

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

USO DO DIAGRAMA DE COAGULAÇÃO COMO FERRAMENTA PARA O ESTUDO DA REMOÇÃO DE *Cryptosporidium* spp. E *Giardia* spp. EM ÁGUA PARA ABASTECIMENTO

* Danielle Segóvia C. A. Pereira ¹
Elizabeth R. Halfeld da Costa ²
Regina de Pinho Keller ³
Edumar Ramos Cabral Coelho ³

USE OF THE COAGULATION DIAGRAMS AS A TOOL FOR STUDYING THE REMOVAL OF *Cryptosporidium* spp. AND *Giardia* spp. IN PUBLIC WATER SUPPLY

Recibido el 11 de marzo de 2024. Aceptado el 14 de febrero de 2025

Abstract

Protozoa of the genera *Cryptosporidium* and *Giardia* are responsible for outbreaks of waterborne diseases, including in developed countries, which reveals the difficulty of their removal through the water treatment normally used. In Brazil, the most used water treatment technology is the complete cycle type, which consists of the sequential stages of coagulation, flocculation, decantation, filtration and disinfection. The study evaluated the removal of *Cryptosporidium* spp. oocysts and *Giardia* spp. cysts in waters from the Jucu River, a station that supplies a full cycle station, based on the coagulation diagram. The research consisted of physical-chemical and biological characterization using three types of water collected from the Jucu River. For each type of water, a coagulation diagram was constructed using aluminum sulfate as a coagulant in the scanning mechanism. To carry out studies with inoculum of *Cryptosporidium* and *Giardia* (oo) cysts, two points were strategically selected, determined by the "coagulant dosage x coagulation pH", one within the optimal scanning region and the other outside. The studies showed that in the optimal scanning region, the removal of turbidity from the decant walter was greater than 80% and that the recovery of *Cryptosporidium* and *Giardia* (oo) cysts in the sludge was greater than 70% and 40%, respectively. These results indicated that the removal of turbidity influenced the removal of these protozoa and that the construction of the coagulation diagram constitutes an important tool in the study of their removal in water treatment plants.

Keywords: coagulation diagram, *Cryptosporidium*, *Giardia*, public water supply.

¹ Laboratório de Dinâmica de Transmissão e Complexidade em Helmintíases, Núcleo de Doenças Infecciosas, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

² Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

* Autor correspondente: Laboratório de Dinâmica de Transmissão e Complexidade em Helmintíases, Núcleo de Doenças Infecciosas, CCS, Universidade Federal do Espírito Santo. Avenida Marechal Campos 1468, UFES-Campus de Maruípe, Térreo do Prédio do CCS, Núcleo de Doenças Infecciosas (NDI), 29043-910 Vitória ES. Email: daniscapbcp@gmail.com

Resumo

Protozoários dos gêneros *Cryptosporidium* e *Giardia* são responsáveis por surtos de doenças de veiculação hídrica, inclusive em países desenvolvidos, o que revela a dificuldade de sua remoção por meio do tratamento de água normalmente empregado. No Brasil, a tecnologia de tratamento de água mais utilizada é a do tipo ciclo completo que consiste nas etapas sequenciais de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. O estudo avaliou a remoção de oocistos de *Cryptosporidium spp.* e cistos de *Giardia spp.* na água do Rio Jucu, manancial que abastece uma estação de ciclo completo, com base no diagrama de coagulação. A pesquisa consistiu na caracterização físico-química e biológica utilizando-se três tipos de água coletadas no Rio Jucu. Construiu-se, para cada tipo de água, um diagrama de coagulação utilizando o sulfato de alumínio como coagulante no mecanismo de varredura. Para realização dos estudos com inóculo de (oo)cistos de *Cryptosporidium* e *Giardia*, foram selecionados estrategicamente, dois pontos, em cada diagrama, determinados pela “dosagem de coagulante x pH de coagulação”, um dentro da região ótima da varredura e outro fora. Os estudos mostraram que na região ótima de varredura, a remoção de turbidez da água decantada foi superior a 80% e que a recuperação de (oo)cistos de *Cryptosporidium* e *Giardia* no lodo foram superiores a 70% e 40%, respectivamente. Estes resultados indicaram que a remoção da turbidez influenciou na remoção desses protozoários e que a construção do diagrama de coagulação constitui uma importante ferramenta no estudo da remoção dos mesmos em estações de tratamento de água.

Palavras-chave: diagrama de coagulação, *Cryptosporidium*, *Giardia*, água para abastecimento público.

Introdução

Nos últimos anos foram registrados inúmeros surtos mundiais de doenças de veiculação hídrica tendo como o seu principal agente o protozoário *Cryptosporidium spp.*, seguido por *Giardia spp.* e *Toxoplasma gondii*. Estima-se que os protozoários causam anualmente 1.7 bilhão de casos de diarreia e 842.000 mortes em todo o mundo. Além disso, eles são a segunda causa mais comum de mortalidade em crianças menores de 5 anos. Pelo menos 381 surtos relacionados à transmissão de protozoários parasitas pela água foram relatados entre 2011 e 2016 em todo o mundo, sendo o seu maior número registrado na América do Norte. (Bourli *et al.*, 2023).

No Brasil, esses protozoários foram detectados em mananciais utilizados para abastecimento público, que estão comumente localizados próximos a áreas de pastagens e de intensa atividade agropecuária ou que recebem, em algum ponto do seu curso, efluentes líquidos não tratados. (Grott *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2021; Keller *et al.*, 2024)

As tecnologias de tratamento de água evoluíram consideravelmente, podendo-se dizer que qualquer água pode ser tratada e destinada a consumo, embora os custos e riscos envolvidos possam ser extremamente elevados. As tecnologias de tratamento podem ser divididas entre aquelas em que são utilizadas a coagulação química e as que prescindem desse processo (Di Bernardo, 2017). Neste trabalho, destacam-se as tecnologias que utilizam coagulação química, dentre elas a de tratamento em ciclo completo, comumente utilizada no Brasil, que compreende as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração rápida descendente.

Coagular significa desestabilizar partículas permitindo que essas se agrupem e sejam removidas da água em tratamento. A coagulação depende, fundamentalmente, das características da água e das impurezas presentes, conhecidas por meio de parâmetros como pH, alcalinidade, cor verdadeira, tamanho e distribuição das partículas em estado coloidal e em suspensão. Quando a coagulação não é realizada de modo adequado, compromete-se o desempenho de todas as unidades de tratamento a jusante, aumentando os riscos sanitários da água produzida (Di Bernardo, 2003).

Considera-se a coagulação como o resultado individual ou combinado à ação de quatro mecanismos distintos: compressão da dupla camada elétrica; adsorção e neutralização; varredura; Adsorção e formação de ponte (Di Bernardo e Di Bernardo-Dantas, 2005). Dentre estes mecanismos, o de “adsorção e neutralização de cargas” e o de “varredura” são os que podem ocorrer quando se utiliza sais de ferro ou alumínio como coagulantes primários.

O mecanismo de varredura é muito utilizado nas estações de tratamento de água em que têm coagulação, floculação e decantação antecedendo a filtração, pois os flocos são maiores e apresentam velocidade de sedimentação relativamente alta, se comparados aos flocos obtidos com coagulação realizada por adsorção e neutralização de cargas (Di Bernardo *et al.*, 2002). A coagulação realizada neste mecanismo é recomendada quando se tem tratamento em ciclo completo, pois os flocos obtidos são facilmente removidos nos decantadores.

Amirtharajah e Mills (1982) desenvolveram o diagrama de coagulação, com base no diagrama de solubilidade do alumínio e das condições de coagulação, de $Al_2(SO_4)_3 \times 14,3 \times H_2O$ e pH da mistura, no tratamento de águas sintéticas e naturais, com turbidez relativamente alta se comparada à cor verdadeira. Nesse diagrama, há a delimitação das regiões nas quais predominam os diferentes mecanismos de coagulação (Di Bernardo, 2002).

As informações obtidas através dos ensaios em “jartest” podem ser dispostas em diagramas de coagulação, no qual os valores da dosagem de coagulante, do pH de coagulação e da turbidez remanescente podem ser facilmente visualizados graficamente e então identificados o par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação” que conduziram aos melhores resultados na remoção da turbidez ou de outro parâmetro de interesse da massa líquida (Bartiko e Julio, 2015).

As partículas em suspensão na água, tais como, as partículas coloidais, substâncias húmicas e microrganismos em geral, dentre eles os oocistos de *Cryptosporidium* e os cistos de *Giardia*, apresentam-se como partículas de carga negativa. Os cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* podem se aderir às partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão (Medema *et al.*, 1998).

Partículas presentes na água bruta conferem turbidez e cor à água dos mananciais. Segundo a Portaria GMMS Nº 888 a turbidez é um parâmetro a ser observado para que haja garantia da qualidade da água para abastecimento público de forma que “havendo comprovação de que todos os filtros rápidos do sistema de tratamento produzam água com turbidez inferior a 0.3 uT, de maneira sistemática, dispensa-se a realização dos ensaios referentes aos indicadores de contaminação por patógenos como esporos de bactéria aeróbia” (Brasil, 2021). Tal recomendação evidencia a preocupação com a possível presença de patógenos de difícil remoção como oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*, na água filtrada, os quais podem estar associados à presença da turbidez da água filtrada, evidenciando a importância da melhoria na qualidade do efluente filtrado (Bastos, 2020; Keller *et al*, 2024; Oliveira *et al*, 2018).

Diagramas de coagulação obtidos por meio de ensaios de coagulação, floculação e sedimentação são ferramentas importantes na operação de estações de tratamento de água. O conhecimento da qualidade da água bruta associado aos fundamentos dos diagramas possibilitam que sejam tomadas decisões na otimização da coagulação (Costa, 2016).

O objetivo deste trabalho foi estudar o uso do diagrama de coagulação do sulfato de alumínio na região do mecanismo de varredura como ferramenta para otimizar a remoção de oocistos de *Cryptosporidium spp.* e cistos de *Giardia spp.* em águas para abastecimento.

Métodos

O manancial utilizado nesta pesquisa foi o Rio Jucu, classificado como classe 2 (Conama, 357 de 2005), o qual é fortemente impactado por atividades antrópicas, tais como, lançamento de resíduos sólidos domésticos, industriais e hospitalares nas margens do rio ou nas imediações com aterros inadequados. Esse manancial fornece água para a Estação de Tratamento de Água -Vale Esperança, do tipo ciclo completo, responsável por abastecer os municípios de Vitória, Vila Velha, Cariacica e Viana. O desenvolvimento do trabalho foi realizado em 4 etapas:

Etapa 1: Coleta e caracterização das águas do Rio Jucu.

A água do Rio Jucu foi coletada, em três épocas diferentes, diretamente na adutora da Estação de Tratamento de Água da Companhia Estadual de Saneamento (Cesan) localizada em Vale Esperança, Cariacica – ES. Em cada época, a água bruta coletada para estudo foi transportada em temperatura ambiente para o laboratório onde os ensaios foram realizados. A água bruta foi armazenada em caixa d'água de fibra de vidro de 500 litros, com tampa, por um período máximo de 10 dias, numa sala climatizada para que as características físico-químicas fossem mantidas por maior tempo possível. Antes dos ensaios em “jartest” para a construção dos diagramas de coagulação ou para os ensaios com inóculo, a água era homogeneizada.

Cada água coletada foi caracterizada objetivando a construção dos diagramas de coagulação e realização dos ensaios com inóculo de *Cryptosporidium* e *Giardia*. A caracterização físico-química da água bruta foi feita através das análises de pH, temperatura, turbidez, cor verdadeira e aparente, sólidos totais e voláteis, alcalinidade e ferro total, segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* - 21ª Edição (Apha, 2005).

A caracterização microbiológica foi feita através das análises de coliformes fecais e *Escherichia Coli* utilizando a metodologia de substrato cromo-fluorogênico conforme *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* - 21ª Edição (Apha, 2005) e da análise de detecção de protozoário segundo Vesey *et al.* (1993), onde colocou-se 10 litros de água bruta do Rio Jucu em um balão de 12 litros. Este método de concentração limita o volume da amostra a até 10 L. Em seguida, adicionou-se 100 ml de soluções de cloreto de cálcio e bicarbonato de sódio a 1%, nessa ordem, ajustando o pH para 10 com solução de hidróxido de sódio. Após um período de repouso (“overnight”) removeu-se o sobrenadante e o sedimento foi dissolvido com 200 ml de ácido sulfâmico a 10%. O balão foi lavado com 200 ml de solução Tween 80 a 0.01% e água destilada. O resultado da lavagem foi acrescentado ao sedimento dissolvido. A amostra foi concentrada (3x) por centrifugação com rotação de 3000 g por 10 min e o pellet final foi verificado anotando-se seu volume e ressus pendido em solução eluente (Tween 80 a 1%, SDS 1%, PBS 10 X) para ser armazenado a 4 °C até a leitura.

Etapa 2: Construção do diagrama de coagulação e definição dos pontos de estudo.

Os ensaios de “jartest” para construção dos diagramas de coagulação, semelhantes ao proposto por Amirtharajah e Mills (1982) e intensamente utilizado por Di Bernardo (2017) foram realizados utilizando o coagulante primário, Sulfato de Alumínio comercial ($Al_2(SO_4)_3 \times 18 H_2O$) por ser um dos coagulantes mais utilizados nas estações de tratamento de água e por ser o coagulante utilizado pela Cesan na ETA abastecida pelo Rio Jucu.

O equipamento de “jartest” utilizado nos ensaios foi o modelo 218-LDB. Os ensaios foram realizados variando-se a dosagem de sulfato de alumínio em função do pH de coagulação visando obter vários pontos definidos por pares de valores de “pH de coagulação x dosagem de coagulante”, adicionando-se hidróxido de sódio como alcalinizante, para variação do pH de coagulação.

Os parâmetros hidráulicos escolhidos para a realização dos ensaios de coagulação-floculação-sedimentação no mecanismo da varredura são dispostos na Tabela 1. Foram obtidos três diagramas de coagulação. Um para água coletada com turbidez relativamente baixa (água Tipo 1), outro para a água coletada com turbidez relativamente alta (água Tipo 2) e outro para água de turbidez intermediária (água Tipo 3). Cada ponto marcado no diagrama foi caracterizado, então, por três parâmetros distintos: dosagem de coagulante, pH de coagulação e turbidez

remanescente. Assim a partir do levantamento do maior número de pontos possível construiu-se as curvas de mesma turbidez remanescente, numa faixa de pH de coagulação variando entre 6 e 8, pois essa é faixa de pH recomendada por Amirtharajah e Mills (1982) para ocorrer a precipitação do hidróxido de alumínio, o que caracteriza o mecanismo da varredura.

Tabela 1. Parâmetros hidráulicos para a realização dos ensaios de Coagulação-Floculação-Decantação

Parâmetros hidráulicos utilizados nos ensaios de "jartest"	Valores
Tempo de mistura rápida (Tmr)	20 s
Gradiente de velocidade na mistura rápida (Gmr)	700 s ⁻¹
Tempo de floculação (Tf)	20 min
Gradiente medio de velocidade na floculação (Tf)	15 s ⁻¹
Velocidade de sedimentação	2 cm/min
Tempo de sedimentação	3.5 min

Após levantamento dos diagramas de coagulação foram escolhidos dois pontos definidos por (dosagem de coagulante x pH de coagulação). Na escolha dos pontos levou-se em consideração a remoção ótima da turbidez (ponto na região ótima da varredura) e uma remoção inferior a ótima (ponto fora da região ótima da varredura).

Etapa 3 -Ensaio com inóculos de protozoários

Para os ensaios com inóculo de (oo)cistos foram reproduzidos em "jartest" os dois pontos escolhidos nos diagramas de coagulação. Os inóculos foram identificados e quantificados por imunofluorescência direta, utilizando o kit Merifluor para detecção de *Cryptosporidium* /*Giardia* (Meridian Diagnostics, Inc, Cincinnati, Ohio), em que uma alíquota de 10µL da amostra concentrada é fixada, e nela acrescentado o reagente de detecção contendo uma mistura de anticorpos monoclonais com FITC (fluoresceína isotiocianato isómero 1- marcador) que se dirigem contra os antígenos da parede dos cistos e oocistos onde se ligam. Após os ensaios com inóculo, as cubas de "jartest" foram lavadas com Tween 80 a 0.01% e água destilada, o resultado dessa lavagem era acrescentado ao lodo de cada cuba.

A contagem do inóculo dos protozoários para os ensaios foi baseada apenas no número de oocistos de *Cryptosporidium* presentes em 10 µL do pool do Kit Meriflur, por isso a diferença de concentração entre o número de cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* do inóculo, como é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Números de (oo)cistos inoculados em cada ensaio de jarteste

Ensaio	<i>Cryptosporidium</i> (oocistos/L)	<i>Giardia</i> (cistos/L)
**	100000**	*
1	1000	143
2	1000	215
3	1000	228
4	1000	228
5	1000	228
6	1000	187

*Inóculo não considerado ** Ensaio preliminar

Etapa 4: Avaliação de sensibilidade da técnica de detecção

Teste de avaliação da sensibilidade da técnica empregada foi realizado para detecção de *Cryptosporidium spp.* e *Giardia spp.* em água. O inóculo dos cistos e oocistos purificados foi feito em 2L de água destilada e em 2L de água bruta. As concentrações utilizadas de (oo)cistos foram de 10^3 e 10^4 organismos/L para água destilada e 10^2 e 10^3 para água bruta. O número de cistos e oocistos para cada amostra de água bruta e amostras resultantes dos ensaios com inóculo foi obtido através da equação 1 (Palmateer *et al.*, 1996):

$$(\text{oo})\text{cistos/L} = \frac{\text{Média do N}^\circ \text{ de (oo)cistos contados} \times 100 \times \text{volume total do sedimento (mL)}}{\text{Volume total da amostra analisada (L)}} \quad \text{Equação (1)}$$

As lâminas foram preparadas em duplicata para cada amostra. Após a leitura das lâminas calculava-se a média, sendo as mesmas lidas por mais de um observador. As lâminas foram observadas em microscópio com epifluorescência modelo Axioplan da marca Carl Zeiss, utilizando objetivas de aumento de 200 x e 400 x. Preparou-se duas lâminas, com um volume de 10 μL , para cada amostra.

Resultados e discussões

Conforme Tabela 3, as águas coletadas no Rio Jucu apresentaram as seguintes características físico-químicas e biológicas. Destacaram-se os parâmetros de turbidez, cor, pH e alcalinidade. A turbidez do manancial variou conforme o período em que foram coletadas as amostras, não apresentando turbidez muito elevada. Uma parte da cor verdadeira pode ser atribuída à presença de ferro que apresentou valores consideráveis (2-3 mg/L), outra parte pode ser atribuída a decomposição da matéria orgânica ou devido a presença de resíduos industriais e de esgotos domésticos.

Tabela 3. Números de (oo)cistos inoculados em cada ensaio de "jarrest"

Características da água bruta Coletada no rio Jucu	Água com turbidez relativamente baixa (Água Tipo 1)	Água com turbidez relativamente alta (Água Tipo 2)	Água com turbidez relativamente baixa (Água Tipo 3)
pH	7	6	7
Temperatura (°C)	20	23	22
Turbidez (NTU)	17	69	39
Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)	22	20	20
Cor verdadeira (Uc ou mgPt/L)	41	53	94
Cor aparente (Uc ou mgPt/L)	130	402	247
Sólidos totais (mg/L)	*	142	124
Sólidos voláteis (mg/L)	*	39	55
Ferro total (mg Fe/L)	*	3	2
Coliformes totais (NMP/100ml)	1.07 x 10 ⁴	1.5x10 ⁵	6.5 x 10 ³
E. coli (NMP/100ml)	5.1 x10 ²	1.22x10 ³	5.34 x 10 ³
Oocistos/L	20	11	2.75
Cistos /L	Não encontrado	18	7

* Análises não realizadas.

Para as três águas estudadas o pH revelou-se neutro. Quanto à alcalinidade, verificou-se que este manancial apresentou valores em torno de 20 mg/L de CaCO₃, o que exigiu o uso de alcalinizante para controle do pH durante os ensaios em “jartest”. A alcalinidade influi consideravelmente na coagulação química, uma vez que os principais coagulantes primários comumente utilizados no Brasil (sulfato de alumínio e cloreto férrico) são doadores de prótons em solução. Assim, se a alcalinidade da água for baixa, a coagulação poderá exigir a adição de alcalinizante para ajuste do pH (Di Bernardo e Di Bernardo-Dantas, 2005). Dentre os parâmetros microbiológicos analisados, verificou-se a presença dos protozoários, *Cryptosporidium* e *Giardia* nas águas do Rio Jucu.

Os dados de *E. coli* e coliformes totais demonstram uma falta de conformidade com a Resolução Conama 357, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, sugerindo atenção dos órgãos públicos para os prejuízos à saúde da população.

Etapas 2- Construção dos diagramas de coagulação

Devido à variação das características físico-químicas do manancial, dentre elas a turbidez (17 a 69 NTU), fez-se vários ensaios para construir os três diagramas de coagulação, um para cada tipo de água coletada. A turbidez foi utilizada para a indicação das regiões de melhor remoção. Cada ponto marcado no diagrama foi caracterizado por três parâmetros distintos: a dosagem do coagulante, pH de coagulação e turbidez remanescente expressa em Unidade Nefelométrica (NTU). Esse levantamento resultou nos diagramas apresentados nas Figuras 1, 2, e 3 onde foram traçadas as curvas que delimitam regiões de mesma remoção de turbidez.

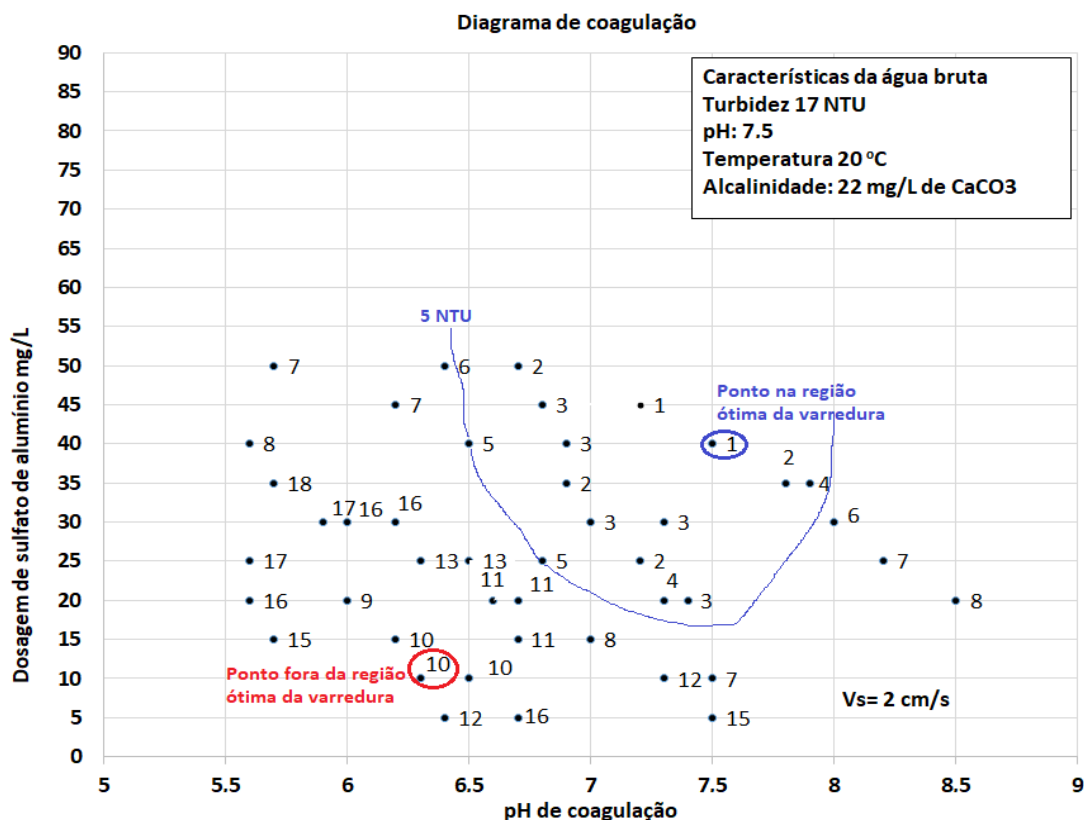


Figura 1. Diagrama de coagulação para Água com turbidez de 17 NTU. Água tipo 1

O diagrama da Figura 1, refere-se à água Tipo 1, com turbidez relativamente baixa, 17 NTU. A região de melhor remoção de turbidez nesse diagrama está localizada entre as dosagens de 20 e 50 mg/L e pH de coagulação entre 6.5 e 7.9, delimitada pela curva com valor de 5 NTU, que define a região ótima de coagulação na varredura.

Já o diagrama da Figura 2, refere-se à água com turbidez relativamente alta, 69 NTU, água Tipo 2. Nesse diagrama a região de melhor remoção da turbidez está localizada entre as dosagens de 25 e 60 mg/L e pH de coagulação entre 6.7 e 7.4. Região delimitada pela curva com valor de 10 NTU, que define a região ótima de coagulação na varredura.

No diagrama da Figura 3, construído para a água com turbidez, 36-42 NTU, água Tipo 3, a região de melhor remoção da turbidez está localizada entre as dosagens de 35 e 55 mg/L e pH de coagulação entre 6.4 e 6.9, aproximadamente. Região delimitada pela curva com valor de 10 NTU, que define a região ótima de coagulação na varredura. A Tabela 4 apresenta resumidamente as regiões de varredura definidas conforme os diagramas construídos para os três tipos de água.

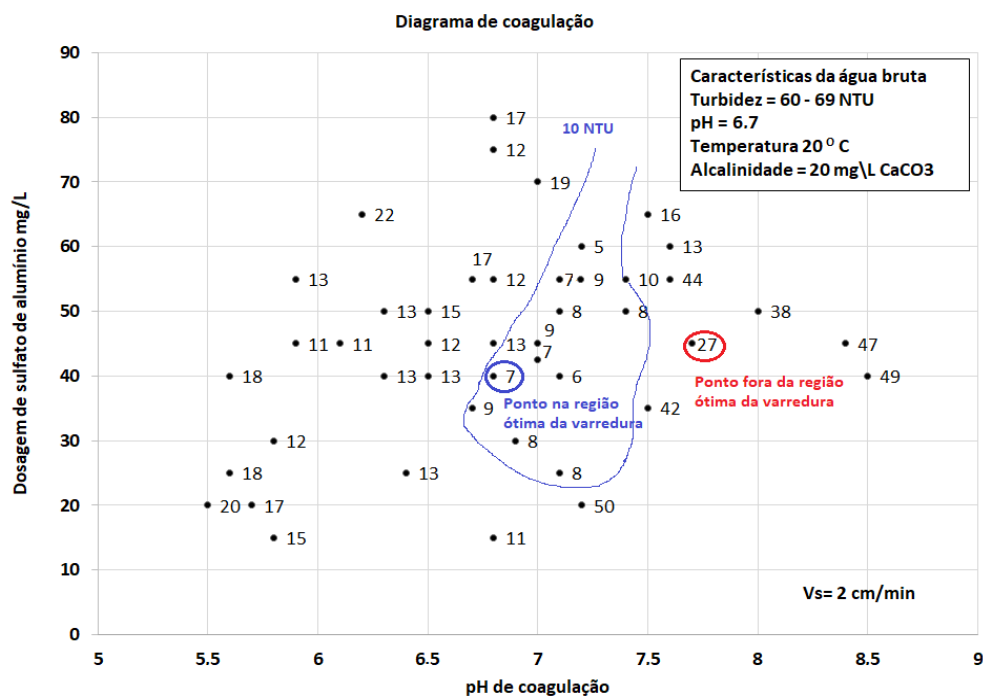


Figura 2. Diagrama de Coagulação para Água com turbidez de 60-69 NTU. Água tipo 2

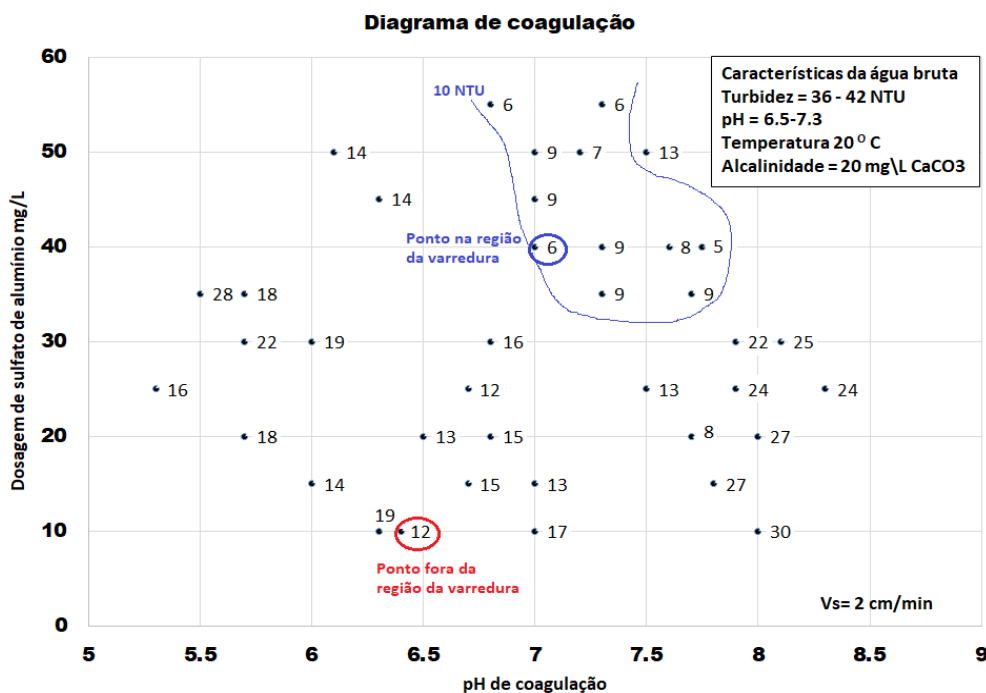


Figura 3. Diagrama de Coagulação para Água com turbidez de 36-42 NTU. Água tipo 3

Tabela 4. Regiões de varredura conforme diagramas de coagulação obtidos para os três tipos de água coletadas

Tipo de água	Turbidez da água bruta NTU	Dosagens de sulfato de alumínio (mg/L)	pH de coagulação
Tipo 1	17	20-50	6.5-7.4
Tipo 2	60-69	25-60	6.7-7.4
Tipo 3	36-42	35-55	6.4-6.9

A faixa de pH obtida nos diagramas das Figuras 1, 2 e 3 está dentro da recomendada por Amirtharajah e Mills (1982) que é de 6 a 8, para que ocorra a precipitação do hidróxido de alumínio, o que caracteriza o mecanismo da varredura. Vários outros pesquisadores obtiveram como resultados uma região caracterizada pelo mecanismo da varredura utilizando o sulfato de alumínio como coagulante, conforme relata Bof (2007). A Tabela 5 sintetiza os resultados obtidos por esses autores, e permite comparar os dados de sulfato de alumínio e pH de coagulação, que caracterizaram a varredura para diferentes águas segundo cada autor comparando-os com os dados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 5. Regiões de varredura segundo pesquisas realizadas com água sintéticas (S) e naturais (N)

Autor	Dosagem de sulfato de alumínio (mg/L)	pH de coagulação	Característica das águas estudadas				
			Turbidez uT	Cor real uH	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	pH da água bruta	Água
Amirtharajah, 1982	30	6.0-8.0					S
Mendes, 1992	40-80	6.4-7.8	200	5	30	7.5	S
Costa, 1992	10-12	6.3-7.2	200	6	31		S
Costa, 1995	20-100	6.5-7.3	70	60	10	6.5	N
Costa, 1995	20-27	6.4-6.7	17	24	11	6.8	N
Pavanelli, 2001	32-80	6.4-7.5	102	5	29	7.8	S
Costa, 2005	10-27	6.5-7.5	3	12	19	6.9	N
Esta pesquisa	20-60	6.4-7.4	17- 69	41-94	20-22	6-7	N

Fonte: Bof (2007) modificada.

As faixas de pH obtidas pelos autores citados na Tabela 5, tanto para águas sintéticas quanto para águas naturais são praticamente as mesmas obtidas com as águas coletadas no Rio Jucu, conforme apresentado na Tabela 4 e 5 e nos diagramas das Figuras 1, 2 e 3.

Etapa 3 -Ensaio com inóculos de protozoários

Após levantamento dos diagramas de coagulação foram escolhidos dois pontos definidos por (dosagem de coagulante x pH de coagulação), para realização de ensaios com inóculos de protozoários, para cada diagrama construído. Na escolha do primeiro ponto levou-se em consideração a remoção ótima da turbidez (ponto na região ótima da varredura) e na escolha do segundo ponto considerou-se uma remoção inferior à ótima (ponto fora da região ótima da varredura), conforme diagramas das Figuras 1, 2 e 3.

Novos ensaios de “jartest” então foram realizados, dessa vez, com inóculo de *Cryptosporidium* de 10^5 oocistos /L, reproduzindo os pontos escolhidos no diagrama da Figura 1. O ponto 1 (dosagem = 40 mg/l X pH 7.6) situado na região ótima de varredura com turbidez remanescente de 1.0 NTU e o ponto 2 (dosagem = 10 mg/l X pH 6.2) localizado fora da região ótima da varredura. Nestes ensaios considerou-se o inóculo apenas de *Cryptosporidium* e em quantidade superior à dos ensaios posteriores a fim de verificar o procedimento e metodologia que seria utilizada.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos nesse ensaio, onde se observa que o ponto 1 produziu uma água decantada com uma eficiência de remoção de turbidez de 93.82 %. Foram detectados no lodo 80.000 oocistos, o que representa 80% dos oocistos semeados na água bruta. A boa formação do floco permitiu sua sedimentação mais eficiente "varrendo" os oocistos para o lodo. Bustamante *et al* 2001 estudaram a interação entre oocistos de *Cryptosporidium* e coagulantes no tratamento de água e verificaram que a coagulação por varredura, onde os oocistos são englobados durante a formação dos flocos, é o mecanismo de coagulação mais envolvido na remoção desses organismos.

Tabela 6. Resultados do “Jartest” com Inóculo na água tipo 1

Teste com Inóculo de <i>Cryptosporidium</i> (10^5 oocistos/ L)				
	P Ponto 1 Dosagem de coagulante 40mg/L x pH 7.6		Ponto 2 Dosagem de coagulante 9mg/L x pH 6.3	
	Turbidez Remanescente (NTU)	Oocistos/L	Turbidez Remanescente (NTU)	Oocistos/L
Água decantada	1	400	10	264
Lodo	Não avaliado	80.000	Não avaliado	13.000
% remoção de turbidez	93.82%	N.A.	40%	N.A.

*N.A. - Não Aplicável

O ponto 2 apresentou baixa eficiência na remoção de turbidez, produzindo água decantada com turbidez de 10 NTU o que representa uma eficiência de remoção de turbidez de apenas 40 %. Quanto à detecção de *Cryptosporidium*, observou-se que apenas 13.000 (13%) dos oocistos semeados foram detectados no lodo.

Após o levantamento do diagrama da Figura 2 foram realizados ensaios de “jartest” com inóculo de *Cryptosporidium* (10^3 oocistos/L) e *Giardia* (143 cistos/L) em água com turbidez variando entre 60 e 69 NTU. Assim, foram escolhidos, no diagrama da Figura 2, dois pontos (dosagem de coagulante x pH de coagulação), um ponto na região ótima do mecanismo de varredura (42.5 mg/l x pH 7.0) com turbidez remanescente de 7 NTU e outro ponto fora da região ótima da varredura (45 mg/l x pH 7.65) com turbidez remanescente de 27 NTU. Os resultados dos ensaios de “Jartest” com inóculo na água tipo 2 estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados do “Jartest” com Inóculo na água tipo 2

Teste com Inóculo de <i>Cryptosporidium</i> (10^3 oocistos/ L) e <i>Giardia</i> (143 cistos / L)				
	Ponto 1 Dosagem de coagulante (42.5 mg/l x pH 7.0)		Ponto 2 Dosagem de coagulante (45mg/l x pH 7.65)	
	Oocistos/L	Cistos/L	Oocistos/L	Cistos/L
Água decantada	42.85	NO	NO	NO
Lodo	667	66	300	NO
% remoção de turbidez	88.33%		45%	

* NO: Não observado

Nos ensaios com inóculo de *Cryptosporidium* e *Giardia* observou-se uma remoção de turbidez de 88.33% e a detecção no lodo, de cerca de 70% (666.67 ooc./L) dos oocistos de *Cryptosporidium* inoculados. Na água decantada foram encontrados 4.2% (42.85 ooc/L). Quanto à detecção de cistos de *Giardia*, observa-se que 46 % dos cistos inoculados (66 cistos/L) foram detectados no lodo quando se utilizou o ponto na região de ótima de coagulação.

O ponto fora da região ótima do mecanismo de varredura resultou numa remoção de turbidez de 45% (64 NTU para 27NTU). Porém, quando analisado o número de oocistos detectados no lodo, observa-se que apenas 300 dos 1000 oocistos semeados por litro foram identificados, o que representa apenas 30 % dos oocistos inoculados.

Na água decantada, nenhum oocisto foi visualizado. Não se observou cistos de *Giardia* no lodo ou na água decantada. Embora não tenham sido observados, não se pode afirmar a ausência total

desse organismo já que o método de detecção apresenta limitações, como ausência de uma etapa de separação entre os (oo) cistos e das partículas sólidas. Outra observação importante é a característica hidrofóbica dos cistos de *Giardia*, segundo Hayes 2002, essa característica pode contribuir para a baixa recuperação desses cistos. Isto foi observado quando se utilizou o ponto dentro da região ótima de atuação do mecanismo de varredura, onde a recuperação dos cistos foi de apenas 46%.

Da mesma forma que foram escolhidos pontos nos diagramas das Figuras 1 e 2, foram escolhidos os pontos no diagrama da Figura 3 para realização de novos ensaios de “jartest” com inóculo de *Cryptosporidium* (10^3 oocistos/L) e *Giardia* (215 cistos/L), em água com turbidez variando entre 36 e 42 NTU. Os pontos escolhidos foram um ponto na região ótima do mecanismo de varredura (40 mg/l x pH 7.0) com turbidez remanescente de 6 NTU e outro ponto fora da região ótima da varredura (10 mg/l x pH 6.4) com turbidez remanescente de 12 NTU. Os resultados dos ensaios de “Jartest” com inóculo na água do tipo 3 estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados do “Jartest” com Inóculo na água tipo 3

Teste com Inóculo de <i>Cryptosporidium</i> (10^3 oocistos/ L) e <i>Giardia</i> (215 cistos / L)				
	Ponto 1 Dosagem de coagulante (40 mg/l x pH 7.0)		Ponto 2 Dosagem de coagulante (10 mg/l x pH 6.4)	
	Oocistos/L	Cistos/L	Oocistos/L	Cistos/L
Água decantada	NO	NO	NO	NO
Lodo	22.5	7.5	17.5	5
% remoção de turbidez	83.78		67.57	

* NO: Não observado

A Tabela 8 nos mostra que nos ensaios com inóculo de *Cryptosporidium* e *Giardia* observou-se uma remoção de turbidez de 83.78% e a detecção no lodo, de cerca de 2.25% (22.5 ooc./L) dos oocistos de *Cryptosporidium* inoculados. Na água decantada não foram encontrados oocistos e cistos. Quanto à detecção de cistos de *Giardia*, observa-se que 3.48% dos cistos inoculados (7.5 cistos/L) foram detectados no lodo quando se utilizou o ponto na região de ótima de coagulação.

O ponto fora da região ótima do mecanismo de varredura resultou numa remoção de turbidez de 67.57% (37 NTU para 12 NTU). Mais uma vez não se pode afirmar a ausência total desses organismos, pois o método de detecção apresenta limitações como já descrito anteriormente.

A baixa detecção de (oo)cistos no lodo deve-se à dificuldade de visualização no microscópio, agravada pela presença de hidróxido de alumínio em gel, ausência de testes confirmatórios e fragilidades no método de concentração das amostras. Essas limitações impedem a liberação completa dos (oo)cistos, que permanecem agregados aos flocos, aumentando a turbidez e dificultando a análise por imunofluorescência (MULLER, 1999).

Al-Ani *et al.* (1986) e Bellamy *et al.* (1993) demonstraram a importância da coagulação e dosagem ótima do coagulante no tratamento de ciclo completo, a melhoria da remoção de turbidez implicou na melhoria da remoção de cistos de *Giardia* de 95% para 99.9%. Stancari e Correia (2010) também observaram que a utilização das etapas de coagulação-floculação-decantação no tratamento de ciclo completo favoreceu a retenção dos cistos, diminuindo a probabilidade de passagem da contaminação da água bruta para a água tratada.

Etapa 4: Avaliação de sensibilidade da técnica de detecção

A água bruta utilizada para avaliação da sensibilidade da técnica de concentração e detecção de *Cryptosporidium spp.* e *Giardia spp.* apresentou, em média, as seguintes características físico-químicas: Turbidez de 47 NTU, Cor aparente de 195 uC e pH de 7.0.

Foram realizados ensaios para avaliação da sensibilidade da Técnica de concentração e detecção de protozoários por precipitação por Carbonato de Cálcio (Vesey *et al.*, 1993) em água destilada e água bruta do Rio Jucu. Dessa forma foram realizados 5 ensaios com inóculo de *Cryptosporidium* e *Giardia* ($10^2/L$, $10^3/L$ e $10^4/L$) que apresentaram os resultados descrito na Tabela 9.

Tabela 9. Resultado dos testes de sensibilidade utilizando-se a técnica de precipitação por carbonato de cálcio em água destilada e em água bruta

Teste de sensibilidade - % de recuperação							
Água destilada				Água bruta do Rio Jucu			
<i>Cryptosporidium</i>		<i>Giardia</i>		<i>Cryptosporidium</i>		<i>Giardia</i>	
10^3	10^4	10^3	10^4	10^2	10^3	10^2	10^3
5.5% - 51.7%	16.71%- 59%	8.24%- 45%	20.26% - 88%	12.5%- 54%	3.3%- 12.6%	13%- 30%	1% - 40%

Verifica-se que o intervalo de recuperação de *Cryptosporidium* em água destilada, com inóculo de $10^4/L$, variou de 16.71% a 59% e para *Giardia* essa recuperação variou de 20.26% a 88%. Stancari e Correia (2010) verificaram uma recuperação média de 29.2% para o inóculo de *Cryptosporidium*. Para *Giardia* a média de recuperação foi de 55.3%. Portanto, essa pesquisa confirmou essa faixa de recuperação.

Em água bruta com inóculo de 10^2 (oo)cistos/L, verificou-se uma variação de 12.5 % a 54% na recuperação de oocistos de *Cryptosporidium* e de 13% a 30% na recuperação dos cistos de *Giardia*. Para análise em água bruta, Stancari e Correia (2010) não detectaram *Cryptosporidium* e a recuperação de cistos de *Giardia*, em percentagem foi semelhante ao encontrado nessa pesquisa, 13%.

Segundo Vesey *et al* (1993) esta técnica apresenta uma recuperação para *Cryptosporidium* em água deionizada, água de torneira e água de rio, maior do que 68%. Na literatura, a eficiência de recuperação relatada está em torno de 30,0% a 40,0% (Franco *et al*, 2012). Nessa pesquisa a porcentagem de recuperação, em água destilada e em água bruta de rio foi no máximo de 59%. Considerando as dificuldades da técnica, a diferença entre os resultados obtidos por Vesey *et al*, (1993) e a atual pesquisa não foram significativos.

Conclusão

A construção de diagramas de coagulação mostra que operar na região ótima de coagulação por varredura melhora significativamente a remoção de turbidez e de (oo)cistos de protozoários. Nessa região, os flocos formados são maiores e mais pesados, permitindo melhor sedimentação, com remoção de turbidez superior a 80% e recuperação de oocistos de *Cryptosporidium* acima de 70% e cistos de *Giardia* acima de 40%. Fora da região ótima, esses índices caem drasticamente. A dificuldade na detecção de (oo)cistos evidenciou limitações no método de concentração utilizado. O estudo demonstrou que a remoção de turbidez está diretamente ligada à eficiência na remoção de protozoários, destacando a importância dos diagramas de coagulação para o tratamento de água de abastecimento.

Referencias bibliográficas

- Al-Anil, M.Y., Hendricks, D.W., Logsdon, G.S., Hibler, C.P. (1986) Removing Giardia cysts from low turbidity waters by rapid rate filtration. *Journal of the American Water Works Association*, **78**(5):66-73. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1986.tb05746.x>
- Amirtharajah, A., Mills, K.M. (1982) Rapid-mix design for mechanism of alum coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, **74**(4): 210-216. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1982.tb04890.x>
- Appha, Awwa, Wef. (2005) *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21 ed. Washington - DC. 1288 pp.
- Bartiko, D., Julio M. (2015) Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. *Revista. Ambiente. Água* **10**(1) 71-81. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1239>
- Bastos, R. K. X. (2020). A norma brasileira de qualidade da água para consumo humano em revisão—um convite à reflexão sob a ótica dos direitos. www.ondasbrasil.org

- BOF, J. G. (2007) *Remoção de turbidez e de fitoplancton por meio de sedimentação e da flotação, com base no diagrama de coagulação do sulfato de alumínio: avaliação de escala de bancada*, Dissertação de mestrado Programa de pós -graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, 138 pp.
- Bourli A. P., Eslaihib A.V., Tzorakia O. Karanis, P. (2023) Waterborne transmission of protozoan parasites: a review of worldwide outbreaks – an update 2017–2022. *Journal of Water and Health* **21**(10): 1421–1447. <https://doi.org/10.2166/wh.2023.094>
- Brasil (2017) *Portaria de consolidação No 5*, de 28 de setembro de 2017. *Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do sistema único de saúde*. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro, Diário Oficial União. 29 set 2017.
- Brasil (2021) *Portaria Nº 888*, de 04 de maio de 2021. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro, Brasília. Publicado em: 07/05/2021. Edição: 85 , Seção: 1, Página: 127.
- Bellamy, W.D., Cleasby, J.L., Logsdon, G.S. and Allen, M.J. (1993), Assessing Treatment Plant Performance. *Journal - American Water Works Association*, **85**, 34-38. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1993.tb06116.x>
- Bustamante, H. A., Shanker, S. R., Pashley, R. M., & Karaman, M. E. (2001). Interaction between *Cryptosporidium* oocysts and water treatment coagulants. *Water research*, **35**(13), 3179-3189.
- Conama, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005) *Resolução 35, de 17 de março de 2005*.
- Costa, E.R.H. (2016) Coagulation diagrams as an essential tool for reducing costs with chemicals in Water Treatment Plants (WTP's). *La Asociación Colombiana de Ingeniería sanitaria y Ambiental (ACODAL) y La Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)*. Cartagena-Colombia.
- Di Bernardo, L., Di Bernardo, A., Centurione Filho, P.L. (2002) *Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água*. ISBN-85-876552-31-3. São Carlos
- Di Bernardo, L. (2003). *Tratamento de Água para abastecimento por filtração Direta*. ABES, Projeto PROSAB. Ed. RiMa. Rio de Janeiro. 498 pp.
- Di. Bernardo, L., Dantas-Di Bernardo, Â. (2005) *Métodos e Técnicas de tratamento de água*. ISBN-85-7656-066-6, Vol.1 2ª ed. RiMa.São Carlos.792 pp.
- Di Bernardo L, Dantas-Di Bernardo, Â., Voltan, P.E. N. (2017) *Métodos e Técnicas de tratamento de água*. ISBN: 978-85-62324-05-5 LDiBe Editora. São Carlos. 1246 pp.
- Franco, R. M. B., Hachich, E. M., Sato, M. I. Z. S., Naveira, R. M. L., Silva, E. D. C., Campos, M. M. D. C., Neto, R. C., Cerqueira, D. A., Branco, N., & Leal, D. A. G. (2012). Performance evaluation of different methodologies for detection of *Cryptosporidium* spp. and *Giardia* spp. in water for human consumption to meet the demands of the environmental health surveillance in Brazil. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, **21**(2), 233–242.
- Grott, S. C., Hartmann, B., Filho, H. H. da S., Franco, R. M. B., & Goulart, J. A. G.. (2016). Detecção de cistos de *Giardia* spp.. e oocistos de *Cryptosporidium* spp.. na água bruta das estações de tratamento no município de Blumenau, SC, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, **11**(3), 689–701. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1853>
- Hayes, M. A. (2002). *Surface charge characteristics of Cryptosporidium parvum and Giardia lamblia* (Doctoral dissertation, MS Thesis. University of Idaho, Moscow, ID).
- Keller, R. D. P., Santos, R., Covre, M. A., Coelho, E. R. C. (2024). Occurrence of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts in public water supplies in Vitória, ES, Brazil. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, **29**, e20230065. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220230065>
- Medema, G. J., Schets, F. M., Teunis, P. F. M., & Havelaar, A. H. (1998). Sedimentation of free and attached *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts in water. *Applied and Environmental Microbiology*, **64**(11), 4460-4466. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.11.4460-4466.1998>
- Muller, A. P. B. (1999). *Detecção de oocistos de Cryptosporidium, spp, em águas de abastecimento superficiais e tratadas da região metropolitana de São Paulo*, Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- Oliveira, K. C., Bastos, R. K. X., Silva, C. V. D. (2018). Esporos de bactérias aeróbias são bons indicadores da eficiência do tratamento de água? Um estudo exploratório. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **23**(06), 1103-1109. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018151590>
- Palmateer, G., Aldom, J., Chagla, A., Boleszczuk, P., Brodsky Y, M., & Langridge, M. U. (1996). Field investigation for the detection of Cryptosporidium oocysts and Giardia cysts using a membrane filter dissolution method. In *Annual Conference Water Research*.
- Silva, D. P. da ., Reis, Y. de P. dos ., Bezerra, N. R., Scalize, P. S., Carneiro, L. C.. (2021). Risk to human health from protozoan (oo)cysts in water treatment plants. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, **26**(5), 845–854. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210030>
- Stancaril, R. C. A., Correia, M. (2010). Detecção de oocistos de *Cryptosporidium spp.* e cistos de *Giardia spp.* em mananciais e águas de abastecimento público. *Revista Do Instituto Adolfo Lutz*, **69**(4):453–460. <https://doi.org/10.53393/rial.2010.v69.32601>
- Vesey, G., Slade, J.S., Byrne, M., Shepherd, K, Fricker, C.R. (1993). A new method for the concentration of Cryptosporidium oocysts from water. *Journal of Applied Bacteriology*, **75**, 82-86. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1993.tb03412.x>