniques. *Water Research*, v. 31, n. 6, p. 1398-1404, 1997.
- AL-ADAWI, M. A.; ALBARODI, H.; HAMMOUDEH, A.; SHAMMA, M.; SHARABI, N. Accelerated larvae development of *Ascaris lumbricoides* eggs with ultraviolet radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 75, p. 115–119, 2006.
- ANDREOLI, C. V.; CHERUBINI, C.; FERREIRA, A. C. Inviabilização de Ovos de helmintos em Lodo de Esgoto Anaeróbio através da Solarização. In: VI SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ESPECIAIS, Gramado. 2002,
- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. Washington: 1998. 1268 p.
- BAIRD, C. *Environmental Chemistry*. 2 ed. New York: Freeman and Company, 2001.
- BASFAR, A. A.; ABDEL REHIM, F. Disinfection of wastewater from a Riyadh Wastewater Treatment Plant with ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 65, p. 527-532, 2002.
- BASTOS, R. K. X.; ANDRADE NETO, C. O.; CORAUCCI FILHO, B.; MARQUES, M. O. Introdução. In: BASTOS, R. K. X., *Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e piscicultura*. PROSAB 3, Rio de Janeiro, p. 1-22, 2003a.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; KELLER, R. Organismos patogênicos e efeitos sobre a saúde humana. In: GONÇALVES, R. F. (Coordenador); *Desinfecção de efluentes sanitários*. PROSAB 3 Rio de Janeiro, 2003b, p. 27-88.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; NASCIMENTO, L. E.; CARVALHO, G. R. M.; SILVA, C. V. Coliformes como Indicadores da Qualidade da Água: Alcance e Limitações. In: 27º CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000.
- BLATCHLEY, E. R.; HUNT, B. A.; DUGGIRALA, R.; THOMPSON, J. E.; ZHAO, J.; HALABY, T.; COWGER, R. L.; STRAUB, C. M.; ALLEMAN, J. E. Effects of disinfectants on wastewater effluent toxicity. *Water Research*, v. 31, n. 7, p. 1581-1588, 1997.
- BORRELY, S. I. *Tratamento de esgoto sanitário com o uso de aceleradores de elétrons*. 95 f. (Mestrado em Ciências e Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1995.
- BORRELY, S. I.; CRUZ, A. C.; DEL MASTRO, N. L.; SAMPA, M. H. O.; SOMESSARI, E. S. Radiation processing of sewage and sludge. A review. *Progress in Nuclear Energy*, v. 33, n. 1/2, p. 3-21, 1998.
- BORRELY, S. I.; GONÇALVES, A. A.; OIKAWA, H.; DUARTE, C. L.; ROCHA, F. R. Electron beam accelerator for detoxification of effluents. When radiation processing can enhance the acute toxicity? *Radiation Physics and Chemistry*, v. 71, p. 453–456, 2004.
- CAPIZZI, S.; CHEVALLIER, A.; SCHWARTZBROD, J. Destruction of *Ascaris ova* by accelerated electron. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 56, p. 591-595, 1999.
- CAPIZZI, S.; SCHWARTZBROD, J. Irradiation of *Ascaris ova* in sludge using an electron beam accelerator. *Water Research*, v. 35, n. 9, p. 2256-2260, 2001.
- CARDOSO, L.; DE LUCA, S. J. Toxidez de efluentes municipais biologicamente tratados e desinfetados com hipoclorito e ferrato de sódio. *Eng. sanit. ambient*, v. 9, n. 1, p. 26-29, 2004.

- CASARETT, A. P. Radiation Effects on Microorganisms and Independent Cell Systems. *Rad. Biol.*, 1968.
- CERQUEIRA, D. A.; HORTA, M. C. S. Coliformes fecais não existem. In: 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Rio de Janeiro. 1999, p.1238-1244.
- CHERNICHARO, C. A. L.; DANIEL, L. A.; SENS, M.; CORAUCCI FILHO, B. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de desinsecção. In: CHERNICHARO, C. A. L.; *Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios*. PROSAB 2 Belo Horizonte, p. 377-454, 2001.
- CHERNICHARO, C. A.; FLORENCIO, L. MONTEGGIA, L. O., VON SPERLING, M.; BASTOS, R. K. X.; PIVELI, R. P.; Tratamento de esgotos e produção de efluentes adequados a diversas modalidades de reúso da água. In: FLORENCIO, L.; BASTOS, R. K. X.; AISSE, M. *Reúso das águas de esgoto sanitário, inclusive desenvolvimento de tecnologias de tratamento para este fim*. PROSAB 4 Belo Horizonte, 2006.
- CORAUCCI FILHO, B.; ANDRADE NETO, C. O.; KATO, M. T.; CARTAXO, M. F. S.; FIGUEIREDO, R. F.; STEFANUTTI, R.; SILVA, V. P. Disposição no solo. In: GONÇALVES, R. F. (Coordenador); *Desinfecção de efluentes sanitários*. PROSAB 3 Rio de Janeiro, 337-387, 2003.
- CREBELLI, R.; CONTI, L.; MONARCA, S.; FERETTI, D.; ZERBINI, I.; ZANI, C.; VESCHETTI, E.; CUTILLI, D.; OTTAVIANI, M. Genotoxicity of the disinfection by-products resulting from peracetic acid- or hypochlorite-disinfected sewage wastewater. *Water Research*, v. 39, n. 6, p. 1105-1113, 2005.
- DANIEL, L. A.; CAMPOS, J. R. Fundamentos a aspectos de projetos de sistemas de desinfecção de esgoto sanitário com radiação ultravioleta. *Revista DAE-Sabesp*, v. 163 n. 7, p. 5-11, 1992.
- DE LUCA, S. J.; DE DEUS, A. B.; DE LUCA, M. A. Desinfecção de efluentes tratados com ferrato (VI). *Engenharia sanitária e ambiental*, v. 7, n. 3, p. 103-108, 2002.
- DE LUCA, S. J.; MONTEGGIA, L. O. Outros processos de desinfecção. In: GONÇALVES, R. F. (Coordenador); *Desinfecção de efluentes sanitários*. PROSAB 3 Rio de Janeiro, p. 389-408, 2003.
- EPA. Disinfectant use in water treatment. In: *Alternative disinfectants and oxidants guidance manual*. United States, 346, 1999.
- EPN. *Desinfeccion de las aguas servidas del Rio Machangara por irradiation con acelerador de eletrones*.ed. Quito - Ecuador: 1997. 156p.
- FAIRBAIRN, D. The *in vitro* hatching of *Ascaris lumbricoides* eggs *Can. J. Zool.*, v. 39 p.113-62, 1961
- FAROOQ, S.; KURUCZ, C. N.; WAITE, T. D.; COOPER, W. J. Disinfection of Wastewaters: High-Energy Electron vs Gamma Irradiation. *Water Research*, v. 27, n. 7, p.1177-1184, 1993.
- FERREIRA, I. V. L.; DANIEL, L. A. Fotocatálise heterogênea com óxido de titânio aplicada ao tratamento de esgoto sanitário secundário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 9, n. 4, p.335-342, 2004.
- GASPARD, P. *Contamination parasitaire dans l'environnement: Prospective pour une gestion des risques sanitaires*. - University Henri Poincaré, Nancy, 1995.
- GEHRA, R.; WAGNERA, M.; VEERASUBRAMANIANA, P.; PAYMENT, P. Disinfection

- efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater. *Water Research*, v.37, p.4573–4586, 2003.
- GETOFF, N. Radiation induzindo degradação de poluentes da água - Estado da Arte. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 47, n. 4, p. 581-593, 1996.
- GODINHO, V. M. *Estudo sobre a ocorrência de ovos de helmintos e viabilidade de Ascaris sp. em lodos anaeróbios in natura e submetidos à higienização por caleação e por tratamento térmico*. (Mestrado em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- GONÇALVES, R. F.; FILHO, B. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; LAPOLLI, F. R.; AISSE, M. M.; PIVELI, R. P. Desinfecção por radiação ultravioleta. In: GONÇALVES, R. F. *Desinfecção de efluentes sanitários*. ABES Rio de Janeiro, PROSAB 3, p.209-276, 2003a.
- GONÇALVES, R. F.; JORDÃO, E. P.; SOBRINHO, P. A. Introdução. In: GONÇALVES, R. F. (Coordenador); *Desinfecção de efluentes sanitários*. PROSAB 3 Rio de Janeiro, p. 1-26, 2003b.
- GRAIÑO, J. G. *Use of irradiation for chemical and microbial decontamination of water, wastewater and sludge*. Vienna. p.163-177, 2001.
- GRIFFO, C. L. S.; PEREIRA, M. B.; MOTTA, J. S. Avaliação da eficiência de diferentes indicadores microbiológicos de balneabilidade em amostras da praia de Camburí, Vitória-ES. In: V SEMINÁRIO ESTADUAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, Vitória-ES. 2003,
- HOLT, J. G. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*.1 ed. BALTIMORE: WILLIAMS & WILKINS, 1984.
- HORAK, P. Experimental destruction of ascarid ova in sewage sludge by accelerated electron irradiation. *Water Research*, v. 28, n. 4, p. 939–941, 1994.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Training Manual on Food Irradiation Technology and Techniques*. Technical Reports series n. 114. 1982.
- JYOTI, K. K.; PANDIT, A. B. Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochem. Eng. Journal*, v. 18, n. 1, p. 9-19, 2004.
- CNEN-NE-6.02 *Licenciamento de Instalações Radiativas*, Comissão nacional de Energia Nuclear, 1998
- KOIVUNEN, J.; HEINONEN-TANSKI, H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters. *Water Research*, v. 39, p. 4445–4453, 2005.
- KONEMAN, E. W. *Diagnóstico microbiológico. Texto e Atlas*.5ª edRio de Janeiro: MEDSI, 2001. 1465pp.
- KURUCZ, C. N.; WAITE, T. D.; COOPER, W. J. The Miami electron beam research facility: A large scale wastewater treatment application. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 45, n. 2, p. 299-308, 1995.
- LAPOLLI, F. R.; HASSEMER, M.E.N.; CAMARGO, J. G.; DAMÁSIO, D. L.; LOBO-RECIO, M. A. Desinfecção de efluentes sanitários através de dióxido de cloro. *Eng. sanit. ambient*, v. 10, n. 3, p. 200-208, 2005.
- LAPOLLI, F. R.; SANTOS, L. F.; HASSEMER, M. E. N.; AISSE, M. M.; PIVELI, R. P. Desinfecção por radiação ozonização. In: GONÇALVES, R. F. (Coordenador); *Desinfecção de efluentes sanitários*. PROSAB 3 Rio de Janeiro, 169-208, 2003.

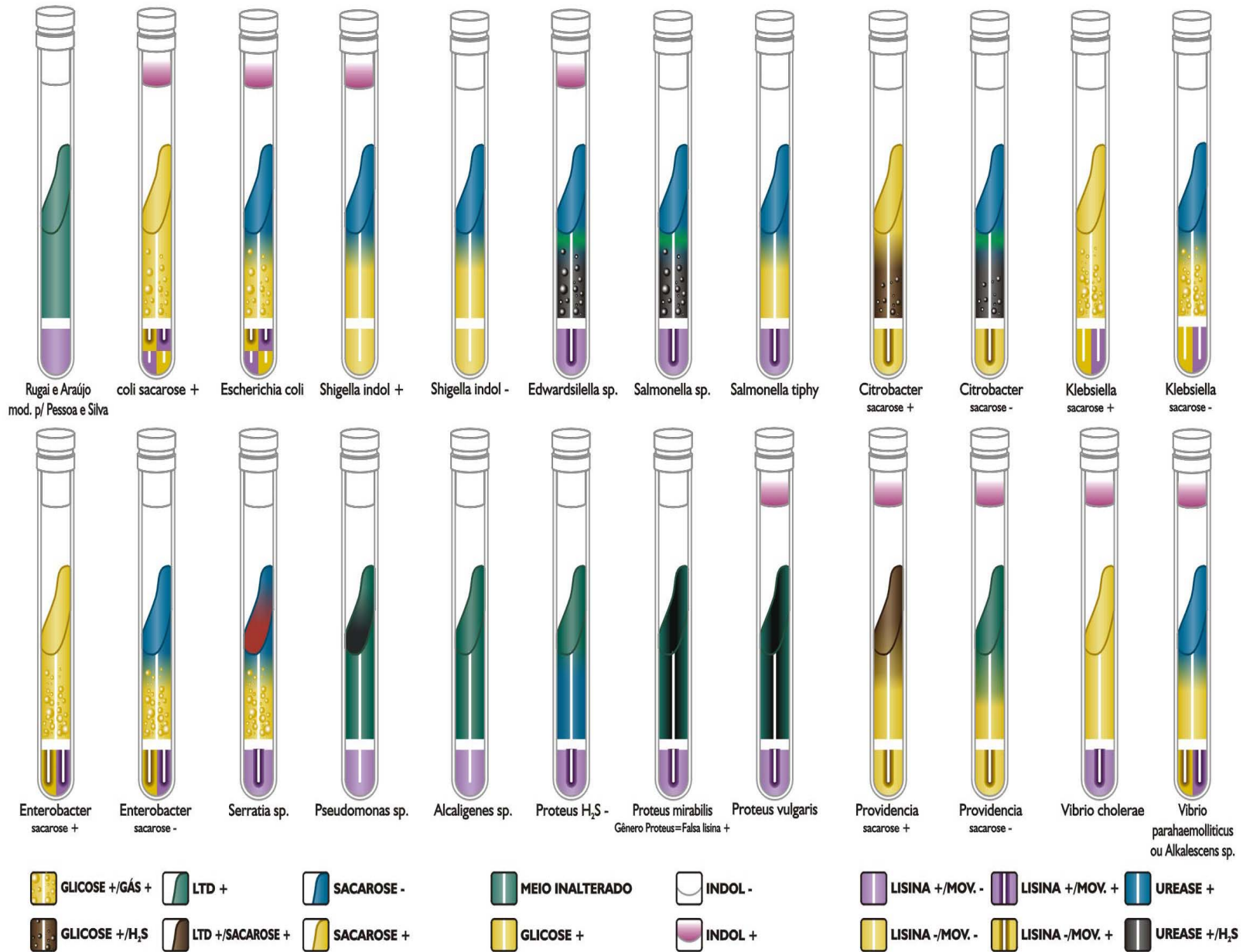
- LECLERC, H.; MOSSEL, D. A. A.; EDBERG, S. C.; STRUIJK, C. B. Advances in the bacteriology of the coliform group: their suitability as markers of microbial water safety. *Annual. Rev. microbiol.*, v. 55, p. 201-234, 2001.
- LESSEL, T.; SUESS, A. Ten year experience in operation of a sewage sludge treatment plant using gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 24, n. 1, p. 3-16, 1984.
- MASCARENHAS, L. C. A.; VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. Avaliação do desempenho de lagoas de polimento rasas, em série, para o pós-tratamento de efluentes de reator UASB. *Eng. Sanit. e Ambient.*, v. 9, n. 1, p. 45-54, 2004.
- METTLER, F. A.; UPTON, A. C. *Medical effects of ionizing radiation*. 2 ed. Philadelphia: 1995. 430p.
- MORAES, M. C. F.; ROMANELLI, M. F.; SENA, H. C.; SILVA, G. P.; SAMPA, M. H. O.; BORRELY, S. I. Whole acute toxicity removal from industrial and domestic effluents treated by electron beam radiation: emphasis on anionic surfactants. *Radiation Physics and Chemistry*, v.71, p.461–463, 2004.
- NEVES, D. P. *Parasitologia Humana*. 10 ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 2004.
- NEVES, D. P. *Ascaris lumbricoides*. In: *Parasitologia Humana*. Atheneu São Paulo, 229-230, 2004.
- NOUAILHETAS, Y. *Radiações ionizantes e a vida*. 5ª. 14/06. 2003.
- O'SHEA, K. E.; KYUNG KIM, D. Advanced oxidation technologies radical processes for water treatment. In: *Status of industrial scale radiation treatment of wastewater and its future*. IAEA Vienna, 2004.
- PAIXÃO, K. V.; DELFORGE, J. L.; BRANDÃO, C. C. S. Avaliação de um equipamento de geração de misturas oxidantes na inativação de patógenos, utilizando, com indicadores, coliformes e colifagos. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Porto Alegre. 2000.
- PEREIRA, M. T. *Estudo da síntese de 2-amino-ciclo-hexanotióis N-substituídos, potencialmente radioprotetores*. 134 f. (Mestrado em Química) - UFMG, Belo Horizonte, 1997.
- PESSOA, G. V. A.; SILVA, E. A. M. Meios de Rugai e lisina motilidade combinados em um só tubo para identificação presuntiva de enterobactérias. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, v. 32, p. 97-100, 1972.
- POLEZI, M. *Aplicação de processo oxidativo avançado no efluente de uma ETE para fins de reúso*. (Departamento de Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- RAWAT, K. P.; SHAMMA, A.; RAO, S. M. Microbiological and Physicochemical analysis of radiation disinfected municipal sewage. *Water Research*, v. 32, n. 3, p. 737-740, 1997.
- ROMPRE', A.;SERVAIS, P.;BAUDART, J.;ROUBIN, M. R.;LAURENT, P. Detection and enumeration of coliforms in drinking water: current methods and emerging approaches. *Journal of Microbiological Methods*, v. 49, p. 31-54, 2002.
- RUGAI, E.; ARAÚJO, A. Meio de Cultura para identificação Presuntiva de Bacilos Intestinais gram-negativos. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, v. 28, p. 79-83, 1968.
- SAMPA, M. H. O.; BORRELY, S. I.; SILVA, B. I.;VIEIRA, J. M.;RELA, P. R.;CALVO, W. A. P.; NIETO, R. C.; DUARTE, C. L.; PEREZ, H. E. B.; SOMESSARI, E. S.;LUGÃO, A. B. The use of eletron beam accelerator for the treatment of driking water and wastewater in

- Brazil. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 46, n. 4-6, p. 1143-1146, 1995.
- SHAH, M. R.; LAVALE, D. S.; RAWAT, K. P.; BENNY, P. G.; SHARMA, A. K.; DEY, G. R.; BHAVE, V. *Radiation hygienization of raw sewage sludge*. India. p. 147-161, 2001.
- SHAMMA, M.; AL-ADAWI, M. A. The morfological changes of *Ascaris lumbricoides* ova in sewage sludge water treated by gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 65, p. 277-279, 2002.
- SILVA, J. C. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; ZERBINI, A. M.; GODINHO, V. M.; LAUFFER, J. *Coletânea de Trabalhos Técnicos*.ed. PROSAB, 2001. 229-240p.
- SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R.; ATHAÍDE JÚNIOR, G. B. Remoção de *Ascaris lumbricoides* e *Tricuris trichiura* em lagoas de estabilização. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Porto Alegre-RS. ABES, 2000, p. 1-7.
- SIVINSKI, H. D. Treatment of sewage sludge with combinations of heat and ionizing radiation (thermoradiation). In: Radiation for a Clean Environment, PROCEEDING OF SYMPOSIUM. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY, Vienna. 1975, p.151-167.
- SOMMER, R.; PRIBIL, S. A.; GEHRINGER, P.; ESCHWEILER, H.; LETH, H.; CABAJ, A.; HAIDER, T. Inactivation of bacteriophages in water by means of non-ionizing (UV-253.7 nm) and ionizing (gamma) radiation: a comparative approach. *Water Research*, v. 35, n. 13, p. 3109-3116, 2001.
- SOUZA, J. B.; DANIEL, L. A. Comparação entre hipoclorito de sódio e ácido peracético na inativação de *E. coli*, colifagos, e *C.perfringes* em água com elevada concentração de matéria orgânica. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 10, n. 2, p. 111-117, 2005.
- TAGHIPOUR, F. Ultraviolet and ionizing radiation for microorganism inactivation. *Water Research*, v.38, p.3940–3948, 2004.
- TAUHATA, L.; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, D. P. *Radioproteção e dosimetria: fundamentos*.5ª ed. Rio de Janeiro: CNEN, 2003.
- THOMPSON, J. E.; BLATCHLEY, E. R. Toxicity effects of gamma-irradiated wastewater effluents. *Water Research*, v. 33, n.9, p. 2053-2058, 1999.
- TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. *Microbiologia*.8 ed. São Paulo: Artmed, 2005. 827p.
- TUJI, F. M. *Avaliação do efeito radioprotetor do selenito de sódio em glândulas parótidas de ratos*. - Universidade Estadual de Campinas, Piracicaba, 2004.
- USEPA – U. S. Environmental Protection Agency. Design manual: municipal wastewater disinfection. Cincinnati: Office of Research and Development, Water Engineering, Research Laboratory, Center for Environmental Research Information, 1986. p.247 (EPA/625/1-86/021).
- VESCHETTI, E.; CUTILLI, D.; BONADONNA, L.; BRIANCESCO, R.; MARTINI, C.; CECCHINI, G.; ANASTASI, P.; OTTAVIANI, M. Pilot-plant comparative study of peracetic acid and sodium hypochlorite wastewater disinfection. *Water Research*, v. 37, p. 78-94, 2003.
- VON SPERLING, M. Remoção de organismos patogênicos. In: *Lagoas de estabilização ambiental*, D. d. E. s. e. Belo Horizonte, 105-140, 1996.
- VON SPERLING, M. Coliformes e pH – médias aritméticas, médias geométricas e medianas. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coordenador); *Pós tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Aspectos Metodológicos*. PROSAB 2 Belo Horizonte, 2001. 107p.

- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte. p.452, 2005.
- WHO. *Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*. Geneva. p. 1-76, 1989.
- WHO. *Enterohaemorrhagic Escherichia coli (EHEC)*. p. 1-3, 2000.
- WWD; *Water related diseases. Ascariases*. http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases . p. 1-2, 2001.
- XU, P.;JANEX, M.;SAVOYE, P.;COCKX, A.;LAZAROVA, V. Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design. *Water Research* , v. 36, p. 1043–1055, 2002.
- YEAGER, J. G.;O' BRIEN, R. T. Irradiation as a means to minimize public health risks from sludge-borne pathogens. *Journal Water Pollution Control Federal*, v. 55, n. 7, p. 934 - 941, 1983.
- ZAVALETTA, O. Chlorine Dioxide Risk Assessment for Drinking Water. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM - CHLORINE DIOXIDE: DRINKING WATER ISSUES, Houston (USA). 1992.
- ZERBINI, A. M.;CHERNICHARO, C. A. L. Metodologias para quantificação, identificação e análise de viabilidade de ovos de helmintos em esgotos brutos e tratados. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coordenador); *Pós tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Aspectos Metodológicos*. PROSAB 2 Belo Horizonte, 2001. 107p.

APÊNDICE A

**Tabela de identificação de Enterobacteriáceae por meio Rugai
modificado por Pessoa**



APÊNDICE B

Dados microbiológicos em esgoto bruto e tratado em reator UASB

- Coliformes totais
- Coliformes termotolerantes
- Bactérias heterotróficas

Dados de microrganismos em esgoto bruto e esgoto tratado

Dose (kGy)	Ensaio	Esgoto Bruto				Esgoto Tratado			
		Data	Ctot	Cter	BH	Data	Ctot	Cter	BH
0,0	1	13/9/2005	4,E+07	2,E+07	4,E+06	13/12/2005	2,E+07	2,E+07	4,E+06
	2	30/9/2005	1,E+08	8,E+07	1,E+07	3/1/2006	1,E+07	1,E+07	1,E+07
	3	5/10/2005	2,E+07	2,E+07	1,E+07	18/1/2006	8,E+06	5,E+06	5,E+06
	4	11/10/2005	5,E+07	3,E+07	1,E+07	24/1/2006	1,E+07	2,E+06	2,E+06
	5	6/2/2006	8,E+06	4,E+06	4,E+06	6/2/2006	9,E+06	9,E+06	1,E+06
	6	14/2/2006	5,E+07	9,E+06	2,E+07	14/2/2006	4,E+06	2,E+06	5,E+05
0,4	1	13/9/2005	1,E+06	8,E+05	X	13/12/2005	1,E+06	1,E+06	8,E+05
	2	30/9/2005	5,E+06	3,E+06	9,E+05	3/1/2006	3,E+06	3,E+06	1,E+06
	3	5/10/2005	2,E+06	2,E+06	9,E+05	18/1/2006	2,E+04	2,E+04	9,E+04
	4	11/10/2005	3,E+06	3,E+06	4,E+05				
0,8	1	13/9/2005	5,E+05	3,E+05	5,E+05	13/12/2005	1,E+05	1,E+05	1,E+05
	2	30/9/2005	3,E+06	2,E+06	4,E+05	3/1/2006	3,E+05	2,E+05	1,E+05
	3	5/10/2005	2,E+05	2,E+05	2,E+05	18/1/2006	2,E+03	2,E+03	2,E+04
	4	11/10/2005	8,E+04	8,E+04	2,E+05				
1,2	1	13/9/2005	5,E+03	3,E+03	8,E+04	13/12/2005	3,E+02	3,E+02	1,E+04
	2	30/9/2005	2,E+04	2,E+04	5,E+04	3/1/2006	2,E+03	2,E+03	2,E+04
	3	5/10/2005	2,E+05	2,E+05	2,E+05	18/1/2006	7,E+02	3,E+02	7,E+03
	4	11/10/2005	1,E+05	1,E+05	2,E+05				
2,5	1	13/9/2005	8,E+01	2,E+01	1,E+04	13/12/2005	2,E+00	2,E+00	4,E+03
	2	30/9/2005	3,E+03	3,E+03	3,E+04	3/1/2006	2,E+01	2,E+01	3,E+03
	3	5/10/2005	3,E+03	3,E+03	6,E+04	18/1/2006	2,E+01	0,E+00	4,E+03
	4	11/10/2005	2,E+04	2,E+04	6,E+04	24/1/2006	2,E+01	0,E+00	1,E+03
	5	24/1/2006	1,E+02	8,E+01	6,E+03	6/2/2006	9,E+01	9,E+01	4,E+03
	6	6/2/2006	2,E+03	8,E+02	2,E+04	14/2/2006	9,E+01	9,E+01	4,E+03
	7	14/2/2006	2,E+03	2,E+03	2,E+04				
3,0	1	24/1/2006	2,E+01	0,E+00	6,E+03	24/1/2006	2,E+00	2,E+00	5,E+02
	2	6/2/2006	4,E+01	4,E+01	3,E+03	6/2/2006	2,E+00	2,E+00	3,E+03
	3	14/2/2006	2,E+00	2,E+00	5,E+03	14/2/2006	2,E+00	2,E+00	1,E+03

Ctot = NMP/100 mL de coliformes totais; Cter = NMP/100 mL de coliformes termotolerantes; BH = UFC de bactérias heterotróficas/mL

APÊNDICE C

Dados parasitológicos em esgoto bruto e tratado em reator UASB

Dados parasitológicos em esgoto bruto e esgoto tratado

Dose (kGy)	Data	Ensaio	triplicata	Esgoto Bruto			Esgoto Tratado		
				Nº ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis	% viabilidade	Nº de ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis /L	% viabilidade
0,5	8/3/2005	1	1	930,0	110,0	0,89	237,6	1359,6	0,15
	8/3/2005	1	2	590,0	130,0	0,82	277,2	1438,8	0,16
	8/3/2005	1	3	610,0	120,0	0,84	224,4	1663,2	0,12
	8/3/2005	1	1	585,2	292,6	0,67	154,7	809,9	0,16
	8/3/2005	1	2	693,0	277,2	0,71	91,0	1292,2	0,07
	8/3/2005	1	3	954,8	215,6	0,82	127,4	1465,1	0,08
1,0	9/3/2005	1	1	75,0	487,5	0,13	111,6	1748,4	0,06
	9/3/2005	1	2	62,5	350,0	0,15	62,0	2207,2	0,03
	9/3/2005	1	3	62,5	612,5	0,09	111,6	1897,2	0,06
	9/3/2005	1	1	91,0	418,6	0,18	47,1	1758,4	0,03
	9/3/2005	1	2	72,8	291,2	0,20	78,5	2025,3	0,04
	9/3/2005	1	3	54,6	327,6	0,14	78,5	2386,4	0,03
1,5	18/3/2005	1	1	90,4	2700,7	0,03	8,9	663,2	0,0059192
	18/3/2005	1	2	113,0	3073,6	0,04	101,0	2525,0	0,04
	18/3/2005	1	3	101,7	3017,1	0,03	60,6	2706,8	0,02
	18/3/2005	1	1	101,7	2930,5	0,03	97,6	2545,2	0,04
	18/3/2005	1	2	48,6	1660,5	0,03	86,0	2184,4	0,04
	18/3/2005	1	3	121,5	2041,2	0,06	43,0	2132,8	0,02
2,5	10/3/2005	1	1	25,2	1142,4	0,02	7,9195959	433,59788	0,0066378
	10/3/2005	1	2	8,4	1268,4	0,01	7,9	1469,4	0,01
	10/3/2005	1	3	0,0	1965,6	0,00	0	1927,6	0,00
	10/3/2005	1	1	11,2	1458,8	0,01	5	1667	0,00
	10/3/2005	1	2	0,0	2441,6	0,00	0	2299,5	0,00
	10/3/2005	1	3	0,0	1747,2	0,00	0	2320,5	0,00
5,0	10/3/2005	1	1	0	3398,4	0,00	0	984,45763	0
	10/3/2005	1	2	0	4495,8	0,00	0	5242,8	0,00
	10/3/2005	1	3	0	3894	0,00	0	4508,4	0,00
	10/3/2005	1	1	0	3929	0,00	0	5018	0,00
	10/3/2005	1	2	0	2093	0,00	0	4752	0,00
	10/3/2005	1	3	0	2652	0,00	0	4699,2	0,00

Dados parasitológicos em esgoto bruto e esgoto tratado (Continuação)

Dose (kGy)	Data	Ensaio	triplicata	Esgoto Bruto			Esgoto Tratado		
				Nº ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis	% viabilidade	Nº de ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis /L	% viabilidade
0,5	08/06/2005	2	1	1627,2	271,2	0,86	1779,2	640	0,74
	08/06/2006	2	2	2079,2	361,6	0,85	2329,6	665,6	0,78
	08/06/2007	2	3	2350,4	406,8	0,85	1971,2	819,2	0,71
	08/06/2005	2	1	1911	147	0,93	2570	672	0,79
	08/06/2006	2	2	2646	245	0,92	2554	873,6	0,75
	08/06/2007	2	3	2695	343	0,89	2335	672	0,78
1,0	10/06/2005	2	1	921,6	1190,4	0,44	580	928	0,38
	10/06/2006	2	2	1011,2	1267,2	0,44	522	971,5	0,35
	10/06/2007	2	3	960	1126,4	0,46	638	841	0,43
	10/06/2005	2	1	560	896	0,38	606	1040,3	0,37
	10/06/2006	2	2	504	938	0,35	828,2	1292,8	0,39
	10/06/2007	2	3	616	812	0,43	585,8	969,6	0,38
1,5	15/06/2005	2	1	364,8	1086,8	0,25	172	1152,4	0,13
	15/06/2006	2	2	258,4	904,4	0,22	430	1307,2	0,25
	15/06/2007	2	3	258,4	1109,6	0,19	344	1272,8	0,21
	15/06/2005	2	1	255,2	1229,6	0,17	351	1152	0,23
	15/06/2006	2	2	429,2	1322,4	0,25	297	1125	0,21
	15/06/2007	2	3	220,4	1206,4	0,15	261	1053	0,20
2,5	16/06/2005	2	1	0	1285,2	0,00	15,3	1315,8	0,01
	16/06/2006	2	2	35,7	1106,7	0,03	0	1315,8	0,00
	16/06/2007	2	3	0	1428	0,00	15,3	1132,2	0,01
	16/06/2005	2	1	11,3	1130	0,01	37,4	1365,1	0,03
	16/06/2006	2	2	22,6	1310,8	0,02	18,7	1402,5	0,01
	16/06/2007	2	3	0	1514,2	0,00	56,1	1589,5	0,03
5,0	22/06/2005	2	1	0	1707,2	0,00	0	1030,2	0,00
	22/06/2006	2	2	0	1566,4	0,00	0	1343,3	0,00
	22/06/2007	2	3	0	1513,6	0,00	0	1686,7	0,00
	22/06/2005	2	1	0	1148,4	0,00	0	1121	0,00
	22/06/2006	2	2	0	1473,2	0,00	0	1345,2	0,00
	22/06/2007	2	3	0	1171,6	0,00	0	2029,6	0,00

Dados parasitológicos em esgoto bruto e esgoto tratado (Continuação)

Dose (kGy)	Data	Ensaio	triplicata	Esgoto Bruto			Esgoto Tratado		
				Nº ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis	% viabilidade	Nº de ovos viáveis/L	Nº de ovos não viáveis /L	% viabilidade
0,5	4/11/2005	3	1	274	34	0,8889	598	174	0,7750
	4/11/2005	3	2	228	46	0,8333	598	77	0,8857
	4/11/2005	3	3	205	23	0,9000	579	154	0,7895
	4/11/2005	3	1	486	54	0,9000	358	15	0,9600
	4/11/2005	3	2	243	41	0,8571	581	387	0,6000
	4/11/2005	3	3	216	81	0,7273	387	89	0,8125
1,0	4/11/2005	3	1	275	168	0,6207	444	352	0,5577
	4/11/2005	3	2	352	107	0,7667	612	352	0,6349
	4/11/2005	3	3	275	153	0,6429	719	490	0,5949
	4/11/2005	3	1	448	339	0,5692	616	449	0,5785
	4/11/2005	3	2	581	290	0,6667	713	546	0,5664
	4/11/2005	3	3	436	327	0,5714	986	669	0,5957
1,5	8/11/2005	3	1	150	470	0,2424	255	1292	0,1648
	8/11/2005	3	2	94	461	0,1695	102	1275	0,0741
	8/11/2005	3	3	179	395	0,3115	255	1020	0,2000
	8/11/2005	3	1	158	483	0,2459	127	477	0,2105
	8/11/2005	3	2	116	798	0,1264	85	774	0,0988
	8/11/2005	3	3	168	693	0,1951	74	774	0,0875
2,5	8/11/2005	3	1	31	847	0,0351	42	832	0,0484
	8/11/2005	3	2	15	847	0,0179	42	747	0,0536
	8/11/2005	3	3	15	770	0,0196	28	705	0,0385
	8/11/2005	3	1	10	768	0,0130	9	602	0,0154
	8/11/2005	3	2	20	929	0,0213	0	780	0,0000
	8/11/2005	3	3	10	899	0,0111	9	790	0,0118
5,0	11/11/2005	3	1	0	869	0,0000	0	416	0,0000
	11/11/2005	3	2	0	916	0,0000	0	364	0,0000
	11/11/2005	3	3	0	743	0,0000	0	533	0,0000
	11/11/2005	3	1	0	672	0,0000	0	657	0,0000
	11/11/2005	3	2	0	952	0,0000	0	682	0,0000
	11/11/2005	3	3	0	770	0,0000	0	632	0,0000

APÊNDICE D

Dados sobre a ação residual da irradiação gama em esgoto bruto e tratado em reator UASB

Dados sobre ação residual da irradiação gama em esgoto bruto e esgoto tratado

Dose (kGy)	Ensaio	Data	Esgoto Bruto				Esgoto Tratado			
			Ctot 1º dia	Ctot 7º dia	Cter 1º dia	Cter 7º dia	Ctot 1º dia	Ctot 7º dia	Cter 1º dia	Cter 7º dia
0,0	1	24/1/2006	x	2,40E+05	x	2,40E+05	1,30E+06	3,60E+04	2,20E+05	3,60E+04
	2	6/2/2006	7,50E+06	4,60E+04	3,80E+05	4,60E+04	9,30E+06	1,10E+05	9,30E+06	1,10E+05
	3	14/2/2006	4,60E+07	4,60E+05	9,30E+06	2,40E+05	4,30E+06	9,30E+04	2,30E+06	4,30E+04
2,5	1	24/1/2006	1,30E+02	4,60E+03	8,00E+01	4,60E+03	2,00E+01	4,30E+02	0,00E+00	4,30E+02
	2	6/2/2006	1,50E+03	1,10E+04	7,50E+02	1,10E+04	9,20E+01	1,10E+04	9,20E+01	1,10E+04
	3	14/2/2006	2,40E+03	1,10E+04	2,40E+03	4,60E+03	9,20E+01	2,10E+03	9,20E+01	2,10E+03
3,0	1	24/1/2006	2,00E+01	2,40E+03	2,00E+00	2,40E+03	2,00E+00	2,00E+00	2,00E+00	2,00E+00
	2	6/2/2006	3,60E+01	2,00E+00	3,06E+01	2,00E+00	2,00E+00	4,30E+02	2,00E+00	4,30E+02
	3	14/2/2006	2,00E+00	2,30E+02	2,00E+00	9,20E+01	2,00E+00	2,00E+00	2,00E+00	2,00E+00