



Seleção de Tecnologias de Tratamento de Esgoto Utilizando Análise Multicritério (*)

Francisco Javier Cuba Teran

Professor Doutor, Universidade Federal de Goiás - UFG, Brasil
paco@ufg.br

Elaine Cristina Brás de Freitas

Mestra, Universidade Federal de Goiás - UFG, Brasil
elainecristina@gmail.com

Renata Medici Frayne Cuba

Professora Doutora, Universidade Federal de Goiás - UFG, Brasil
renatafrayne@ufg.br

Victor Hugo Souza Florentino Porto

Mestrando, Universidade Federal de Goiás - UFG, Brasil
vhsfporto@gmail.com

(*) Este artigo está baseado na dissertação intitulada: Seleção de tecnologias de tratamento de esgoto utilizando análise multicritério, de autoria da Engenheira Elaine Cristina Brás de Freitas, defendida e aprovada no Programa de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.

RESUMO

Uma das principais causas de poluição dos corpos hídricos é o lançamento de esgotos sem nenhum tipo de tratamento, visto que, para reduzir esse tipo de poluição, é necessária a implantação de sistemas de tratamento de esgoto, principalmente da unidade responsável por realizar a gestão do tratamento. A escolha de tecnologias de tratamento de esgoto é um processo complexo, pois envolve tanto variáveis quantitativas quanto variáveis qualitativas. Deste modo, para se alcançar o objetivo definido neste trabalho, que é a seleção de tecnologias de tratamento de esgoto aplicáveis a municípios do estado de Goiás que não possuem sistema de esgotamento sanitário, foi adotado o método Electre I. Utilizou-se, então, uma análise multicritério para selecionar as 37 tecnologias de tratamento de esgoto mais utilizadas no Brasil e definir um conjunto composto com as melhores opções de tecnologia. Para isso, foram definidos três cenários, nos quais foram selecionados: 16 critérios com características técnicas, econômicas, sociais e ambientais para o cenário 1; 10 critérios para o cenário 2, e oito critérios para o cenário 3. A aplicação do método foi adequada para a seleção de tecnologias de tratamento de esgoto, com seleção para: o cenário 1, de um conjunto composto por duas alternativas (lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação e infiltração lenta); o cenário 2, um conjunto composto por cinco alternativas (tanques sépticos, lagoa facultativa, lagoa aerada facultativa, infiltração lenta e reator UASB), e o cenário 3, três alternativas (tanques sépticos, lagoa aerada facultativa e reator UASB).

PALAVRAS-CHAVE: Método multicritério de tomada de decisão. Tecnologias de Tratamento de Esgotos. Electre I.

1. INTRODUÇÃO

A Lei nº 11.445/2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico no país, em seu art. 19, diz que a prestação de serviços públicos deve trazer em seu planejamento objetivos e metas de curto, médio e longo prazos para a universalização dos serviços de saneamento básico, dentre eles, o esgotamento sanitário.

Segundo os dados divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), referentes ao diagnóstico realizado em 2017, essa meta está longe de ser alcançada. No Brasil, 46% dos esgotos gerados são tratados, e 73,7% dos esgotos coletados recebem tratamento, ficando evidente a falta de sistemas de tratamento de esgoto implantados na maioria das cidades brasileiras.

No estado de Goiás, segundo os dados divulgados em 2019 pelo SNIS referentes ao diagnóstico realizado em 2017, 48% dos esgotos gerados e 87% dos esgotos coletados no estado recebem tratamento. Ademais, aproximadamente 67% dos municípios não possuem sistema de esgotamento sanitário implantado (SNIS, 2019).

O crescimento populacional e a urbanização das cidades apresentam relação direta com a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas ao uso. As ações antrópicas promovem alterações no ambiente, causando, principalmente, poluição dos corpos hídricos. O lançamento de esgoto sem tratamento altera os parâmetros físicos, químicos e biológicos e compromete seus usos múltiplos, favorecendo, também, o surgimento de doenças de veiculação hídrica, o que o torna uma das principais causas de contaminação das águas.

O déficit de coleta e tratamento de esgotos nas cidades brasileiras tem gerado uma parcela significativa de carga poluidora que chega aos corpos d'água, causando implicações negativas aos usos múltiplos dos recursos hídricos (Brasil, 2017). Para o tratamento desses despejos líquidos, existe, na literatura, uma grande variedade de tecnologias que, se

implantadas, podem reduzir os impactos provocados pelo lançamento do esgoto bruto nos corpos hídricos.

O tratamento desse esgoto é classificado por níveis: preliminar, primário, secundário e terciário, que, quando utilizados separadamente ou combinados, resultam em diferentes configurações de processos de tratamento de esgoto (Von Sperling, 2014). Após o tratamento, a disposição final pode ser realizada em corpos de água, no solo ou encaminhada para reuso, desde que atenda as regulamentações legais. Da mesma forma é necessário realizar a correta destinação do lodo gerado no processo.

Decidir qual processo de tratamento de esgoto deve ser adotado pode ser tarefa complexa. A escolha do processo de tratamento de esgoto não se restringe apenas às exigências ambientais, de saúde pública e/ou legais, mas também são avaliados os aspectos econômicos, sociais, operacionais, políticos e até os anseios da comunidade (Brasil, 2017; Castro, 2007). Para Von Sperling (2014), a seleção da alternativa mais adequada à realidade analisada deve ser feita por meio da atribuição de critérios e/ou pesos.

Nas últimas décadas têm sido desenvolvidos diversos métodos de apoio à tomada de decisão. Com a variedade e quantidade de métodos disponíveis, a seleção do método depende do problema particular considerado e das preferências dos tomadores de decisão. Em vista dos critérios a serem considerados na seleção de tecnologias de tratamento de esgoto e de suas subjetividades, neste trabalho será utilizada a metodologia de análise multicritério, que tem como intuito lidar com vários critérios quantitativos e qualitativos, simultaneamente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Levantamento de dados e definição de cenários

Foi estimada a população urbana para cada um dos 165 municípios do estado de Goiás que não possui sistema de esgotamento sanitário. Deste modo, utilizou-se o método geométrico, que considera o crescimento populacional em função da população existente a cada instante (VON SPERLING, 2014), para o horizonte de um projeto de 20 anos (2020 – 2040). Este método considera o tempo como um exponencial para o incremento anual sobre a taxa:

$$P_n = r g^{(n-0)} * P_0 \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

$$r g = \left(\frac{P_n}{P_0} \right)^{\left(\frac{1}{n-0} \right)} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$Tg\% = (r g - 1) * 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

P_n = projeção populacional para o ano em que se deseja

rg = razão de crescimento populacional

n = ano em que se deseja obter a projeção populacional

0 = ano que foi tomado como referência para o cálculo da projeção

P_0 = população do ano que foi tomada como referência para cálculo da projeção

T_g = Taxa de crescimento populacional em porcentagem

Uma vez definida a população do projeto, fez-se o ordenamento dos municípios em função da população calculada em ordem crescente, sendo possível identificar os municípios por três faixas de população: acima de 50.000 (2%), de 10.000 a 50.000 habitantes (22%) e até 10.000 habitantes (76%).

2.2. Definição dos cenários

Para a escolha de tecnologias que melhor representem as necessidades de cada município, foram definidos três cenários com os critérios que melhor se adequassem a essas faixas de população:

- Cenário 1: população acima de 50.000 habitantes;
- Cenário 2: população entre 10.000 e 50.000 habitantes;
- Cenário 3: população abaixo de 10.000 habitantes.

2.3. Aplicação de formulários

Foram aplicados formulários a especialistas que atuam na área de esgotamento sanitário, e, em cada cenário, atribuíram-se pesos de importância para cada critério listado, conforme sua preferência, utilizando-se ordenação simples. Obtidos os dados necessários para a realização da pesquisa, os dados foram tabulados e tratados com o uso do *software Microsoft Excel*[®].

2.4. Definição das alternativas e dos critérios

A seleção das alternativas para este estudo ocorreu com base na revisão sistemática da literatura e compreende 37 combinações de tecnologias de tratamento de esgoto mais utilizadas no Brasil, destacadas por Von Sperling (2014).

Em um processo de decisão multicritério, os critérios definidos têm que possibilitar a avaliação de cada uma das alternativas propostas. Na revisão sistemática da literatura, não foram encontrados números expressivos de trabalhos que abordem, no mesmo estudo, a seleção de tecnologias de tratamento de esgotos que empregue características econômicas, técnicas, sociais e ambientais para definição dos critérios. Neste sentido, levando-se em consideração essa observação, em função dos dados disponíveis para comparação quantitativa e qualitativa apresentados por Von Sperling (2014) e em conformidade com as recomendações propostas por Campos (2011), de não utilizar simultaneamente mais de 20 atributos em um mesmo nível de igualdade, foram selecionados, inicialmente, 16 critérios com características econômicas, técnicas, sociais e ambientais.

Em seguida, consoante a peculiaridade do método apontado por Costa (2016), uma vez encontrado o Kernel (K) do conjunto de alternativas estudados, este não sofre alterações, já

que as alternativas pertencentes ao conjunto dominante se completam, atingindo o melhor desempenho. Desta forma, dos 16 critérios selecionados, 16 foram considerados para o cenário 1, 10 para o cenário 2 e oito para o cenário 3.

2.5. Definição dos pesos e limiares

Os pesos possuem papel importante na resolução de conflitos entre critérios, influenciando de maneira decisiva nos resultados obtidos, uma vez que os pesos devem refletir o mais fielmente possível as preferências do agente decisor. Para definição dos pesos dos critérios selecionados, fez-se uma consulta a profissionais especialistas ligados à área de esgotamento sanitário, que atuam na Educação e na Companhia de Saneamento de Goiás (SANEAGO), e a projetistas, visto que cinco especialistas responderam aos questionários.

Enviaram-se três formulários aos especialistas consultados, nos quais a técnica utilizada para atribuição de pesos foi a ordenação simples. Nesta, o especialista prioriza os critérios na ordem de sua preferência, associando:

- Cenário 1 (população acima de 50.000 hab.): valor 1 para o critério menos importante e valor 16 para o mais importante.
- Cenário 2 (população entre 10.000 e 50.000 hab.): valor 1 para o critério menos importante e valor 10 para o mais importante.
- Cenário 3 (população abaixo de 10.000 hab.): valor 1 para o critério menos importante e valor 8 para o mais importante.

Como resultado da pesquisa, foram obtidos os pesos de importância associados aos critérios de seleção de tecnologias de tratamento de esgoto para os municípios do estado de Goiás, por meio da média aritmética e normalização dos pesos obtidos para cada critério, respectivamente.

Os limiares de concordância e discordância foram definidos em função da revisão bibliográfica realizada.

2.6. Aplicação do método Electre I

Com os dados de entrada foi definida a máxima diferença entre os critérios e efetuada a normalização de todos os valores. Em seguida ocorreu a relação de sobreclassificação par a par, considerando-se os conceitos de concordância (Equação 4) e discordância (Equação 5 e Equação 6). Concordância consiste na fraca preferência de uma alternativa em relação a outra, e discordância é quando não existem critérios em que a intensidade de preferência entre alternativas ultrapasse um limite aceitável.

$$C(a, b) = \frac{1}{P} \sum_{j: q_j(a) \geq g_j(b)} p_j \quad \text{onde} \quad P = \sum_{j=1}^n p_j \quad (\text{Eq. 4}),$$

em que:

$g_j(a)$ = desempenho da alternativa a no critério j

$g_j(b)$ = desempenho da alternativa b no critério j

p_j = peso normalizado do critério j (o somatório dos pesos é igual a 1)

$C(a, b)$ = índice de concordância que representa o quanto “a” sobreclassifica “b”.

O índice de discordância corresponde ao quão a alternativa “a” é inferior à alternativa “b”. O índice tem valores entre 0 e 1, e δ corresponde à máxima diferença para qualquer critério.

$$D(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{se } g_j(a) \geq g_j(b), \quad \forall j \\ \frac{1}{\delta} \max [g_j(b) - g_j(a)] & \end{cases} \quad (\text{Eq. 5})$$

Para:

$$\delta = \max_{c,d,j} [g_j(c) - g_j(d)] \quad (\text{Eq. 6})$$

Na sequência, define-se o limiar entre concordância e discordância para realização dos testes de dominância. Este, neste trabalho, foi definido em função da revisão bibliográfica, devendo ser atendidas as duas condições estabelecidas na Equação 5, em que:

S = sobreclassificação

c = limiar de concordância, relativamente grande

d = limiar de discordância, relativamente pequeno

$D(a, b)$ = índice de discordância que corresponde ao quão a alternativa “a” é inferior à alternativa “b”.

δ = escala de critérios.

Definida a matriz de superação, monta-se o “K”, que define a seleção do melhor conjunto de alternativas.

3. RESULTADOS

3.1. Alternativas

As 37 combinações de tecnologias de tratamento de esgoto mais utilizadas no Brasil, destacadas por Von Sperling (2014), são: A1 - Tratamento primário (tanques sépticos); A2 - Tratamento primário convencional; A3 - Tratamento primário avançado; A4 - Lagoa facultativa; A5 - Lagoa anaeróbia-lagoa facultativa; A6 - Lagoa aerada facultativa; A7 - Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação; A8 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoas de maturação; A9 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa; A10 - Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas; A11 - Infiltração lenta; A12 - Infiltração rápida; A13 - Escoamento superficial; A14 - Sistemas alagados construídos (*wetlands*); A15 - Tanque séptico + filtro anaeróbio; A16 - Tanque séptico + infiltração; A17- Reator UASB; A18 -UASB + lodos ativados;

A19 - UASB + biofiltro aerado submerso; A20 - UASB + filtro anaeróbio; A21 - UASB + filtro biológico percolador de alta carga; A22 - UASB + flotação por ar dissolvido; A23 - UASB + lagoas de polimento/maturação; A24 - UASB + lagoa aerada facultativa; A25 - UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação; A26 - UASB + escoamento superficial; A27 - Lodos ativados convencionais; A28 - Lodos ativados - aeração prolongada; A29 - Lodos ativados - batelada (aeração prolongada); A30 - Lodos ativados convencionais com remoção biológica de nitrogênio; A31 - Lodos ativados convencionais com remoção biológica de nitrogênio/fósforo; A32 - Lodos ativados convencionais + filtração terciária; A33 - Filtro biológico percolador de baixa carga; A34 - Filtro biológico percolador de alta carga; A35 - Biofiltro aerado submerso com nitrificação; A36 - Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de nitrogênio; A37 - Tanque séptico + biodisco.

As 37 alternativas apresentadas foram utilizadas na aplicação do método Electre I, para seleção de tecnologias de tratamento de esgoto para os três cenários propostos.

3.2. Critérios, pesos e limiares

O Quadro 1 apresenta os critérios definidos para o estudo com características econômicas, técnicas, sociais e ambientais, com base no levantamento sistemático da literatura. Também são apresentados os pesos dos critérios normalizados atribuídos pelos especialistas e a direção do vetor para cada critério dos três cenários.

Quadro 1 - Pesos dos critérios normalizados - cenário 1, cenário 2 e cenário 3

Característica	Critério	Peso cenário 1	Peso cenário 2	Peso cenário 3	Direção do Vetor
Econômica	Operação e manutenção	0,0955	0,1345	0,1722	Minimização
	Potência consumida	0,0746	0,1164	0,1389	Minimização
	Demanda por área	0,0418	0,1309	-	Minimização
	Investimento	0,0701	0,0727	0,15	Minimização
Ambiental	Lodo líquido a ser tratado	0,0791	0,1018	0,1167	Minimização
	Lodo desidratado a ser disposto	0,0896	-	-	Minimização
Social	Odor	0,0567	0,0727	-	Minimização
	Ruído	0,0328	-	-	Minimização
	Aerossóis	0,0224	-	-	Minimização
	Atração de insetos	0,0448	0,0473	0,0444	Minimização
Técnica	Confiabilidade	0,097	-	-	Maximização
	Complexidade	0,0791	0,1527	0,1556	Minimização
	Resistência a variações de vazão	0,0418	-	-	Maximização
	Coliformes	0,0522	0,0727	0,1	Minimização
	Nutrientes	0,0567	-	-	Minimização
	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	0,0657	0,0982	0,1222	Minimização

Fonte: elaborado pelos autores.

Assim, em função da revisão bibliográfica deste trabalho, definiu-se o valor de 0,6 para o limiar de concordância (c), e o valor de 0,4 para o limiar de discordância (d), valores também adotados por Andrade (2014) e Araújo (2014).

3.3. Cenário 1: população acima de 50.000 habitantes

Definidos os dados necessários à aplicação do método, estes foram lançados em planilha desenvolvida no *software Excel*[®], apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados de entrada do método Electre I para o cenário 1

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16
A1	8	0	0	150	360	35	2	4	5	4	4	3	4	1	1	1
A2	8	0	0	150	730	40	2	4	5	3	4	3	4	2	3	2
A3	35	0	0	200	2.500	110	3	4	5	3	4	3	4	2	3	2
A4	8	0	4	160	90	30	4	5	5	2	4	1	4	3	2	3
OA5	8	0	3	140	160	60	1	5	5	2	4	1	4	3	2	3
A6	20	18	1	200	220	30	4	1	1	3	4	2	4	3	2	3
A7	20	22	0	200	360	35	3	1	1	2	3	3	3	3	2	3
A8	10	0	5	370	160	60	3	5	5	2	4	1	4	5	3	3
A9	14	2	4	200	160	60	3	2	2	2	4	3	4	5	4	3
A10	14	0	3	200	190	70	3	5	5	2	4	3	4	3	2	4
A11	6	0	50	200	0	0	2	5	6	2	4	2	4	4	4	5
A12	8	0	6	200	0	0	2	5	5	2	4	2	4	4	4	5
A13	10	0	4	200	0	0	2	5	6	2	4	1	4	2	3	4
A14	10	0	5	200	0	0	2	5	5	2	4	1	4	2	2	4
A15	20	0	0	300	1.000	50	2	4	5	4	3	2	3	2	1	3
A16	12	0	2	150	360	35	2	5	5	2	3	2	4	4	4	5
A17	10	0	0	120	220	35	2	4	5	4	3	2	2	2	1	3
A18	30	20	2	250	400	60	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A19	30	20	0	250	400	55	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A20	15	0	0	220	300	50	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A21	18	0	0	250	400	55	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A22	22	12	0	250	470	75	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A23	14	0	3	450	250	35	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A24	20	5	0	250	300	50	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A25	20	8	0	250	300	50	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A26	18	0	3	250	220	35	2	5	5	2	4	1	2	5	3	3
A27	40	26	0	300	3.000	90	4	1	6	4	4	5	3	2	3	4
A28	40	35	0	270	2.000	105	5	1	6	4	4	4	4	2	3	5
A29	40	35	0	270	2.000	105	5	1	6	4	4	5	3	2	3	4
A30	50	22	0	400	3.000	90	4	1	6	4	4	5	3	2	3	4
A31	55	22	0	450	3.000	90	4	1	6	4	4	5	3	2	3	4
A32	55	26	0	450	3.100	100	4	1	6	4	4	5	3	2	3	4
A33	30	0	0	300	1.100	80	4	4	4	2	4	3	3	2	3	4
A34	30	0	0	300	1.900	80	4	4	4	3	4	3	4	2	2	4
A35	35	26	0	250	3.000	90	5	2	5	4	4	4	3	2	2	5
A36	35	22	0	300	3.000	90	5	2	5	4	4	4	3	2	2	5
A37	30	0	0	300	1.500	75	4	4	5	3	3	3	3	2	2	4

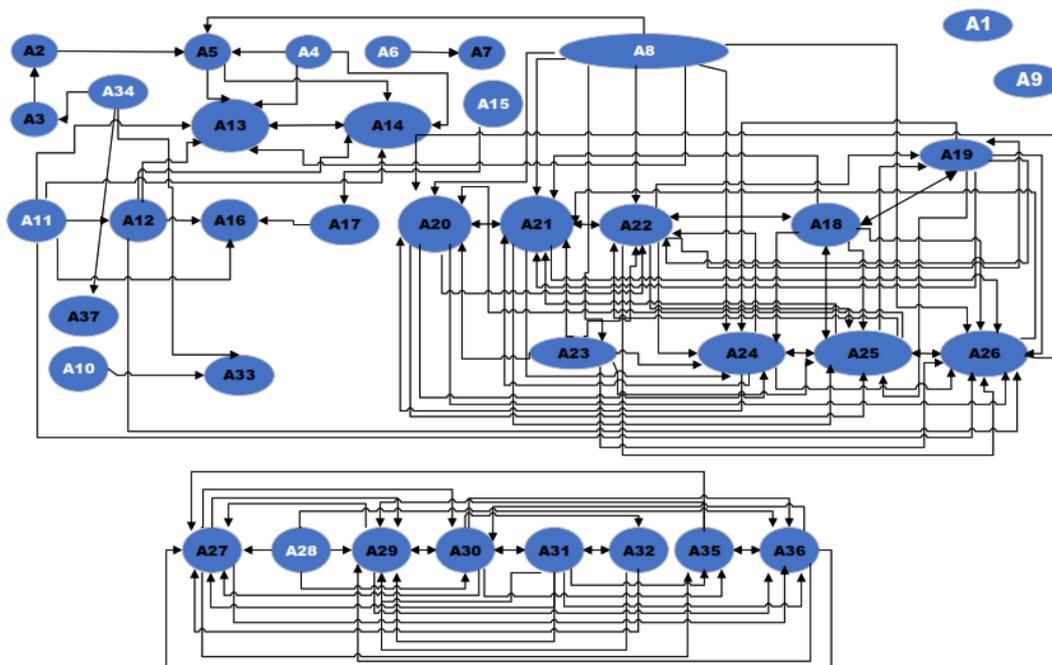
Fonte: Von Sperling (2014).

Foi realizada a normalização dos dados de entrada, dividindo-se o valor de cada critério pela soma total do critério indicado. Na sequência, determinou-se o valor da escala (δ) de cada critério para posterior construção das matrizes de concordância e discordância. Neste ínterim, para a construção das matrizes, calcularam-se os índices de concordância. Nestes, somam-se os pesos dos critérios, nos quais uma alternativa supera a outra, e os índices de discordância, através da máxima diferença entre elemento a elemento das avaliações, divididos pela escala (δ).

Antes de se montar a matriz de superação, foram definidos os limiares de concordância e discordância estabelecidos neste trabalho, como sendo $c = 0,6$ e $d = 0,4$, respectivamente. A próxima etapa foi verificar as condições estabelecidas na Equação 6.

Definida a matriz de superação, a última etapa do método foi a representação das relações de sobreclassificação usando grafos. A Figura 1 apresenta a relação de sobreclassificação, na qual é possível observar que as alternativas A1, A4, A6, A8, A9, A10, A11, A15, A28 e A34 (destacadas em branco, na Figura 2) não foram superadas por nenhuma outra alternativa.

Figura 1 - Relação de sobreclassificação das alternativas, utilizando-se grafo com $c = 0,6$ e $d = 0,4$, cenário 1



Fonte: elaborada pelos autores.

Para o cenário 1, por meio da aplicação do método Electre I, selecionou-se um conjunto com 10 alternativas como sendo as mais adequadas para a população com mais de 50.000 habitantes: tratamento primário - tanques sépticos, lagoa facultativa, lagoa aerada facultativa, lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação, lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa, lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas, infiltração lenta, tanque séptico + filtro anaeróbio, lodos ativados - aeração prolongada e filtro biológico percolador de alta carga.

Das tecnologias selecionadas, duas merecem algumas observações:

- Considerando-se a particularidade de atendimento em função da população e da eficiência de remoção de poluentes dos tanques sépticos, propõe-se sua utilização juntamente com a implantação de sistemas adicionais como filtro anaeróbio, filtro aerado submerso, lodo ativado por batelada etc., para áreas com baixa densidade populacional ou onde a implantação de rede de esgoto não for possível em função do custo ou da topografia.

- Apesar de o critério de demanda por área não representar uma das maiores preferências da maioria dos especialistas consultados, em função da população considerada

para o cenário 1 e do requisito de área da tecnologia infiltração lenta ser elevadíssimo, é prudente considerar que essa tecnologia possa ser utilizada como disposição final do esgoto tratado.

Todas as tecnologias de tratamento selecionadas no cenário 1 necessitam de unidades de tratamento preliminar e soluções de tratamento e disposição final do lodo gerado.

3.4. Cenário 2: população entre 10.000 e 50.000 habitantes

Definidos os dados necessários para a aplicação do método, foram lançados os dados do cenário 2 para cada alternativa referente a cada critério em planilha desenvolvida no *software Excel*[®], conforme apontado na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de entrada do método Electre I para o cenário 2

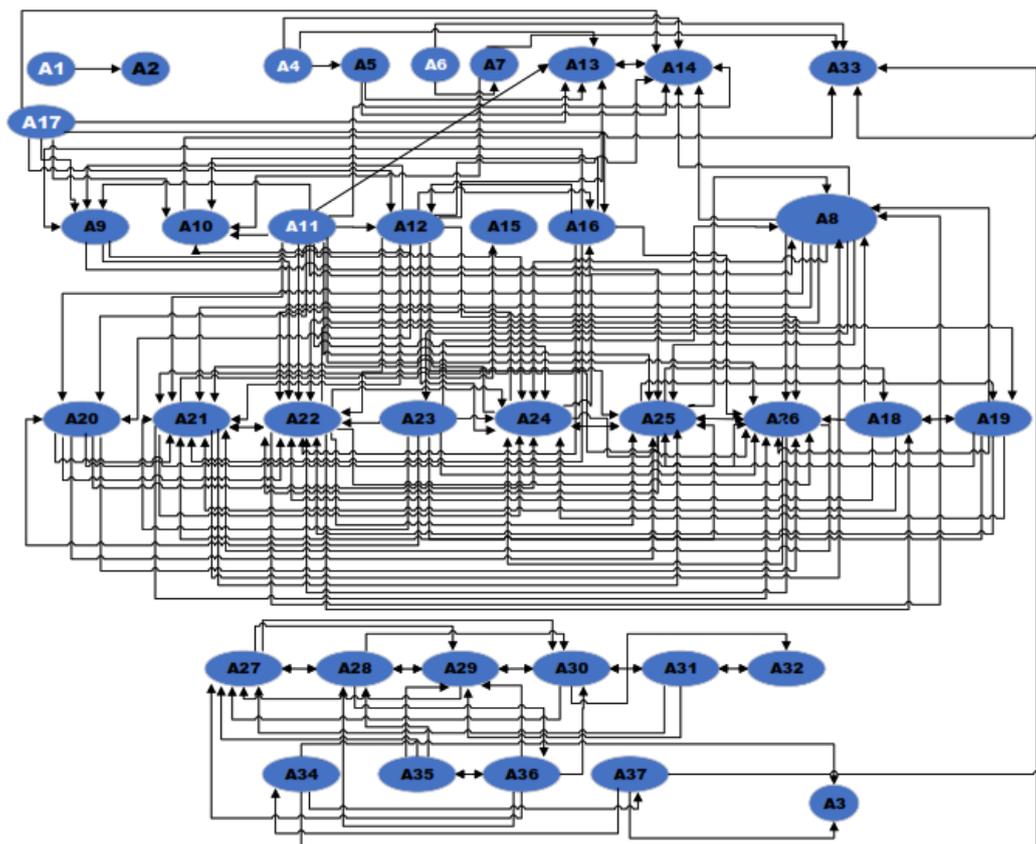
	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9	CC10
A1	8	0	150	0,05	360	2	4	3	1	1
A2	8	0	150	0,04	730	2	3	3	2	2
A3	35	0	200	0,06	2.500	3	3	3	2	2
A4	8	0	160	4,00	90	4	2	1	3	3
A5	8	0	140	3,00	160	1	2	1	3	3
A6	20	18	200	0,50	220	4	3	2	3	3
A7	20	22	200	0,40	360	3	2	3	3	3
A8	10	0	370	5,00	160	3	2	1	5	3
A9	14	2	200	3,50	160	3	2	3	5	3
A10	14	0	200	3,20	190	3	2	3	3	4
A11	6	0	200	50,00	0	2	2	2	4	5
A12	8	0	200	6,00	0	2	2	2	4	5
A13	10	0	200	3,50	0	2	2	1	2	4
A14	10	0	200	5,00	0	2	2	1	2	4
A15	20	0	300	0,35	1.000	2	4	2	2	3
A16	12	0	150	1,50	360	2	2	2	4	5
A17	10	0	120	0,10	220	2	4	2	2	3
A18	30	20	250	2,00	400	2	2	1	5	3
A19	30	20	250	0,15	400	2	2	1	5	3
A20	15	0	220	0,15	300	2	2	1	5	3
A21	18	0	250	0,20	400	2	2	1	5	3
A22	22	12	250	0,15	470	2	2	1	5	3
A23	14	0	450	2,50	250	2	2	1	5	3
A24	20	5	250	0,30	300	2	2	1	5	3
A25	20	8	250	0,30	300	2	2	1	5	3
A26	18	0	250	3,00	220	2	2	1	5	3
A27	40	26	300	0,25	3.000	4	4	5	2	4
A28	40	35	270	0,25	2.000	5	4	4	2	5
A29	40	35	270	0,25	2.000	5	4	5	2	4
A30	50	22	400	0,25	3.000	4	4	5	2	4
A31	55	22	450	0,25	3.000	4	4	5	2	4
A32	55	26	450	0,30	3.100	4	4	5	2	4
A33	30	0	300	0,30	1.100	4	2	3	2	4
A34	30	0	300	0,25	1.900	4	3	3	2	4
A35	35	26	250	0,15	3.000	5	4	4	2	5
A36	35	22	300	0,15	3.000	5	4	4	2	5
A37	30	0	300	0,20	1.500	4	3	3	2	4

Fonte: Von Sperling (2014).

Foi realizada a normalização dos dados de entrada, dividindo-se o valor de cada critério pela soma total do critério indicado. A sequência de aplicação do método para o cenário 2 foi a mesma aplicada no cenário 1.

A última etapa do método foi a representação das relações de sobreclassificação usando grafos. A Figura 2 apresenta a relação de sobreclassificação, na qual é possível observar que as alternativas A1, A4, A6, A11 e A17 (destacadas em branco, na Figura 2) não foram superadas por nenhuma alternativa.

Figura 2 - Relação de sobreclassificação das alternativas, utilizando-se grafo com $c = 0,6$ e $d = 0,4$, cenário 2



Fonte: elaborada pelos autores.

O K desse trabalho para o cenário 2 é formado por cinco alternativas como sendo as mais adequadas para a população de 10.000 a 50.000 habitantes: tratamento primário (tanques sépticos), lagoa facultativa, lagoa aerada facultativa, infiltração lenta e reator UASB.

A tecnologia reator UASB pode ser utilizada como unidade única de tratamento ou combinada com pós-tratamento. Durante a avaliação para escolha do sistema de tratamento, em função da dificuldade em satisfazer os padrões de lançamento, é prudente avaliar a inclusão de pós-tratamento ao reator UASB como lagoas de polimento em série, reator aeróbio + decantador secundário, filtro biológico + decantador secundário, biofiltro aerado, escoamento superficial, filtro anaeróbio etc.

Para as alternativas selecionadas tratamento primário e infiltração lenta, são consideradas as mesmas observações apontadas no item 3.3 deste trabalho. Todas as

tecnologias de tratamento selecionadas no cenário 2 necessitam de unidades de tratamento preliminar e soluções de tratamento e disposição final do lodo gerado.

3.5. Cenário 3: população abaixo de 10.000 habitantes

Definidos os dados necessários à aplicação do método, foram lançados os dados do cenário 3 para cada alternativa referente a cada critério em planilha desenvolvida no *software Excel*[®], como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de entrada do método Electre I para o cenário 3

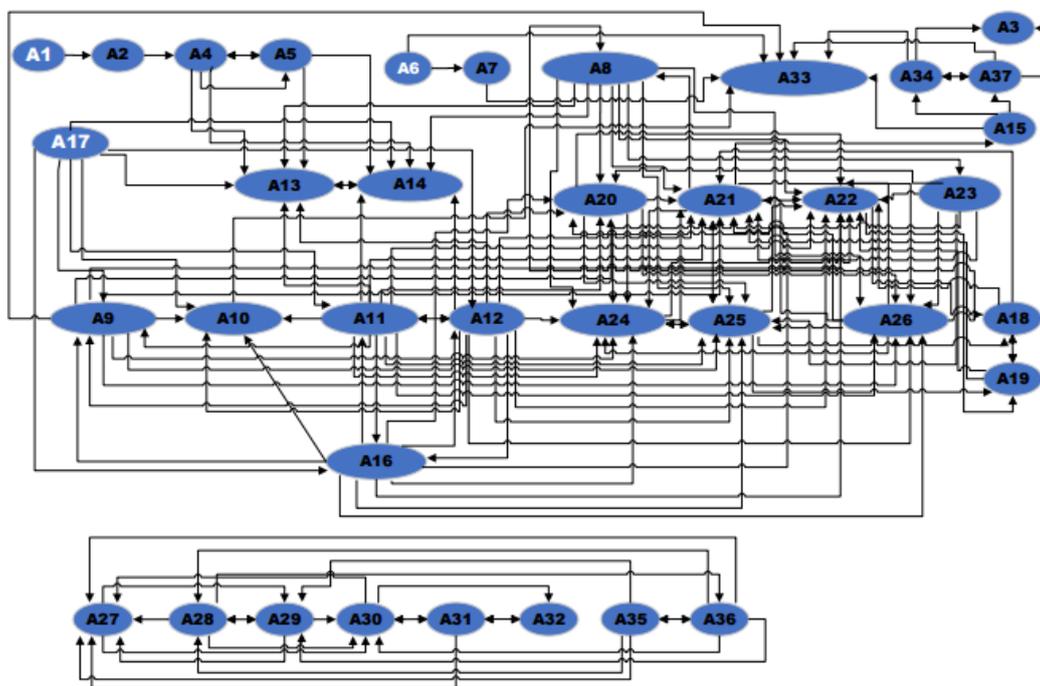
	CCC1	CCC2	CCC3	CCC4	CCC5	CCC6	CCC7	CCC8
A1	8	0	150	360	4	3	1	1
A2	8	0	150	730	3	3	2	2
A3	35	0	200	2.500	3	3	2	2
A4	8	0	160	90	2	1	3	3
A5	8	0	140	160	2	1	3	3
A6	20	18	200	220	3	2	3	3
A7	20	22	200	360	2	3	3	3
A8	10	0	370	160	2	1	5	3
A9	14	2	200	160	2	3	5	3
A10	14	0	200	190	2	3	3	4
A11	6	0	200	0	2	2	4	5
A12	8	0	200	0	2	2	4	5
A13	10	0	200	0	2	1	2	4
A14	10	0	200	0	2	1	2	4
A15	20	0	300	1.000	4	2	2	3
A16	12	0	150	360	2	2	4	5
A17	10	0	120	220	4	2	2	3
A18	30	20	250	400	2	1	5	3
A19	30	20	250	400	2	1	5	3
A20	15	0	220	300	2	1	5	3
A21	18	0	250	400	2	1	5	3
A22	22	12	250	470	2	1	5	3
A23	14	0	450	250	2	1	5	3
A24	20	5	250	300	2	1	5	3
A25	20	8	250	300	2	1	5	3
A26	18	0	250	220	2	1	5	3
A27	40	26	300	3.000	4	5	2	4
A28	40	35	270	2.000	4	4	2	5
A29	40	35	270	2.000	4	5	2	4
A30	50	22	400	3.000	4	5	2	4
A31	55	22	450	3.000	4	5	2	4
A32	55	26	450	3.100	4	5	2	4
A33	30	0	300	1.100	2	3	2	4
A34	30	0	300	1.900	3	3	2	4
A35	35	26	250	3.000	4	4	2	5
A36	35	22	300	3.000	4	4	2	5
A37	30	0	300	1.500	3	3	2	4

Fonte: Von Sperling (2014).

Fez-se a normalização dos dados de entrada dividindo-se o valor de cada critério pela soma total do critério indicado. A sequência de aplicação do método para o cenário 2 foi a mesma aplicada nos cenários 1 e 2.

A última etapa do método foi a representação das relações de sobreclassificação usando grafos, destacadas em branco, na Figura 3, na qual é possível visualizar a relação de sobreclassificação das alternativas A1, A6 e A17, que não foram superadas por outras alternativas.

Figura 3 - Relação de sobreclassificação das alternativas, utilizando-se grafo com $c = 0,6$ e $d = 0,4$, cenário 3



Fonte: elaborada pelos autores.

O K para a população até 10.000 habitantes, cenário 3, compreende um conjunto formado com três alternativas: tratamento primário (tanques sépticos), lagoa aerada facultativa e reator UASB.

A tecnologia reator UASB pode ser utilizada como unidade única de tratamento ou combinada com pós-tratamento. Durante a avaliação para escolha do sistema de tratamento, em função da dificuldade em satisfazer os padrões de lançamento, é prudente avaliar a inclusão de pós-tratamento ao reator UASB com lagoas de polimento em série. A indicação de lagoas está pautada na facilidade de operação, considerando-se que a maioria dos municípios com menos de 10.000 habitantes do estado de Goiás fica longe de grandes centros urbanos, dificultando a manutenção.

3.6. Análise de sensibilidade

Primeiramente, foram atribuídos aleatoriamente novos pesos para os critérios adotados e, em seguida, linearmente novos valores de limiares para os cenários 1, 2 e 3, os quais não tiveram alterações significativas nos resultados obtidos. Na sequência definiram-se novos limiares e foram realizadas novas simulações para os três cenários, para $c = 0,7$ e $d = 0,3$ e em seguida para $c = 0,5$ e $d = 0,5$.

3.6.1. Cenário 1: população acima de 50.000 habitantes

Os limiares definidos para o cenário 1, $c = 0,6$ e $d = 0,4$, mesmo sendo um dos mais utilizados neste estudo, não se apresentaram os mais eficientes para a resolução desse tipo de problemática. Após análise de sensibilidade, os limiares de concordância e discordância $c = 0,5$ e $d = 0,5$ estavam mais adequados para a resolução desse tipo de problemática, uma vez que eliminaram a maior quantidade de opções e selecionaram o conjunto com as melhores alternativas (A8 e A11).

Levando-se em consideração as preferências dos especialistas em relação aos pesos atribuídos, o método Electre I foi considerado adequado para a seleção de tecnologias de tratamento de esgoto. Isso ocorreu porque as tecnologias selecionadas estão coerentes com as tecnologias hoje utilizadas no estado, e os especialistas consultados atuam na área de esgotamento sanitário no estado de Goiás.

Para as tecnologias de tanques sépticos, é prudente que estas sejam consideradas para áreas de baixa densidade populacional ou para onde a implantação de rede de esgoto não for possível em função do custo ou da topografia. Além disso, é importante que a tecnologia de infiltração lenta seja considerada como uma opção de destinação final dos esgotos tratados, principalmente em áreas onde há ausência ou poucas alternativas de corpo receptor.

Quando da escolha do tipo de tratamento de cada município em função das particularidades de cada lugar e do tempo disponível para análise, o decisor pode adotar o menor ou o maior conjunto apresentado.

3.6.2. Cenário 2: população entre 10.000 e 50.000 habitantes

Para o cenário 2, os limiares $c = 0,5$ e $d = 0,5$, foi eliminada a maior quantidade de opções e selecionou-se o conjunto com uma alternativa (A11). Apesar dessa simulação ter eliminado a maior quantidade de opções, a alternativa selecionada de infiltração lenta não se apresenta adequada como única tecnologia de tratamento para essa faixa de população.

Considera-se mais adequado para esse estudo, em função da problemática a ser resolvida, o conjunto composto pelas cinco alternativas selecionadas para os limiares $c = 0,6$ e $d = 0,4$: tratamento primário (tanques sépticos), lagoa facultativa, lagoa aerada facultativa, infiltração lenta e reator UASB.

3.6.3. Cenário 3: população baixo de 10.000 habitantes

Para o cenário 3, os limiares definidos ($c = 0,6$ e $d = 0,4$) apresentaram-se adequados para a resolução desse tipo de problemática, uma vez que se eliminou a maior quantidade de opções e selecionou-se o conjunto com as melhores alternativas: tratamento primário (tanques sépticos), lagoa aerada facultativa e reator UASB.

As tecnologias selecionadas foram coerentes com a faixa de população de até 10.000 habitantes. Quando da escolha do tipo de tratamento de cada município em função das

particularidades de cada lugar e do tempo disponível para análise, o decisor pode adotar o menor ou o maior conjunto apresentado.

4. CONCLUSÕES

Para a seleção de tecnologias de tratamento de esgoto doméstico foi utilizado o método Electre I, adequado para a resolução da problemática, na qual o resultado esperado é a seleção das melhores alternativas. O objetivo é eliminar o maior número de ações possíveis, além de possibilitar a incorporação de critérios com características sociais, econômicas, técnicas e ambientais.

Para o cenário 1, com a adoção de 16 critérios de avaliação utilizando-se limiares $c = 0,6$ e $d = 0,4$, selecionou-se um conjunto com 10 alternativas como sendo as mais adequadas para a população com mais de 50.000 habitantes: tratamento primário - tanques sépticos, lagoa facultativa, lagoa aerada facultativa, lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação, lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa, lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas, infiltração lenta, tanque séptico + filtro anaeróbio, lodos ativados - aeração prolongada e filtro biológico percolador de alta carga.

O K para o cenário 2, com a adoção de 10 critérios de avaliação, utilizando-se limiares $c = 0,6$ e $d = 0,4$, é formado por cinco alternativas como sendo as mais adequadas para a população de 10.000 a 50.000 habitantes: tratamento primário (tanques sépticos), lagoa facultativa, lagoa aerada facultativa, infiltração lenta e reator UASB.

Já para o cenário 3, com população de até 10.000 habitantes e a adoção de oito critérios de avaliação utilizando-se limiares $c = 0,6$ e $d = 0,4$, o K foi formado por um conjunto com três alternativas: tratamento primário (tanques sépticos), lagoa aerada facultativa e reator UASB.

Como pode ser observado na apresentação dos resultados de aplicação do método, quanto maior a quantidade de critérios maior foi o conjunto selecionado. As tecnologias selecionadas, segundo as preferências dos especialistas, trata-se de tecnologias menos complexas, de baixo custo e operação simples. No geral não houve preocupação com a disponibilidade da área, pois a maioria dos processos selecionados demanda área maior para implantação.

Como forma de analisar a estabilidade do método, uma vez que a atribuição de pesos é realizada de forma subjetiva, foi realizada análise de sensibilidade, na qual se notou consistência dos resultados após alteração dos pesos atribuídos para os três cenários. Como o método também é sensível aos limiares definidos, foram atribuídos novos limiares para os três cenários, nos quais se observou que, aumentando a restrição, o conjunto de alternativas selecionados é maior, contrariando um dos objetivos do método, que é eliminar o maior número de ações possíveis.

Após análise de sensibilidade, foi selecionado, para a população com mais de 50.000 habitantes, um conjunto composto por duas alternativas (lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação e infiltração lenta).

Para a população de 10.000 a 50.000 habitantes, após análise de sensibilidade, o menor conjunto selecionado foi composto por uma alternativa, infiltração lenta. A alternativa selecionada de infiltração lenta não é a única tecnologia de tratamento para essa faixa de população. Desta maneira, considerou-se mais adequado para esse estudo, em função da problemática a ser resolvida, o conjunto composto pelas cinco alternativas selecionadas antes da análise de sensibilidade: tratamento primário (tanques sépticos), lagoa facultativa, lagoa aerada facultativa, infiltração lenta e reator UASB.

Já para a população de até 10.000 habitantes, o conjunto foi composto por três alternativas (tanques sépticos, lagoa aerada facultativa e reator UASB).

Recomenda-se que a tecnologia tanques sépticos, selecionada nos cenários 2 e 3, seja utilizada para áreas de baixa densidade populacional ou onde a implantação de rede de esgoto não for possível em função do custo ou da topografia. Também em razão da sua eficiência de remoção de poluentes, sugere-se que a tecnologia seja implantada juntamente com pós-tratamentos, como filtro anaeróbio, filtro aerado submerso, lodo ativado por batelada etc.

Em função de o requisito da área da tecnologia infiltração lenta ser elevadíssimo, é importante considerar que essa tecnologia pode ser utilizada como disposição final do esgoto tratado para os cenários 1 e 2, em consequência da população a ser atendida, e também para os municípios onde há poucas opções ou nenhuma opção de corpo receptor.

A aplicação do método apresentou-se adequada para a resolução do problema exposto, de forma a otimizar o tempo dos decisores durante o processo de escolha de tecnologias de tratamento de esgoto, garantindo que todas as questões levantadas fossem consideradas segundo os cenários avaliados.

5. REFERÊNCIAS

ANDRADE, P. F. **Modelo de Apoio à Decisão Multicritério para Seleção de Escopos de Projetos de Investimento Social Privado**. Dissertação (Mestrado Engenharia da Produção e Sistemas) – Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2014.

ARAUJO, F. A.; BELDERRAIN, M. C. N.; CARVALHO, N. H. C.; JÚNIOR GONÇALVES, T. J. M. Aplicação do Método Electre I, na Escolha do Tipo de Gás para Uso em Edificações. In: **XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Salvador, 2014.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (BRASIL). **Atlas Esgoto**: Despoluição de Bacias Hidrográficas. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017, 88 p. il., 2017.

BRASIL. Congresso Nacional. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm. Acesso em: 30 jan. 2019.

BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **Censo Demográfico**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-demografico/series-temporais/series-temporais>. Acesso em: 30 ago. 2019.



BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO-SNIS.

Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto 2017, Brasília: SNS/MDR, 2019. 226 p.: il., 2019.

CAMPOS, V. R. **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos de saneamento**. 2011. 175f.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CASTRO, L. M. A. **Proposição de Metodologia para a Avaliação dos Efeitos da Urbanização nos Corpos de Água**.

2007. 297f. Tese (Doutorado em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

COSTA, H. G. Graphical interpretation of outranking principles. **Journal of Modelling in Management**, v. 11, n. 1, p. 26-42, 2016.

SANEAMENTO DE GOIÁS, S. A. **Informações Institucionais**. Disponível em: <https://www.saneago.com.br/2016>.

Acesso em: 24 ago. 2022.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte:

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.