



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JOÃO VICTOR BARROS DA SILVA

GARANTIA DE QUALIDADE DE EFLUENTE DE LAGOA DE
ESTABILIZAÇÃO – AVALIAÇÃO COM SIMULAÇÃO MONTE CARLO
E NÚMERO FUZZY TRIANGULAR

FORTALEZA

2016

JOÃO VICTOR BARROS DA SILVA

**GARANTIA DE QUALIDADE DE EFLUENTE DE LAGOA DE
ESTABILIZAÇÃO – AVALIAÇÃO COM SIMULAÇÃO MONTE CARLO
E NÚMERO FUZZY TRIANGULAR**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental do Departamento de Engenharia
Hidráulica e Ambiental da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.**

**Orientador: Prof. Dr. Fernando José
Araújo da Silva.**

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S58g

Silva, João Victor Barros da.

Garantia de qualidade de efluente de lagoa de estabilização : avaliação com simulação Monte Carlo e número Fuzzy triangular / João Victor Barros da Silva. – 2016.
31 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva.

1. Simulação Monte Carlo. 2. Número Fuzzy Triangular. 3. Garantia de qualidade de efluente. I. Título.
CDD 628

JOÃO VICTOR BARROS DA SILVA

**GARANTIA DE QUALIDADE DE EFLUENTE DE LAGOA DE
ESTABILIZAÇÃO – AVALIAÇÃO COM SIMULAÇÃO MONTE CARLO
E NÚMERO FUZZY TRIANGULAR**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental do Departamento de Engenharia
Hidráulica e Ambiental da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.**

Aprovado em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Drª. Marisete Dantas de Aquino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família.

À Clarisse.

Aos meus colegas de curso. Em especial à Gabriela e à Edilene.

Ao professor Fernando.

RESUMO

O monitoramento do desempenho de estações de tratamento de esgotos (ETE) é fundamental para a garantia da qualidade ambiental dos corpos hídricos e a manutenção da saúde humana. O lançamento dos efluentes em corpos hídricos deve obedecer aos limites estipulados pelas normas. Para as ETE o conceito de garantia está relacionado à porcentagem de tempo na qual as concentrações do efluente cumprem os padrões de lançamento. Este trabalho se propõe a calcular a garantia da qualidade de sistemas de tratamento de esgoto utilizando Simulação de Monte Carlo e Números Fuzzy. Foram analisados 10 sistemas de lagoas de estabilização localizados no estado do Rio Grande do Norte. A garantia dos sistemas foi calculada para os parâmetros DBO, DBO filtrada e Nitrogênio Amoniacal. Os resultados de garantia obtidos passaram por uma análise de correlação para verificar sua consistência. Também foi avaliada a correlação entre os valores de garantia obtidos e as taxas de aplicação volumétrica e superficial de cada sistema. Ao fim das análises pode-se concluir que os resultados obtidos pelas diferentes metodologias são consistentes e indicam uma baixa garantia de atendimento aos limites estipulados por norma para os parâmetros DBO e DBO filtrada além de baixa correlação dos valores de garantia obtidos para esses mesmos parâmetros e as taxas de aplicação volumétrica e superficial. Já o parâmetro Nitrogênio Amoniacal apresentou melhores valores de garantia de atendimento aos limites estipulados por norma e uma correlação moderada entre os valores de garantia e a taxa de aplicação superficial dos sistemas. No que se à avaliação das metodologias ambas foram consideradas simples sendo que a metodologia que faz uso de Números Fuzzy se mostrou mais robusta ao possibilitar a obtenção dos resultados em menor tempo e exigir menor esforço operacional.

Palavras-chave: Simulação Monte Carlo; Número Fuzzy Triângular; Garantia de ETE;

ABSTRACT

Monitoring the performance of sewage treatment plants (STP) is critical to ensuring the environmental quality of water bodies and the maintenance of human health. The release of effluents into water bodies must meet the limits set by the discharge standards. In what regards STP, the concept of guarantee is related to the percentage of time in which the effluent concentrations meet the discharge standards. This study aims to calculate the guarantee for the quality of sewage treatment systems using Monte Carlo simulation and Fuzzy Numbers. It was analyzed 10 stabilization ponds systems located in the state of Rio Grande do Norte. The guarantees of the systems were calculated for the parameters BOD, filtered BOD and Ammonia Nitrogen. The obtained results of guarantee were submitted to a correlation analysis to check its consistency. Were also evaluated the correlation between the guarantee values and the volumetric application rates and the superficial application rates of each system. At the end of the analysis it could be concluded that the results obtained by the different methodologies were consistent and indicate a low guarantee compliance with the standard limits for BOD and filtered BOD parameters as well as a low correlation of guarantee values for these parameters and volumetric and superficial application rates. Although, the Ammonia Nitrogen parameter presented better compliance with the standard limits and a moderate correlation between guarantee values and superficial application rate. Regarding the methodology evaluation, both methods were considered simple although the methodology that makes use of fuzzy numbers was considered more robust as it enables time economy and requires less operational effort.

Keywords: Monte Carlo Simulation. Fuzzy Numbers. Sewage Treatment Plants Guarantee.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Considerações iniciais	8
1.2	Motivação do Estudo	8
1.3	Objetivos	9
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	9
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	Importância do tratamento de esgotos	10
2.2	Lagoas de estabilização	10
2.3	Padrões da qualidade de efluentes	12
2.4	Controle da remoção de poluentes e garantia de qualidade	13
2.5	Simulação Monte Carlo	13
2.6	Lógica Fuzzy	15
<i>2.6.1</i>	<i>Número Fuzzy</i>	16
<i>2.6.2</i>	<i>Número Fuzzy Triangular</i>	16
3	METODOLOGIA	18
3.1	Os sistemas de lagoas de estabilização estudados	18
3.2	Enfoque	19
<i>3.2.1</i>	<i>Enfoque da Simulação Monte Carlo</i>	19
<i>3.2.2</i>	<i>Enfoque para Número Fuzzy Triangular</i>	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1	Garantias	22
4.2	Análise de Correlação	24
4.3	Avaliação das Metodologias	25
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	27
	REFERÊNCIAS	28
	APÊNDICE A	30

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A disposição inadequada de efluentes líquidos é reconhecida como a principal causa de deterioração dos corpos hídricos. No Brasil, até o ano de 2013, apenas 48,6% das residências possuíam sistema de coleta de esgotos e apenas 39% dos esgotos gerados passavam por algum tipo de tratamento (SNSA 2014). O desenvolvimento de sistemas eficientes e econômicos de coleta e tratamento de efluentes bem como o monitoramento de suas operações se faz fundamental para a manutenção da saúde e a diminuição dos impactos causados aos corpos hídricos pelas atividades humanas.

No Brasil, as lagoas de estabilização se apresentam como uma alternativa atraente para o tratamento de esgoto. Para Andrade Neto (1997) as lagoas de estabilização, são um exemplo de sistema simplificado de tratamento de esgotos cujas vantagens são: basear-se em processos naturais; não necessitar de energia elétrica; apresentar baixo custo de implantação e operação, simplicidade de construção e de operação, alta relação custo/benefício.

Oliveira (1999) afirma que apesar da inegável importância de estudos sobre o projeto e operação de ETE tão ou mais importantes para o planejamento e projeto de sistemas de tratamento de esgotos são os estudos envolvendo a avaliação do desempenho destes equipamentos. Isso deve-se ao conceito de bom desempenho que envolve o atendimento aos padrões de lançamento, que tendem a ser cada vez mais restritivos.

No que toca o monitoramento da eficiência das estações de tratamento de esgoto (ETE), a variação ao longo do tempo das características do esgoto bruto e do efluente tratado obrigam a utilização de uma abordagem estatística para a análise da eficiência da ETE e da garantia de atendimento aos padrões normativos. Entretanto, o número limitado de dados disponíveis torna essa análise difícil.

Para contornar o problema do baixo número de dados alguns métodos podem ser empregados. Dentre esses métodos destacam-se a Simulação de Monte Carlo e a Lógica Fuzzy. O primeiro baseia-se no uso de números aleatórios para simular o comportamento real do sistema em estudo. O segundo utiliza-se de números nebulosos, que são números que representam não um valor determinado, mas um intervalo de probabilidades.

1.2 Motivação do estudo

A análise da eficiência das ETE é essencial ao contínuo melhoramento dos métodos de projeto e operação e, conseqüentemente, ao aumento da garantia de atendimento aos padrões normativos. Entretanto um monitoramento frequente e detalhado apresenta custos elevados além de requerer mão de obra especializada tornando difícil a obtenção de dados sobre o comportamento das ETEs.

A simulação de Monte Carlo e a Lógica Fuzzy são técnicas amplamente utilizadas em vários ramos das ciências e da engenharia. Entretanto, poucos trabalhos abordam a utilização dessas ferramentas para a avaliação de sistemas de tratamentos de efluente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a garantia de sistemas de Lagoas de Estabilização.

1.3.2 Objetivos específicos

- Avaliar resultados de garantia sobre qualidade de efluente de lagoas de estabilização empregando Simulação Monte Carlo.
- Avaliar resultados de garantia sobre qualidade de efluente de lagoas de estabilização empregando Números Fuzzy Triangulares.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância do tratamento de esgotos

De acordo com Von Sperling (2005) o termo esgoto se refere aos despejos provenientes dos diversos usos da água, como o doméstico, comercial, industrial, agrícola e em estabelecimentos públicos e privados.

Segundo Mota (2012) doenças de veiculação hídrica têm origem, principalmente, a partir de dejetos. Por falta de sistemas adequados de esgotamento, muitas vezes os dejetos de origem humana alcançam os corpos hídricos, nele introduzindo microrganismos patogênicos. A água contaminada por esses microrganismos, ao ser utilizada para beber ou outros fins, pode resultar no acesso desses ao organismo de uma pessoa, causando-lhe doenças.

Dentre as doenças transmitidas por microrganismos patogênicos devido a ingestão de água contaminada Mota (2012) destaca:

- Amebíase
- Cólera
- Disenteria bacilar
- Enteroinfecções em geral
- Febre tifoide
- Febre paratifoide
- Hepatite infecciosa
- Giardíase
- Poliomelite

2.2 Lagoas de estabilização

As lagoas de estabilização são sistemas de tratamento biológico constituídos de grandes reservatórios de pequena profundidade (menor ou igual a 5 m), geralmente delimitados por diques de terra, paredes de alvenaria ou escavados no próprio terreno, onde águas residuárias brutas ou pré-tratadas, são estabilizadas por processos naturais que envolvem principalmente oxidação bacteriana e/ou redução fotossintética e apresentam período de detenção relativamente alto (MARA 2003).

Segundo Jordão e Pessoa (1995), há séculos, existem lagoas naturais ou artificiais, de origem accidental, que recebem despejos de animais e realizam o fenômeno de depuração de esgotos. Porém, os primeiros registros de lagoas accidentais no tratamento de esgoto foram feitos em Santa Rosa, na Califórnia, em 1924 e Fesseden, em Dakota do Norte, em 1928, ambas nos Estados Unidos.

A partir do final da II Guerra Mundial, intensificaram-se as pesquisas a fim de conhecer, explicar e controlar o processo das lagoas de estabilização com alguns controles de seu funcionamento. Nesta época entrou em funcionamento a primeira lagoa projetada especificamente para receber e depurar esgoto bruto, denominada lagoa de Maddock (PEREIRA, 2000). Aproximadamente nesta mesma época, na Austrália, desenvolveram-se estudos para realizar o tratamento de esgoto em lagoas e esse país foi o pioneiro no uso de lagoas em série, que alguns chamam de lagoas australianas.

No Brasil as lagoas de estabilização foram introduzidas em 1960, pelo Engenheiro Benoit Almeida Victoretti, com a construção das primeiras lagoas de Estabilização localizadas em São José dos Campos, São Paulo, essas foram projetadas de acordo com o sistema australiano, sendo uma lagoa anaeróbia seguida de uma lagoa facultativa, com a finalidade de estabelecer parâmetros de projetos para outras lagoas em todo o país (KELLNER & PIRES, 1998).

As lagoas de estabilização são classificadas de acordo com os processos envolvidos na estabilização da matéria orgânica. Usualmente, pode-se classificá-las em três categorias: lagoas anaeróbias, lagoas facultativas e lagoas de maturação ou de polimento.

Quadro 1: Principais tipos de lagoas de estabilização. (continua)

<i>Tipo de lagoa</i>	<i>Descrição</i>
Anaeróbia	Predomina o mecanismo de digestão anaeróbia e ausência de oxigênio dissolvido (O ₂). Altas cargas orgânicas são aplicadas a esse tipo de lagoa (carga orgânica volumétrica (λ_v) de 100 e 350 g DBO/m ³ .dia). Opera com curtos tempos de detenção hidráulica (de 1 a 5 dias) e apresenta profundidade entre 2 e 5 m.
Facultativa	Coexistem os processos de oxidação aeróbia e digestão anaeróbia na coluna líquida. Pode ser lagoa facultativa primária, que recebe esgoto bruto, ou secundária, que recebe efluente de lagoa anaeróbia ou outra unidade de tratamento. A dinâmica mutualística entre algas e bactérias apresenta variações consideráveis ao longo do dia. Opera com carga orgânica superficial (λ_s) de 100 a 400 Kg DBO/ha.dia, com profundidade entre 1 e 2 m (tipicamente 1,5 m), e tempo de detenção hidráulica (TDH) mínimo de 3 a 5 dias.

Quadro 1: Principais tipos de lagoas de estabilização. (termino)

Maturação	É predominantemente aeróbia e opera com cargas orgânicas superficiais baixas ($\lambda s \leq 100$ Kg DBO/ha.dia). Geralmente tem profundidade da ordem de 1,0m. Experimenta variações nas concentrações de oxigênio e pH, assim como estratificação térmica de modo similar ao que ocorre em lagoas facultativas. O tempo de detenção hidráulica mínimo recomendado é de 3 dias e o TDH não deverá ser superior ao da lagoa facultativa precedente.
-----------	---

Fonte: Mara (2003); von Sperling (2002).

2.3 Padrões da qualidade de efluentes

Em âmbito nacional, a norma que regula a disposição de efluentes é a resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) complementada e alterada pela resolução nº 430, de 13 de maio de 2011 desse mesmo conselho.

No estado do Ceará, a portaria Nº 154, de julho de 2002 dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras.

A resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, em seu artigo de nº 21 estabelece as seguintes condições para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários:

- a) pH: entre 5 e 9;
- b) Temperatura: inferior a 40°C, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura;
- c) Materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;
- d) Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO 5 dias, 20°C: máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor;
- e) Substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) até 100 mg/L; e
- f) Ausência de materiais flutuantes.

2.4 Controle da remoção de poluentes e garantia de qualidade

Chorafas (1960) define a confiabilidade ou garantia de um sistema como a probabilidade de se conseguir um desempenho adequado por, pelo menos, um período específico de tempo, sob determinadas condições. No que toca monitoramento de ETE entende-se desempenho adequado como sendo o cumprimento dos padrões de qualidade exigidos por norma. Desta forma, o conceito de garantia estará relacionado à porcentagem de tempo na qual as concentrações do efluente cumprem os padrões de lançamento. Assim, uma ETE será considerada completamente confiável se não houver falha no desempenho do processo de tratamento, ou seja, se não ocorrer a violação dos padrões de lançamento preconizados pelas legislações ambientais vigentes.

2.5 Simulação Monte Carlo

A origem do método de Simulação Monte Carlo se deu nos anos quarenta durante a Segunda Guerra Mundial no âmbito do projeto Manhattan que visava o desenvolvimento de armas nucleares. Seus idealizadores, Neumann e Ulam, propuseram o método para a solução de problemas matemáticos cujo tratamento analítico era inviável. Primeiramente, o método foi utilizado para a avaliação de integrais múltiplas para o estudo da difusão de nêutrons. Posteriormente, verificou-se sua aplicabilidade em outros problemas matemáticos mais complexos de natureza determinística. O método foi nomeado em homenagem ao famoso cassino de Mônaco (JANÉ, 2003).

O método consiste em gerar valores aleatórios para variáveis independentes cuja distribuição de probabilidade é conhecida e, através de um modelo matemático, obter valores para uma variável dependente. Ao se repetir várias vezes o processo de cálculo, sempre com novos valores aleatórios para as variáveis independentes, é possível obter uma distribuição de probabilidades que representa o comportamento esperado para a variável dependente.

Para exemplificar o método será apresentado um exemplo do uso da Simulação Monte Carlo para o cálculo da soma de três dados de 6 faces. Foi utilizado o programa Microsoft Excel 2015 para gerar números aleatórios entre 1 e 6 que obedecem a uma distribuição uniforme de probabilidade. A tabela a seguir ilustra os resultados obtidos para 20 simulações.

Tabela 1: Simulação Monte Carlo com 20 simulações para cálculo da soma de 3 dados.

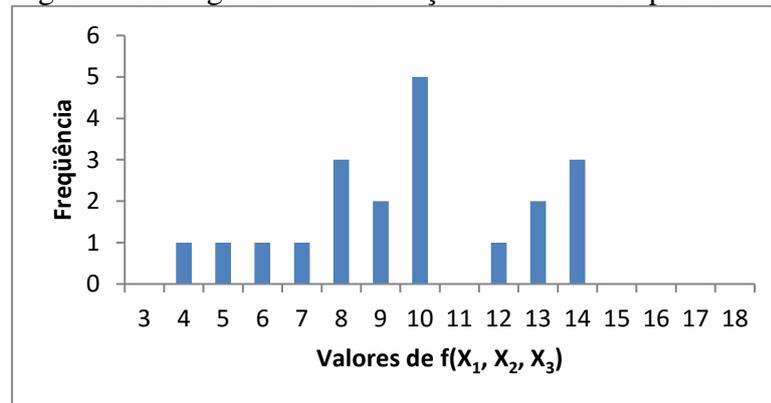
Simulação	X_1	X_2	X_3	$f(X_1, X_2, X_3)$
1	6	1	1	8
2	4	3	5	12
3	3	3	1	7
4	1	4	1	6
5	2	1	2	5
6	2	5	3	10
7	3	5	2	10
8	1	4	3	8
9	5	3	2	10
10	4	4	5	13
11	2	4	4	10
12	3	3	2	8
13	4	6	4	14
14	4	4	6	14
15	5	4	5	14
16	2	6	5	13
17	3	2	4	9
18	2	1	1	4
19	1	4	5	10
20	5	3	1	9

Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Na tabela, as colunas X_1 , X_2 , e X_3 representam o resultado obtido na simulação do lançamento de um dado de 6 faces e a coluna $f(X_1, X_2, X_3)$ representa o valor da soma de X_1 , X_2 e X_3 .

Os valores obtidos pela simulação foram organizados em um histograma e podem ser vistos na figura a seguir:

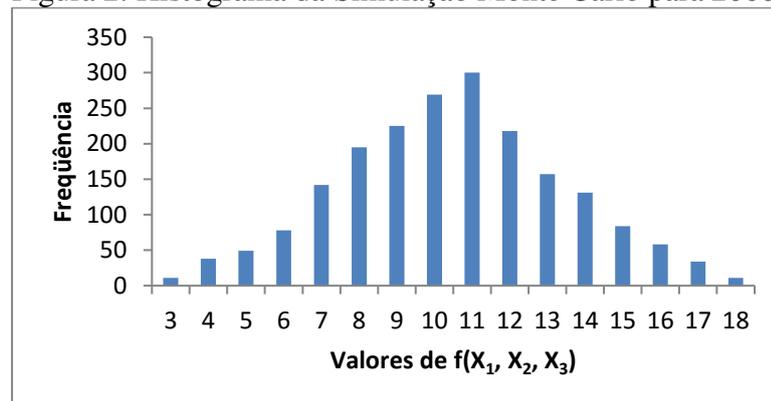
Figura 1: Histograma da Simulação Monte Carlo para 20 simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Nota-se que para esse número de simulações não é possível identificar um padrão de comportamento para a função $f(X_1, X_2, X_3)$. O mesmo procedimento foi repetido para 2000 simulações. O histograma resultante é apresentado a seguir.

Figura 2: Histograma da Simulação Monte Carlo para 2000 simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Nota-se que para este número de simulações a função $f(X_1, X_2, X_3)$ apresenta comportamento que se assemelha à distribuição normal conforme era de se esperar de acordo com o Teorema do Limite Central que diz que, sob condições gerais, a função de distribuição acumulada (fda) de uma soma de variáveis aleatórias independentes aproxima-se à fda de uma variável aleatória gaussiana mesmo que as fda das variáveis aleatórias individuais não sejam gaussianas.

2.6 Lógica Fuzzy

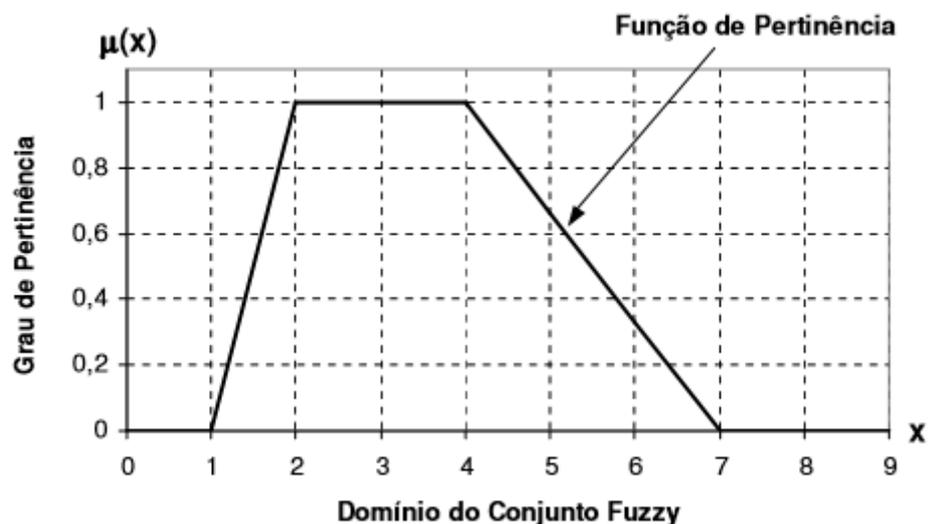
Segundo Cox (1995), a lógica fuzzy é capaz de combinar a imprecisão associada aos eventos naturais e o poder computacional das máquinas para produzir sistemas de resposta

inteligentes, robustos e flexíveis. Ela foi introduzida no contexto científico através da publicação do artigo Fuzzy Sets no journal Information and Control no ano de 1965 pelo professor Lotfi Zadeh embora, ainda segundo o autor, os conceitos básicos que diferenciam a lógica fuzzy da lógica booleana já eram conhecidos nos tempos anteriores a Aristóteles.

2.6.1 Número Fuzzy

Os números fuzzy se distinguem por não representarem um valor único e determinado, mas sim um conjunto de números definidos por uma função de pertinência $\mu(x)$. Cada função de pertinência define um conjunto fuzzy, \mathbf{A} , do conjunto universal, \mathbf{U} , através da atribuição de um grau de pertinência, $\mu_a(x)$, entre 0 e 1 para cada elemento x de \mathbf{U} . Este é o grau com o qual x pertence a \mathbf{A} . A figura a seguir ilustra um conjunto fuzzy.

Figura 3: Representação gráfica de um conjunto Fuzzy.



Fonte: Renteria (2006)

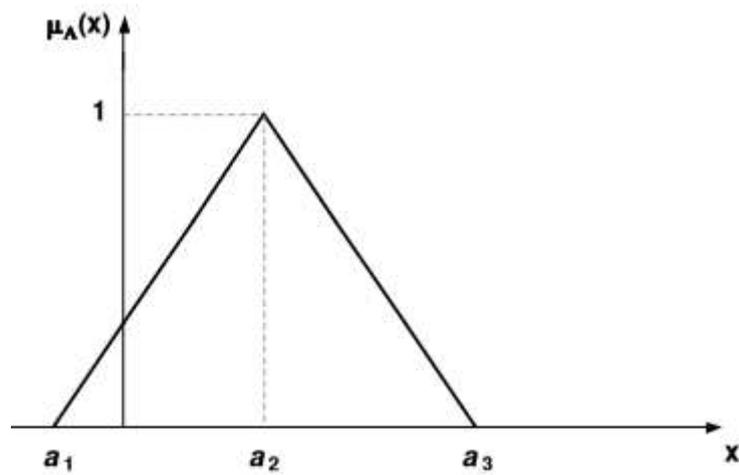
2.6.2 Número Fuzzy Triangular

Um número fuzzy triangular ou NFT pode ser definido como um caso especial de conjunto fuzzy representado por três pontos e expresso por $A = (a_1, a_2, a_3)$ e cuja função de pertinência obedece a seguinte lei de formação.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases}$$

A figura a seguir ilustra um NFT.

Figura 4: Representação gráfica de um NFT



Fonte: Renteria (2006)

3 METODOLOGIA

3.1 Os sistemas de lagoas estudados

Os sistemas de lagoas que serviram de base para o estudo estão localizados no Estado do Rio Grande do Norte. Ao todo foram analisados 10 (dez) sistemas de lagoas de estabilização com arranjo em série, constituídos cada um por três células sendo a primeira célula uma lagoa facultativa primária, a segunda uma lagoa de maturação primária e a última uma lagoa de maturação secundária. A representação esquemática dos sistemas é vista na Figura 4.

Figura 5: Representação esquemática dos sistemas de lagoas de estabilização estudados.



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2002).

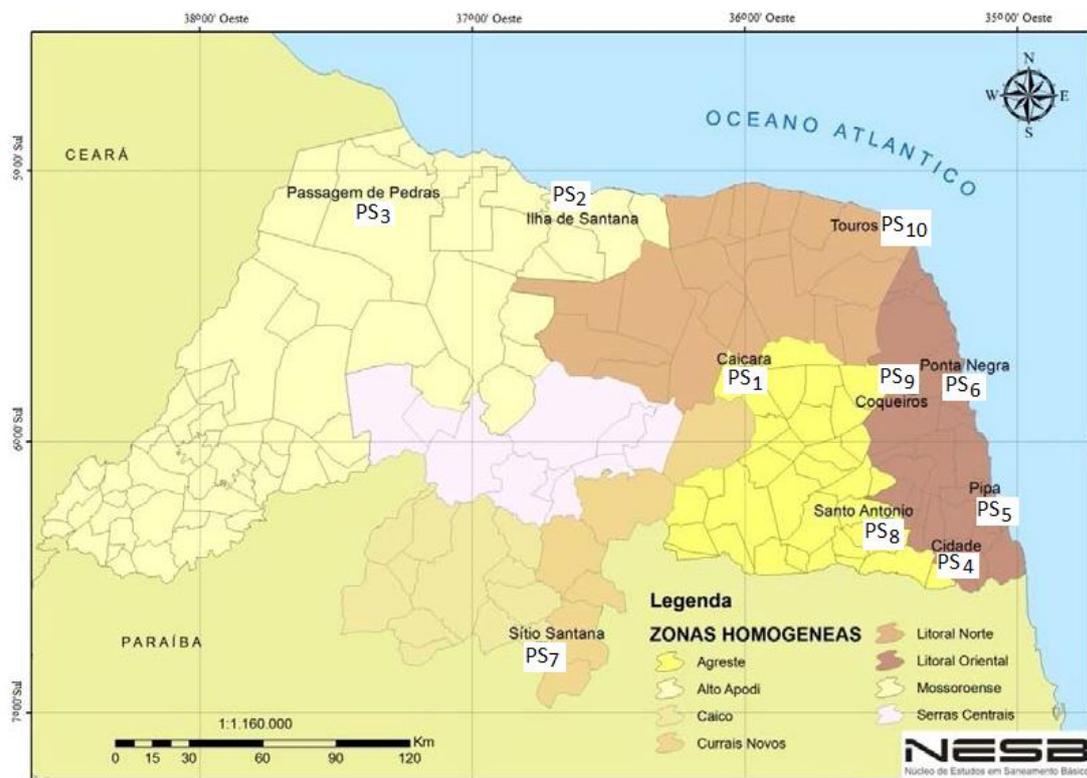
As informações de designação dos sistemas de lagoas considerados no estudo, suas coordenadas de localização, vazão de operação (Q), tempo de detenção hidráulica (TDH), volume e área (à meia profundidade) estão fornecidos na Tabela 2.

Tabela 2: Designação, localização e descrição dos sistemas de lagoas de estabilização do estudo.

Sistema de lagoas	Coordenadas	Q (m³/d)	TDH (d)	Volume (m³)	Área (m²)
PS ₁	5°45'27"S - 35°59'44"O	108	29,71	3.208	2.211
PS ₂	5°07'17"S - 36°38'09"O	3.940	17,13	67.500	37.350
PS ₃	5°11'53"S - 37°18'44"O	492	118,02	58.065	32.785
PS ₄	6°26'22"S - 35°13'18"O	253	13,77	3.484	1.872
PS ₅	6°14'17"S - 35°04'02"O	646	18,40	11.888	6.392
PS ₆	5°53'31"S - 35°11'04"O	7.615	24,93	189.884	109.086
PS ₇	6°45'58"S - 36°43'52"O	170	29,48	5.012	3.952
PS ₈	6°18'45"S - 35°28'24"O	300	78,01	23.402	12.796
PS ₉	5°47'39"S - 35°18'34"O	260	43,52	11.315	5796
PS ₁₀	5°12'15"S - 35°27'30"O	810	33,67	27.268	25.980

Fonte: Araújo (2011).

Figura 6: Localização dos sistemas de lagoas considerados no estudo.



Fonte: Adaptado de Araújo (2011).

3.2 Enfoque

Para o cálculo das garantias de atendimento aos padrões normativos foram analisados os parâmetros DBO, DBO filtrada e Nitrogênio Amoniacal. Os dados referentes às concentrações de cada parâmetro no efluente final de cada sistema avaliado podem ser encontrados no anexo A desse trabalho.

3.2.1 Enfoque da Simulação de Monte Carlo

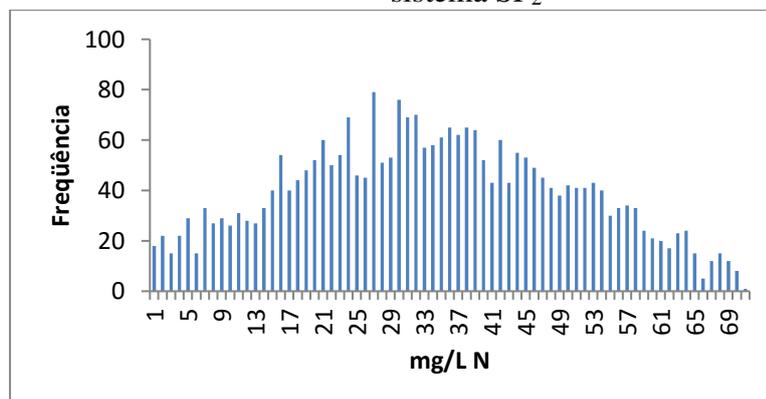
Para o cálculo da garantia de atendimento à norma através do método de Simulação de Monte Carlo foi utilizado o programa Microsoft Excel 2015 para gerar números aleatórios que representassem o valor esperado dos parâmetros DBO, DBO filtrada e Nitrogênio Amoniacal no efluente da segunda lagoa de maturação de cada sistema.

O procedimento foi realizado para as distribuições normal e log-normal. Foram efetuadas 3000 simulações para cada um dos parâmetros analisados de cada ETE. Os valores gerados que estavam fora do intervalo definido pelos valores mínimo e máximo de cada parâmetro foram descartados.

Ao final da simulação os valores obtidos foram organizados em ordem crescente e se calculou a porcentagem de valores que estavam abaixo dos valores limites estipulados pela norma. Essa porcentagem calculada foi considerada a garantia de atendimento à norma.

O histograma a seguir ilustra o resultado da simulação para o sistema SP₂ em relação ao Nitrogênio Amoniacal. No total, 22% dos valores gerados ficaram abaixo dos 20 mg/L estipulados pela norma.

Figura 7: Resultado da Simulação Monte Carlo para Nitrogênio Amoniacal no sistema SP₂

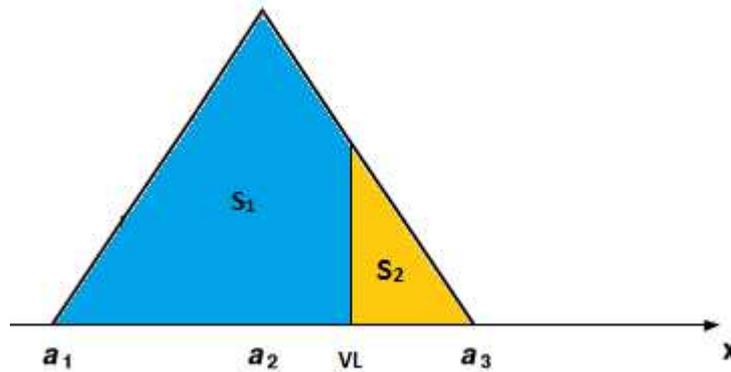


Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

3.2.2 Enfoque para Número Fuzzy Triangular

No cálculo da garantia de atendimento à norma através do uso de Número Fuzzy Triangular foram considerados NFTs formados pelos valores mínimos, médios e máximos de cada parâmetro sendo que para os valores médios foram consideradas a média aritmética, mediana e média geométrica. A garantia de atendimento à norma foi calculada com base nas áreas delimitadas pelo NFT e o valor limite estipulado por norma conforme ilustra a figura a seguir:

Figura 8: Representação das áreas delimitadas pelo valor limite em um NFT.



Fonte: Adaptado de Renteria (2006).

Na figura **a₁** representa o valor mínimo, **a₂** o valor médio, **VL** o valor limite estipulado por norma e **a₃** o valor máximo. A garantia (**G**) foi calculada dividindo-se a área **S₁** pela área total:

$$G = \frac{S_1}{S_1 + S_2}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Garantias

Para o cálculo da garantia dos sistemas em estudo foram utilizados os valores limites estipulados pelas normas, sendo: 120 mg/L para DBO, 60 mg/L para DBO filtrada e 20 mg/L para Nitrogênio Amoniacal.

Os resultados obtidos após a execução dos procedimentos descritos nos itens 3.2.1 e 3.2.2 podem ser encontrados nas tabelas a seguir. Para facilitar a análise dos dados as células cujos valores de garantia são inferiores a 33% foram preenchidas de vermelho, as células cujos valores de garantia são superiores a 33% e inferiores a 66% forma preenchidas de amarelo e as células cujos valores de garantia são superiores a 66% foram preenchidas de verde.

Tabela 3: Garantia para DBO (120 mg/L).

Sistemas	SMC N	SMC LN	NFT Média	NFT Mediana	NFT Média Geo
PS ₁	0,27	0,46	0,20	0,21	0,25
PS ₂	0,23	0,53	0,16	0,18	0,23
PS ₃	0,18	0,31	0,08	0,12	0,10
PS ₄	0,19	0,32	0,11	0,11	0,15
PS ₅	0,19	0,39	0,12	0,11	0,16
PS ₆	0,47	0,66	0,40	0,40	0,49
PS ₇	0,08	0,11	0,02	0,02	0,02
PS ₈	0,25	0,39	0,14	0,16	0,17
PS ₉	0,30	0,50	0,20	0,19	0,25
PS ₁₀	0,07	0,14	0,02	0,03	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Tabela 4: Garantia DBO filtrada (60 mg/L).

Sistemas	SMC N	SMC LN	NFT Média	NFT Mediana	NFT Média Geo
PS ₁	0,05	0,11	0,01	0,01	0,02
PS ₂	0,38	0,65	0,41	0,37	0,52
PS ₃	0,07	0,10	0,01	0,01	0,02
PS ₄	0,09	0,19	0,03	0,07	0,04
PS ₅	0,12	0,24	0,05	0,05	0,07
PS ₆	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PS ₇	0,05	0,07	0,01	0,02	0,01
PS ₈	0,18	0,38	0,11	0,12	0,15
PS ₉	0,22	0,45	0,15	0,17	0,19
PS ₁₀	0,40	0,66	0,32	0,30	0,44

Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Tabela 5: Garantia Nitrogênio Amoniacal (20 mg/L).

Sistemas	SMC N	SMC LN	NFT Média	NFT Mediana	NFT Média Geo
PS ₁	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02
PS ₂	0,23	0,58	0,17	0,20	0,24
PS ₃	0,82	0,94	0,77	0,79	0,80
PS ₄	0,23	0,29	0,22	0,22	0,23
PS ₅	0,43	0,61	0,30	0,35	0,35
PS ₆	0,83	0,88	0,86	0,83	0,88
PS ₇	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PS ₈	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
PS ₉	0,50	0,63	0,62	0,61	0,67
PS ₁₀	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Pode-se observar baixos coeficientes de garantia em todos os sistemas para os parâmetros DBO e DBO filtrada. Para DBO o melhor desempenho encontrado foi o do sistema PS₆ com média de garantias calculadas de 49% e o maior valor de garantia chegando a 66% calculado através da SMC – Log-Normal. O pior desempenho para DBO foi o do

sistema PS₁₀ com média das garantias de 6% e valores de garantia de 2% calculados a partir do uso de NFT com a média aritmética e a média geométrica.

Em relação à DBO filtrada o melhor desempenho encontrado foi o do sistema PS₂ com média das garantias igual a 47% com a garantia calculada pela SMC – Log-Normal chegando a 65%. O sistema com pior desempenho para DBO filtrada foi o PS₆ com média de garantias igual a 0% para todos os valores de garantia calculados.

O desempenho geral foi melhor para o parâmetro Nitrogênio Amoniacal sendo que foram encontrados valores de garantia de 100% em todas as metodologias de cálculo para os sistemas PS₇ e PS₁₀. O pior desempenho para Nitrogênio Amoniacal foi obtido para o sistema PS₁ com média de garantias de 3% e valores de garantia de 2% calculado através de NFT utilizando a média aritmética, mediana e média geométrica.

4.2 Análise de correlação

Após a obtenção dos resultados de garantia para cada metodologia, foi analisada a correlação entre os resultados obtidos e características dos sistemas tais como taxa de aplicação volumétrica média λ_v (g/m³.dia) e taxa de aplicação superficial média λ_s (Kg/ha.dia) do parâmetro analisado. Além disso foi analisada a correlação das metodologias entre si.

O resultado obtido é apresentado na tabelas a seguir. As células preenchidas de amarelo representam a correlação dos resultados de garantia e os parâmetros característicos dos sistemas. As células preenchidas de azul representam a correlação das metodologias entre si.

Tabela 6: Análise de correlação para DBO.

Parâmetro	λ_v	λ_s	SMC - N	SMC - LN	NFT - Média	NFT – Mediana	NFT - Média Geo
λ_v	1,00						
λ_s	0,99	1,00					
SMC N	-0,11	-0,03	1,00				
SMC – LN	0,08	0,17	0,93	1,00			
NFT – Média	-0,06	0,01	0,99	0,92	1,00		
NFT – Mediana	-0,11	-0,04	0,99	0,92	0,99	1,00	
NFT - Média Geo	-0,01	0,06	0,98	0,94	1,00	0,99	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Tabela 7: Análise de correlação para DBO filtrada.

<i>Parâmetro</i>	λ_v	λ_s	<i>SMC - N</i>	<i>SMC - LN</i>	<i>NFT - Média</i>	<i>NFT - Mediana</i>	<i>NFT - Média Geo</i>
λ_v	1,000						
λ_s	0,897	1,000					
SMC – N	0,169	-0,021	1,000				
SMC – LN	0,173	0,021	0,988	1,000			
NFT – Média	0,282	0,025	0,969	0,944	1,000		
NFT – Mediana	0,301	0,092	0,973	0,961	0,991	1,000	
NFT - Média Geo	0,262	0,012	0,977	0,952	0,999	0,991	1,000

Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Tabela 8: Análise de correlação para Nitrogênio Amoniacal.

<i>Parâmetro</i>	λ_v	λ_s	<i>SMC - N</i>	<i>SMC - LN</i>	<i>NFT - Média</i>	<i>NFT - Mediana</i>	<i>NFT - Média Geo</i>
λ_v	1,000						
λ_s	0,573	1,000					
SMC – N	-0,258	-0,700	1,000				
SMC – LN	-0,040	-0,552	0,952	1,000			
NFT – Média	-0,272	-0,740	0,987	0,924	1,000		
NFT – Mediana	-0,269	-0,727	0,992	0,940	0,999	1,000	
NFT - Média Geo	-0,237	-0,721	0,985	0,941	0,998	0,998	1,000

Fonte: Elaborado pelo autor. (2016)

Como se pode perceber através da análise das matrizes, foi encontrada uma baixa correlação entre os valores obtidos para a garantia calculadas para os parâmetros DBO e DBO filtrada e as taxas de aplicação volumétrica e superficial. Já o parâmetro Nitrogênio Amoniacal apresentou uma moderada correlação entre os valores de garantia e a taxa de aplicação superficial. No que toca a correlação entre as metodologias é possível verificar uma forte correlação.

A forte correlação encontrada entre as diferentes metodologias indica uma consistência nos resultados obtidos para a garantia dos sistemas o que incentiva a adoção de tais metodologias.

4.3 Avaliação das metodologias

No que se refere ao processo de obtenção dos resultados, a utilização de NFTs mostrou-se muito mais prática.

Ao todo, para a Simulação de Monte Carlo, foram analisados 3 parâmetros (DBO, DBO_f e Nitrogênio Amoniacal) para 10 sistemas e adotou-se 2 distribuições de probabilidade totalizando 60 rotinas de cálculo semelhantes à descrita no item 3.4.1.

Já pela metodologia que utiliza NFTs foram analisados 3 parâmetros (DBO, DBO_f e Nitrogênio Amoniacal) para 10 sistemas e adotando-se como valor médio a média aritmética, a mediana e a média geométrica totalizando 90 rotinas de cálculo semelhantes à descrita no item 3.4.2.

Apesar do maior número de rotinas executadas para o cálculo da garantia utilizando-se NFTs o tempo de processamento dessa metodologia foi muitas vezes menor que o demandado pela metodologia que utiliza a Simulação de Monte Carlo. Isso pode ser explicado pelo fato de que na utilização de NFTs os resultados podem ser obtidos simultaneamente para todos os parâmetros e em relação a todos os sistemas bastando para isso apenas que se organize os dados de maneira a possibilitar que a primeira rotina de cálculo executada possa ser copiada e utilizada nas rotinas posteriores. Já para o uso da Simulação de Monte Carlo cada rotina de cálculo deve ser executada separadamente o que torna a análise de muitos sistemas e parâmetros uma atividade demorada.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que os objetivos propostos para este trabalho foram alcançados. Os sistemas de lagoas avaliados apresentaram baixos índices de garantia para os parâmetros DBO e DBO filtrada e um melhor desempenho para o parâmetro Nitrogênio Amoniaco. Tais resultados podem ser utilizados para dar suporte a intervenções na operação dos sistemas a fim de se obter um melhor desempenho dos mesmos.

Os métodos utilizados para o cálculo da garantia dos sistemas mostraram-se coerentes, apresentando forte correlação entre si, e de fácil execução. Apesar de ambas as metodologias terem sido consideradas simples, a metodologia que faz uso de NFTs se mostrou mais robusta ao possibilitar a obtenção dos resultados em menor tempo e exigir menor esforço operacional.

Sugere-se para trabalhos futuros a investigações de mais fatores característicos dos sistemas que possam estar correlacionados aos índices de garantia para DBO e DBO filtrada visto que para os fatores analisados (taxa de aplicação superficial e taxa de aplicação volumétrica) não foram encontradas correlações significantes.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE NETO, C. O. Sistema simples para tratamento de esgotos sanitários: experiência brasileira. Rio de Janeiro: ABES, 1997.
- CHORAFAS, D. N., *Statistical processes and reliability engineering*. Van Nostrand Co., 1960.
- COX, E. Fuzzy logic for business and industry. Massachusetts: Charles River Media Inc, 1995.
- JORDÃO, E. P. e PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos doméstico. 3ª edição, ABES, 1995.
- KELLNER, E. e PIRES, E. C. Lagoas de estabilização. Rio de Janeiro: ABES, 1998.
- MARA, D. D. Domestic Waste Water Treatment in Developing Countries. Londres, Earthscan, 2003.
- MOTA, S. Introdução à engenharia ambiental. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2012.
- OLIVEIRA, L. F. F. Eficiências de Remoção de Carga Orgânica por Lagoas de Estabilização. ABES, 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999.
- PEREIRA, C. M. Avaliação do uso de peixes planctófagos como auxiliares do tratamento de efluentes. Dissertação de Mestrado. Departamento de Aqüicultura - Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- RENTERIA, A. R. Estimação de probabilidade fuzzy a partir de números imprecisos. 2006. 94 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- SNSA. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Águas e Esgoto – 2013. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2014. 181 p. : il.
- VON SPERLING, M. Princípios de Tratamento Biológico de águas Residuárias: Introdução à Qualidade da Água e ao tratamento de esgotos – Volume 1 – 2005. DESA/UFMG.

VON SPERLING, M. Princípios de Tratamento Biológico de águas Residuárias: Lagoas de Estabilização – Volume 3 – 2002, 2ª ed. DESA/UFMG.

JANÉ, D. A. A simulação Monte Carlo e a lógica fuzzy na análise econômico/financeira de investimentos sob condições de risco. 2003. 157 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

APENDICE A

Tabela 9: Dados do efluente final PS₁

PS ₁	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	177.81	139.48	27.11
Min	19.65	43.48	18.35
Max	343.61	234.34	35.66
SD	101.56	72.74	4.77
Median a	170.59	143.26	27.27
Média Geo	143.08	119.27	26.70

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 10: Dados do efluente final PS₂

PS ₂	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	187.50	69.16	32.91
Min	4.57	7.80	0.28
Max	461.25	116.07	72.16
SD	128.60	37.40	19.27
Median a	167.05	74.92	27.02
Média Geo	132.49	55.30	22.87

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 11: Dados do efluente final PS₃

PS ₃	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	176.97	79.26	7.71
Min	66.22	56.09	0.51
Max	409.20	102.43	34.65
SD	115.13	32.77	11.11
Median a	139.28	79.26	5.15
Média Geo	151.03	75.80	3.97

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 12: Dados do efluente final PS₄

PS ₄	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	194.36	99.80	24.83
Min	42.62	44.49	12.54
Max	388.61	216.56	33.43
SD	108.68	64.37	6.57
Median a	202.57	63.68	24.52
Média Geo	161.63	82.74	23.90

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 13: Dados do efluente final PS₅

PS ₅	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	208.44	121.61	19.82
Min	37.78	30.35	5.61
Max	381.59	217.80	54.02
SD	118.90	73.03	11.92
Median a	221.55	129.02	16.99
Média Geo	163.77	99.09	17.28

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 14: Dados do efluente final PS₆

PS ₆	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	120.17	105.41	14.52
Min	25.65	104.00	2.04
Max	259.17	106.82	26.50
SD	72.40	2.00	6.37
Median a	119.99	105.41	16.30
Média Geo	97.55	105.40	12.58

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 15: Dados do efluente final PS₇

PS ₇	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	209.84	110.29	11.85
Min	92.18	50.51	6.12
Max	485.61	203.21	16.44
SD	105.25	53.53	3.28
Median a	185.66	89.68	11.70
Média Geo	191.05	100.35	11.40

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 16: Dados do efluente final PS₈

PS ₈	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	166.39	112.50	7.47
Min	43.34	12.08	1.39
Max	394.30	221.40	22.57
SD	98.24	71.49	6.42
Median a	150.49	107.26	3.90
Média Geo	142.95	86.57	4.99

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 16: Dados do efluente final PS₉

PS ₉	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	155.67	93.56	20.73
Min	24.30	15.38	4.46
Max	374.34	188.90	28.54
SD	85.09	59.68	5.82
Median a	158.94	81.86	20.90
Média Geo	128.62	74.57	19.47

Fonte: Araújo (2011)

Tabela 17: Dados do efluente final PS₁₀

PS ₁₀	DBO (mg/L)	DBOf (mg/L)	Amônia (mg/L)
Média	218.34	63.35	3.28
Min	91.84	13.41	0.28
Max	498.15	148.41	13.37
SD	141.19	48.63	4.09
Median a	169.90	67.65	1.95
Média Geo	184.35	44.83	1.85

Fonte: Araújo (2011)