

AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE ASSOCIADA À QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO EM CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

RISK ASSESSMENT TO HEALTH ASSOCIATED TO WATER QUALITY FOR HUMAN SUPPLY OF CAMPINA GRANDE CITY, PARAÍBA STATE

Igor Souza Ogata

Engenheiro sanitaria e ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Professor da UEPB.

Rui de Oliveira

Engenheiro civil pela Escola de Engenharia do Maranhão. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). PhD em Engenharia Civil pela Universidade de Leeds. Professor da UEPB.

Celeide Maria

Belmont Sabino Meira

Arquiteta e engenheira civil pela UFPB. Mestre em Engenharia Civil pela UFPB. Doutora em Recursos Naturais pela UFCG. Professora da UEPB.

Ruth Silveira

do Nascimento

Engenheira civil pela UFPB. Licenciatura plena em Matemática pela UEPB. Mestre em Engenharia Civil pela UFPB. Doutora em Recursos Naturais pela UFCG. Professora da UEPB.

Juscelino Alves Henriques

Engenheiro sanitaria e ambiental pela UEPB. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela UFCG. Doutorando em Saneamento pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) – *Campus Ibatiba*.

Endereço para correspondência:

Igor Souza Ogata – Rua Coronel João Figueiredo, 78 – Bodocongó – 58430-180 – Campina Grande (PB) – Brasil – E-mail: igor_ogata@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho realizou uma avaliação de risco da qualidade da água da rede de distribuição de Campina Grande, Paraíba, nordeste do Brasil, por meio do método da Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (FMEA). A amostra foi composta por oito pontos ao longo da rede de distribuição, tendo sido analisados os indicadores sentinelas — cloro residual livre (CRL) e turbidez — e mais quatro indicadores auxiliares — cloro residual combinado (CRC), cor, pH e bactérias heterotróficas. Utilizando todos os indicadores, seis pontos foram classificados como de risco baixo e dois como de risco moderado. Analisando apenas os riscos relacionados aos indicadores sentinelas, três pontos foram classificados como de risco baixo, três como de risco desprezível, um como de risco moderado e um como de risco alto, tendo esses indicadores apresentado melhor adequação metodológica. A ausência de CRL no ponto de risco alto foi o principal fator para tal classificação.

Palavras-chave: vigilância da qualidade da água; água para consumo humano; avaliação de risco; metodologia FMEA.

ABSTRACT

This paper describes a water quality risk assessment based on the application of Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) methodology conducted at the water distribution network of Campina Grande city, Paraíba state, northern Brazil. Both sentinel indicators — free residual chlorine (FRC) and turbidity — and four auxiliary indicators — combined residual chlorine (CRC), color, pH and heterotrophic bacteria — were analyzed in water samples collected at eight monitoring points throughout the distribution network. Based on data of all these water quality indicators, six of these points were classified as low risk and two as moderate risk ones, but, considering only the sentinel indicators, three points were classified as low risk, three as negligible risk, one as moderate risk and one as high risk, being these indicators considered as performing better methodological adequacy. The absence of FRC in the high-risk point was the main factor for such a classification.

Keywords: surveillance of water quality; water for human consumption; risk assessment; FMEA methodology.

INTRODUÇÃO

A análise de risco é uma metodologia que compreende a avaliação, o gerenciamento e a comunicação de risco (BASTOS *et al.*, 2009; CARMO *et al.*, 2008). A avaliação quantitativa de risco envolve a identificação de perigos, a avaliação da dose-resposta, a avaliação da exposição e a caracterização do risco. No gerenciamento, devem ser realizadas ações para minimizar, eliminar e/ou mitigar os riscos avaliados. Por fim, na comunicação são informados às partes interessadas os riscos provenientes de determinada situação.

Nesse aspecto, a operação rotineira de um sistema de abastecimento de água (SAA) está sujeita a eventos que podem resultar na introdução — ou na remoção — de perigos na cadeia produtiva de água para consumo humano. Dentre esses eventos perigosos, podem ser citados: a alteração da qualidade do manancial — por ação natural ou antrópica —, a pressão negativa no sistema de distribuição, os vazamentos nas tubulações, a introdução de contaminantes na rede de distribuição, a operação inadequada da estação de tratamento, a manutenção deficiente, as más condições das instalações prediais e a reservação incorreta (BRASIL, 2006c).

Dessa forma, segundo Carmo *et al.* (2008), tornam-se necessários o controle e a vigilância da qualidade da água a fim de garantir que o padrão de potabilidade seja atendido até a utilização da água pelo consumidor. De acordo com a Portaria n.º 2.914 (BRASIL, 2011) do Ministério da Saúde (MS), controle e vigilância da qualidade da água são atividades exercidas para avaliar se a água fornecida à população apresenta risco à saúde, sendo o controle realizado pelo responsável pelo serviço de abastecimento, e a vigilância, pela autoridade de saúde pública.

Para executar o controle e a vigilância da qualidade da água, devido à quantidade de parâmetros do padrão de

potabilidade, é importante eleger indicadores que expressem precocemente a situação da água de maneira ágil, barata e representativa. Esses indicadores podem ser classificados como sentinelas e auxiliares.

Segundo o MS (BRASIL, 2006a), os indicadores sentinelas para controle e vigilância da qualidade da água são o cloro residual livre (CRL) e a turbidez, e têm como principal objetivo conferir condições de identificação precoce de situações de risco, principalmente em relação a doenças de veiculação hídrica. Por sua vez, os indicadores auxiliares não têm um conjunto padronizado, mas a “Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada à Qualidade da Água para Consumo Humano” (BRASIL, 2006a) sugere a escolha desses em relação às características do SAA. Neste trabalho, foram escolhidos o cloro residual combinado (CRC), a cor, o pH e as bactérias heterotróficas.

A vigilância geralmente ocorre por meio de análises físicas, químicas e microbiológicas, em pontos vulneráveis da rede, com uma frequência alta, gerando um banco de dados que, se devidamente sistematizado e analisado, constitui importante subsídio para a necessária avaliação de risco à saúde associada ao abastecimento de água (BRASIL, 2006c).

Portanto, a avaliação de risco pela sua capacidade em quantificar perigos torna-se uma ferramenta singular na realização da proposta deste trabalho, a qual constituiu-se na apresentação dos riscos à saúde associados à água distribuída por rede na cidade de Campina Grande, Paraíba, nordeste do Brasil. Foi possível, inclusive, classificar as áreas da rede distribuidora, segundo o grau de risco.

MATERIAIS E MÉTODOS

A rede de distribuição de água da cidade de Campina Grande tem uma extensão de 1.216 km, estando dividida em quatro zonas de pressão — A, B, C e D —, das quais as zonas A e D são independentes entre si e as zonas B e C estão provisoriamente interligadas por razões de manutenção e troca de tubulações na zona B (SOU-

ZA, 2010). Há, no sistema, canalizações de diversos materiais — desde ferro fundido e cimento amianto até policloreto de vinila (PVC) — e de diferentes idades — ligações domiciliares muito recentes e outras quase centenárias —, não sendo possível, neste trabalho, um levantamento minucioso desses aspectos.

Foram definidos oito pontos de amostragem, contemplando as quatro zonas de pressão, com base na “Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância em Saúde

Descrição de procedimentos analíticos

Os procedimentos analíticos seguiram as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WPCF, 2012), sendo as análises realizadas em triplicata. Os indicadores analisados foram: CRL, turbidez, CRC e pH — realizados

Estatística e classificação dos dados

O tratamento estatístico dos dados dos indicadores analisados fundamentou-se na remoção dos *outliers* por meio do método de Grubbs ($P_{0,05}$) (ROHLF & SOKAL, 1995), com a finalidade de ajustar os dados à distribuição normal. Esse método foi necessário para eliminar os erros de medição, do método de análise ou inerentes da população analisada, que impossibilitava a representação por medidas de tendência central.

Em seguida, foi procedido o cálculo da média aritmética a fim de representar o conjunto amostral de cada indicador para cada ponto de amostragem. A medida de tendência central foi necessária para realizar a categorização dos dados por meio de classes baseadas no padrão de potabilidade da Portaria nº 518/2004 do MS — Portaria vigente durante a realização do trabalho, mas revogada pela Portaria nº 2.914/2011 do MS — (BRASIL, 2004), pois para execução do método

de Ambiental Relacionada à Qualidade da Água para Consumo Humano” (BRASIL, 2006a); a localização dos pontos de amostragem está disposta na Tabela 1 e Figura 1.

in loco — e bactérias heterotróficas e cor — realizados no Laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Foram efetivadas 30 análises para cada indicador, distribuídas semanalmente entre abril e novembro de 2010.

proposto neste trabalho as médias necessitariam estar normalizadas, ou seja, adimensionais.

Portanto, em uma faixa da concentração mínima ao valor máximo permitido pelo padrão de potabilidade, 6 classes equitativas foram criadas e representadas por valores de 0 a 5, dos quais, sempre, o maior valor é associado às situações menos favoráveis para a qualidade da água, enquanto que o menor valor é associado às situações mais favoráveis. Os indicadores com valores máximos e mínimos — CRL e pH —, permitidos na Portaria nº 518/2004 do MS (BRASIL, 2004), tem categorias distintas para cada valor. A Figura 2 mostra todas as categorias criadas para todos os indicadores.

Como não existe um parâmetro para CRC na Portaria nº 518/2004 do MS (BRASIL, 2004), foi, então, considerado o padrão para monocloramina.

Tabela 1 – Localização dos pontos georreferenciados de amostragem.

Ponto	Localização	Coordenadas UTM – SAD69/24S
P1 – Universidade Estadual da Paraíba	Bodocongó (ZP D)	178.190m E / 9.201.768m N
P3 – E.E.E.F.M. Severino Cabral	Bodocongó (ZP D)	177.630m E / 9.200.169m N
P4 – Escola Municipal Ana Azevedo	Bairro das Nações (ZP C)	181.964m E / 9.203.638m N
P5 – Vila Olímpica Plínio Lemos	José Pinheiro (ZP B)	182.987m E / 9.200.893m N
P6 – E.E.E.F.M. Solon de Lucena	Centro (ZP C)	181.709m E / 9.201.468m N
P7 – E.E.E.F.M. Monte Carmelo	Bela Vista (ZP A)	179.360m E / 9.200.757m N
P8 – E.E.E.F.M. Clementino Procópio	São José (ZP B)	180.784m E / 9.200.398m N
P9 – E.E.E.F.M. Félix Araújo	Liberdade (ZP A)	180.454m E / 9.198.406m N

E.E.E.F.M.: Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio; ZP: zona de pressão; UTM: Universal Transversa de Mercator; m: metros; E: leste; N: norte.

Avaliação de risco (metodologia Análise dos Modos e Efeitos de Falhas)

A Análise dos Modos e Efeitos de Falhas (FMEA), segundo Stamatis (2003) e Nascimento & Oliveira (2011), é uma metodologia de avaliação de risco que estuda os possíveis modos de falha de sistemas e os efeitos causados por esses. Ela é muito aplicada em sistemas industriais, devido à sua simplicidade e flexibilidade, e, de acordo com Toledo & Amaral (2006), deve ser realizada por equipe multidisciplinar. A equipe discute os perigos associados a um determinado processo e preenche um formulário contendo os efeitos, as causas, as medidas mitigadoras e a quantificação desses riscos. A quantificação é baseada em quatro critérios — severidade, ocorrência, detecção e abrangência —, e, por fim, os

valores desses critérios são multiplicados, gerando um resultado que caracteriza o risco total do processo avaliado (SPIESMAN & SPEIGHT, 2014; VIANA, 2011).

O formulário FMEA descreve os perigos identificados na rede de distribuição da cidade de Campina Grande, o tipo do perigo, o efeito, a causa, as medidas mitigadoras e os critérios de quantificação do risco.

Os perigos foram levantados com base nos indicadores estudados em cada ponto de amostragem, bem como nos padrões recomendados pela Portaria nº 518/2004. Sendo assim, os eventos perigosos listados foram rela-

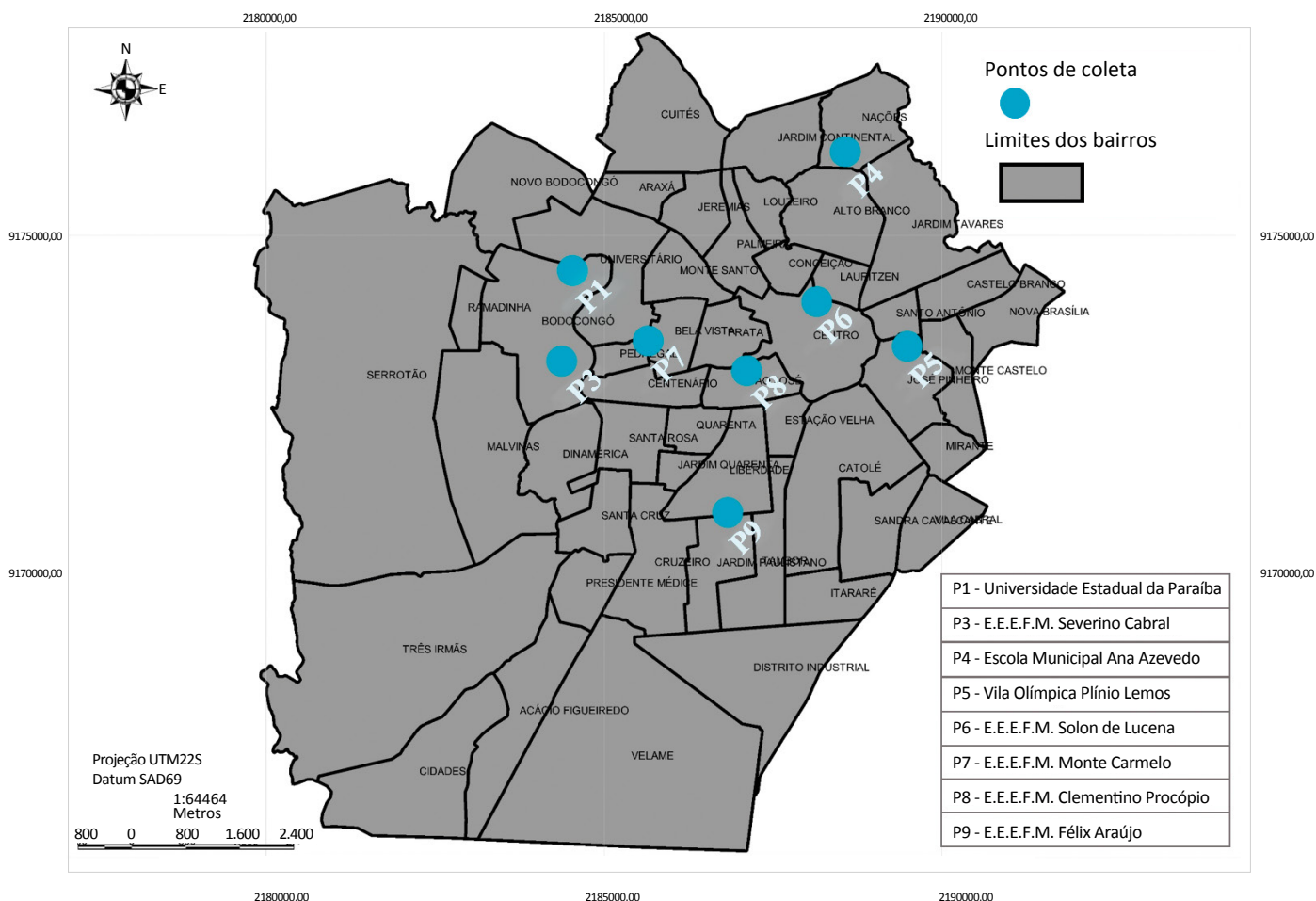


Figura 1 – Espacialização dos pontos de amostragem na área urbana de Campina Grande.

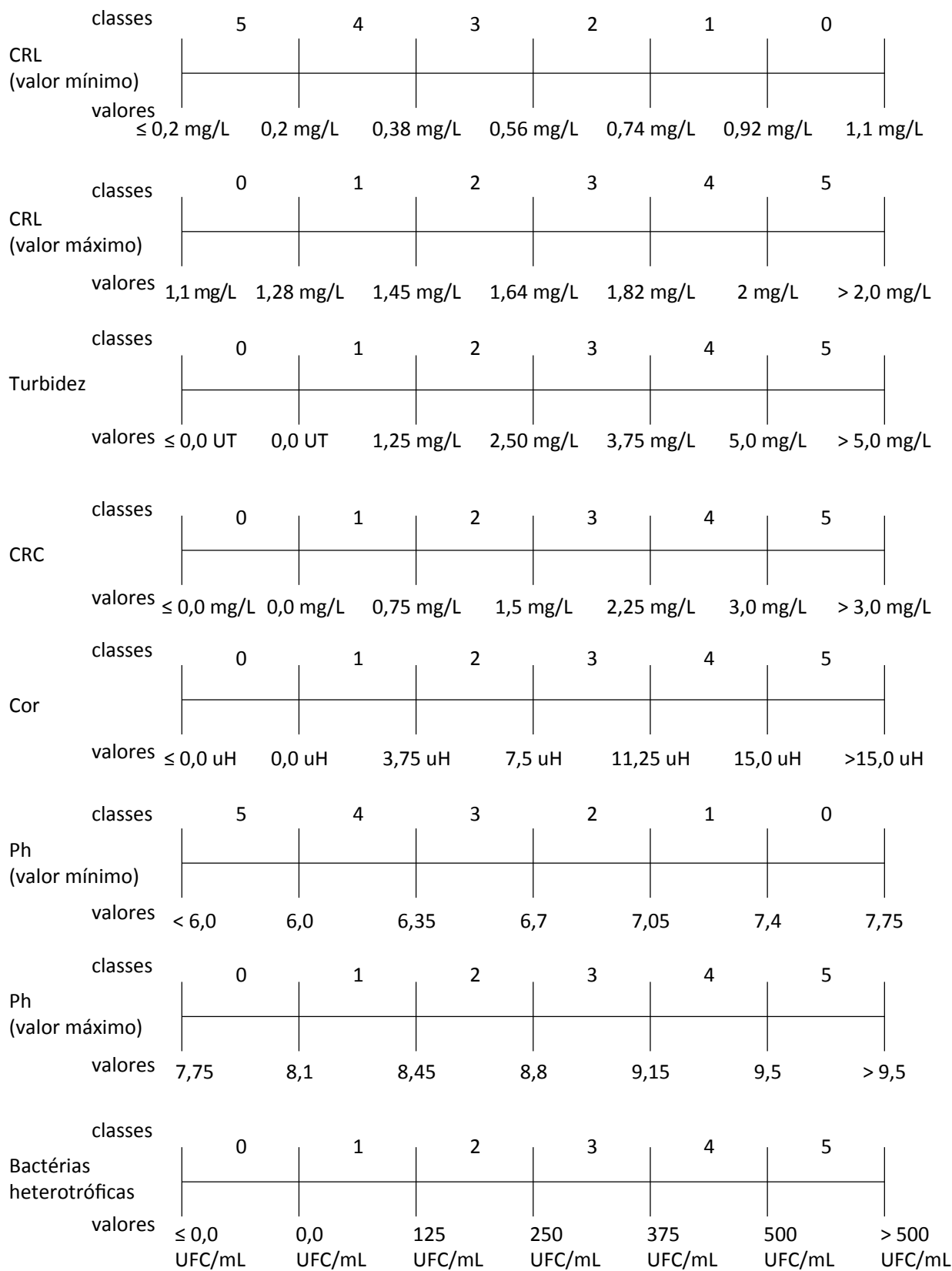


Figura 2 – Classes e valores da categorização dos indicadores.

cionados à baixa concentração de CRL, à alta concentração de CRL, à alta turbidez, à alta concentração de CRC, à alta cor, ao baixo pH, ao alto pH e à alta concentração de bactérias heterotróficas.

Os critérios são os seguintes: severidade, ocorrência, detecção e abrangência. A severidade deve ser entendida como a magnitude que tem o perigo caso este suceda, quantos danos o ocorrido pode oferecer. A ocorrência significa a frequência com que o evento perigoso ocorre, atualmente, no processo. A detecção é a capacidade de percepção do perigo, antes que ele ocorra, pelos instrumentos e métodos de controle do sistema. A abrangência é a região que o perigo pode afetar em relação à área que o processo ocupa. Por fim, o resultado ou risco é calculado pelo produto dos valores dos critérios supracitados (STAMATIS, 2003). To-

Cálculo do risco total

O cálculo do risco total para cada ponto foi baseado no produto da categorização do indicador pela porcentagem do seu respectivo risco no formulário FMEA. Sendo assim, a soma dos produtos de cada indicador resulta no risco total associado ao ponto monitorado. Esse cálculo foi realizado empregando os indicadores sentinelas — CRL e turbidez — e os auxiliares — pH, cor, CRC e bactérias heterotróficas — e apenas os indicadores sentinelas.

Os indicadores CRL e pH têm riscos excludentes entre si, pois não podem ser categorizados simultaneamente em uma classe de valor máximo e mínimo (Figura 1). Por isso, o risco máximo que pode ser calculado é 4, empregando os indicadores sentinelas e os auxiliares, e 3,5, usando apenas os indicadores sentinelas.

dos os critérios analisados — severidade, ocorrência, detecção e abrangência — variam com valores de 1 a 3, sendo 1 para as situações mais favoráveis e 3 para as mais críticas.

A tabela de escores criada para nortear o preenchimento do formulário FMEA (Tabela 2) é uma adaptação da tabela desenvolvida por Zambrano & Martins (2007).

Os valores dos critérios e do preenchimento do formulário FMEA foram definidos por um consenso da equipe, que, por meio de reuniões de *brainstorm*, discutiu os conhecimentos sobre o SAA de Campina Grande, baseando as decisões em atributos qualitativos e subjetivos, conforme recomenda a literatura do método (SPIESMAN & SPEIGHT, 2014; STAMATIS, 2003; TOLEDO & AMARAL, 2006; VIANA, 2011).

Para tornar a informação de melhor entendimento, os valores dos riscos foram categorizados em cinco faixas, traduzidas como de risco crítico, alto, moderado, baixo e desprezível. A categorização para os riscos sob análise dos indicadores sentinelas e auxiliares está na Tabela 3 e para os riscos que utilizam apenas os indicadores sentinelas, na Tabela 4.

Os resultados verificados após a aplicação do método foram comparados a outros estudos realizados no SAA de Campina Grande, que realizaram a vigilância da qualidade da água da rede de distribuição da cidade. Contudo, nenhum desses estudos utilizou métodos de avaliação de risco no processo de discussão dos dados obtidos, dificultando a comparação com os resultados deste trabalho.

RESULTADOS

No formulário FMEA preenchido, apresentado na Tabela 5, foi realizada a quantificação dos perigos, isto é, a caracterização do risco, segundo a classificação proposta na tabela de escores (Tabela 2). Assim, o preenchimento do formulário FMEA permitiu tratar os perigos — abordagem qualitativa — como riscos — abordagem quantitativa. Os riscos associados à baixa concentração de CRL e à alta concentração de bactérias heterotróficas foram os mais influentes entre os listados, contribuindo com 23 e 17% do risco total, respectivamente. Esse resultado confirma o exposto por

Bartram *et al.* (2003), Payment & Robertson (2004) e Sawyer *et al.* (2003), pois esses dois riscos estão mais intimamente relacionados à possibilidade de presença de microrganismos patogênicos.

No caso do perigo de baixa concentração de CRL, a severidade foi classificada como alta, uma vez que, se na distribuição houver um residual de desinfetante abaixo do estabelecido pelo padrão de potabilidade, há uma alta probabilidade de presença de microrganismos patogênicos, ocasionando efeitos graves e agudos à saúde

Tabela 2 – Conceito e classificação das não conformidades adotadas na avaliação de risco.

Escore	Severidade	Classificação
Alta	Substâncias muito danosas ao meio ambiente causam efeitos graves ou agudos à saúde humana e apresentam características de corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.	3
Moderada	Substâncias danosas ao meio ambiente causam efeitos leves ou crônicos à saúde humana — irritações ou alergias —, com longo tempo de decomposição.	2
Baixa	Substâncias pouco danosas ao meio ambiente causam efeitos negativos à saúde humana e possuem curto tempo de decomposição.	1
Escore	Ocorrência	Classificação
Alta	O impacto ambiental ocorre diariamente ou semanalmente.	3
Moderada	O impacto ambiental ocorre mensalmente.	2
Baixa	O impacto ambiental ocorre semestralmente ou anualmente.	1
Escore	Deteção	Classificação
Alta	Para detectar a não conformidade, é necessária a utilização de tecnologias sofisticadas e custosas — financeira e temporalmente.	3
Moderada	A não conformidade é percebida com a utilização de medições simples — titulações, pH metros, turbidímetros, entre outros.	2
Baixa	A não conformidade pode ser percebida a olho nu.	1
Escore	Abrangência	Classificação
Alta	A não conformidade alcança áreas além do sistema de abastecimento de água — até as ligações prediais.	3
Moderada	A não conformidade alcança até os limites do sistema de abastecimento de água — nas proximidades dos reservatórios e pontos de manutenção da qualidade da água.	2
Baixa	A não conformidade alcança apenas o local onde é realizada a potabilização da água (na ETA).	1

ETA: estação de tratamento de água.

Tabela 3 – Classificação qualitativa do risco total.

Faixa (intervalo do risco)	Classificação
$0 \leq x \leq 0,8$	Desprezível
$0,8 < x \leq 1,6$	Baixo
$1,6 < x \leq 2,4$	Moderado
$2,4 < x \leq 3,2$	Alto
$3,2 < x \leq 4,0$	Crítico

humana (HELLER & PÁDUA, 2010; SAWYER *et al.*, 2003; SILVA & OLIVEIRA, 2001). Além disso, os critérios ocorrência e detecção foram considerados moderados, pois no SAA de Campina Grande esse perigo ocorre mensalmente e a detecção é verificada por meio de métodos analíticos simples. Quanto à abrangência, a classificação foi alta, pois a tendência é que o perigo permaneça à medida que percorre a rede de distribuição, alcançando as ligações prediais.

O perigo de alta concentração de bactérias heterotróficas também possui severidade alta, pois esses microrganismos são capazes de se desenvolver mesmo na presença do desinfetante CRL, formando biofilmes no sistema de distribuição, que servem de proteção para outros microrganismos, inclusive os patogênicos. Logo, altas concentrações de bactérias heterotróficas podem indicar graves riscos à saúde humana (BARTRAM *et al.*, 2003; PAYMENT & ROBERTSON, 2004). Esse perigo, apesar de não haver ocorrência relevante do SAA de Campina Grande, possui análise temporalmente custosa, dificultando sua detecção.

O terceiro risco mais influente foi a alta concentração de CRL, com 15% de contribuição. Segundo Kalmaz & Kalmaz (1981), altas concentrações podem

ocasionar irritações às mucosas, inclusive no sistema digestivo, que, em longo prazo, pode causar câncer gastrointestinal. Logo, foi classificado como de severidade moderada, pois apresenta efeitos leves e crônicos à saúde humana. Contudo, a abrangência foi categorizada como moderada, pois a concentração de residual de cloro diminui ao longo do escoamento, atenuando o risco à medida que percorre a rede de distribuição.

A alta turbidez contribuiu com 11% do risco total, sendo o quarto risco mais importante apresentado na metodologia. Esse resultado é devido ao fato de que a turbidez não é apenas um indicador estético, mas também possui grande importância sanitária, devido a sua influência na desinfecção por meio da proteção dos organismos patogênicos e sua relação direta com a remoção de protozoários, assim como apresentado nos trabalhos de Heller & Pádua (2010), Sawyer *et al.* (2003) e Silva & Oliveira (2001).

Por sua vez, os riscos de alta concentração de CRC, cor e pH e de baixa concentração de pH tiveram baixa influência, principalmente por não trazerem nenhum risco direto à saúde humana e não haver ocorrências significantes no SAA de Campina Grande.

Resultado do cálculo de risco total

Aplicando os cálculos descritos na metodologia para quantificar os riscos, com as ponderações e as categorias baseadas nos valores de tendência centrais, foi estimado o risco total para cada ponto de amostragem, que pode ser observado na Tabela 6.

Os pontos P1, P3, P4, P5, P6 e P9 foram classificados como de risco baixo, enquanto os pontos P7 e P8 como de risco moderado. Nos pontos de risco baixo, todas as médias dos indicadores estavam em conformidade com a Portaria n.º 518/2004 do MS (BRASIL, 2004), o que

Tabela 4 – Classificação qualitativa do risco total para os indicadores sentinelas.

Faixa (intervalo do risco)	Classificação
$0 \leq x \leq 0,7$	Desprezível
$0,7 < x \leq 1,4$	Baixo
$1,4 < x \leq 2,1$	Moderado
$2,1 < x \leq 2,8$	Alto
$2,8 < x \leq 3,5$	Crítico

Tabela 5 – Formulário Análise dos Modos e Efeitos de Falhas para caracterização do risco, conforme classificação de escores para não conformidades.

Perigo	Tipo	Efeito	Causa	S	O	D	A	R	Medidas mitigadoras
Baixa concentração de CRL	Re	Presença de organismos patogênicos	Falha na desinfecção, distância do ponto de cloração, presença de substâncias redutoras ou ausência de manutenção na rede	3	2	2	3	36	Aumento da dose de desinfetante, instalação de pontos de recloração ou manutenção da rede
Alta concentração de CRL	Re	Intoxicação (diarreia, alteração da flora intestinal) e irritação das mucosas	Falha na desinfecção	3	2	2	2	24	Utilização de doses ótimas de desinfetante
Alta turbidez	Re	Aspecto desagradável e interferência na desinfecção	Aumento de sólidos suspensos no manancial, falha na coagulação, floculação, decantação ou filtração	3	1	2	3	18	Melhorias no processo de remoção de turbidez
Alta concentração de CRC	Re	Odor e gosto característicos e irritação das mucosas	Alta concentração de nitrogênio amoniacal ou falta de manutenção na rede de distribuição	2	2	2	2	16	Remoção de nitrogênio amoniacal, cloração ao <i>break point</i> e manutenção da rede
Alta cor	Re	Aspecto desagradável; presença de odor e gosto e maior potencial na formação de trihalometanos	Presença de substâncias que conferem cor no manancial ou falha nos processos e operações unitárias da ETA	1	2	2	3	12	Controle das operações unitárias que removem cor
Baixo pH	P	Corrosão da tubulação	Falha nos processos e operações unitárias da ETA	1	1	2	3	6	Correção final do pH
Alto PH	P	Incrustações na tubulação	Falha nos processos e operações unitárias da ETA	2	1	2	3	12	Correção final do pH
Alta concentração de bactérias heterotróficas	Re	Presença de organismos patogênicos	Falha na desinfecção, falta de manutenção na rede, grande quantidade de matéria orgânica na água ou estagnação na distribuição	3	1	3	3	27	Melhoria no processo de desinfecção, manutenção da rede, remoção de matéria orgânica na ETA ou continuidade da distribuição

Re: real; P: potencial; ETA: estação de tratamento de água; S: severidade; O: ocorrência; D: detecção; A: abrangência; R: resultado ou risco.

denota uma boa qualidade da água de abastecimento; logo, o risco do SAA é pequeno.

Os pontos P7 e P8 foram os mais discrepantes deste estudo, e o indicador CRL foi o principal responsável pelo seu nível de risco, pois houve alta frequência de não conformidades com a Portaria nº 518/2004 do MS (BRASIL, 2004). No ponto P7, a média para o CRL foi de 2,30 mg.L⁻¹, acima do padrão máximo recomendado por essa Portaria (BRASIL, 2004). Logo, a contribuição do risco de alta concentração do CRL foi máxima. Por sua vez, no ponto P8, a média para CRL foi de 0,03 mg.L⁻¹, bem abaixo do padrão mínimo estabelecido pela Portaria (BRASIL, 2004), de maneira que a contribuição do risco de baixa concentração de CRL também foi máxima. Lembrando que valores de CRL abaixo do padrão são mais danosos à saúde humana que valores acima do estabelecido.

DISCUSSÃO

Todas as médias dos indicadores estiveram em conformidade com a Portaria nº 518/2004 do MS (BRASIL, 2004), exceto em relação ao CRL nos pontos P7 e P8. É importante lembrar que todos os indicadores apresentaram pelo menos uma não conformidade com essa Portaria (BRASIL, 2004), destacando-se, além do CRL, também o CRC e a cor, denotando que houve atenuação desses valores devido à remoção dos *outliers*, nos quais se encontram grande parte das não conformidades desses indicadores.

Quanto à avaliação de risco aplicada, ficou explícita a maior importância dos indicadores sentinelas e das bactérias heterotróficas no risco total do SAA de Campina Grande, devido à sua relação mais íntima com a presença de organismos patogênicos (BARTRAM *et al.*, 2003; PAYMENT & ROBERTSON, 2004; SAWYER *et al.*, 2003), que trazem efeitos agudos à saúde humana, se comparados aos problemas relacionados ao CRC, à cor ou ao pH — indicadores que tiveram menor importância no risco total do SAA dessa cidade.

Um risco moderado para o ponto P7 é adequado, pois seu principal problema está relacionado ao excesso de CRL na água potável, que causa problemas de irritações às mucosas (KALMAZ & KALMAZ, 1981). No entanto, é necessária uma concentração muito maior que o padrão de potabilidade para que o problema se concretize, o que não é o caso do ponto de amostragem, pois

Uma maneira de utilizar melhor a metodologia da soma ponderada seria levando em consideração apenas os principais riscos quantificados na metodologia FMEA, diminuindo, assim, a atenuação por riscos não tão importantes, como a não conformidade do pH e a alta concentração de cor e de CRC. Por isso, foi, então, pensada a utilização apenas dos riscos com base nos indicadores sentinelas — baixa concentração de CRL, alta concentração de CRL e alta turbidez —, resultando nos dados indicados na Tabela 7.

Por meio da análise com os riscos relacionados aos indicadores sentinelas, a cidade de Campina Grande ficou mais bem caracterizada com relação aos pontos do SAA. O ponto P7 continuou como de risco moderado e os pontos P1, P3 e P9 como de risco baixo; os pontos P4, P5 e P6 foram classificados como de risco desprezível e o risco no ponto P8 foi alto.

com uma concentração média de CRL de 2,30 mg.L⁻¹ é mais provável ocorrências de irritações no sistema digestivo dos consumidores, que, em longo prazo, segundo Kalmaz & Kalmaz (1981), pode causar câncer. Ocorre também que, pela alta reatividade do CRL, esse diminui sua concentração rapidamente, de maneira que a própria reservação residencial pode adequar a água ao padrão de potabilidade (SAWYER *et al.*, 2003).

Esse problema de excesso de CRL no ponto P7 é explicado pelo fato dessa localidade ser muito próxima ao principal reservatório de distribuição, que recebe água diretamente da estação de tratamento de água (ETA). Esse problema seria facilmente resolvido se houvesse uma política de recloração ao longo da rede, aplicando de maneira controlada o desinfetante, como discutido em Heller & Pádua (2010). Contudo, no SAA de Campina Grande, não existem pontos de recloração.

Por sua vez, um risco moderado para o ponto P8 não é adequado, pois a ausência de CRL torna a água muito mais suscetível à presença de microrganismos patogênicos. A condição do ponto de amostragem P8 é bem crítica, pois a rede de distribuição no seu entorno é muito antiga, ainda com tubulações de cimento amianto, comprometendo a qualidade da água distribuída na área. Segundo Heller & Pádua (2010), não só para o indicador CRL, mas para todos os outros indicadores analisados, a idade e o material da tubulação da rede

Tabela 6 – Risco total para todos os indicadores levantados na pesquisa.

PTO	Média aritmética	Classificação	Risco		PTO	Média aritmética	Classificação	Risco	
			%	Total				%	Total
P1					P6				
CRL	0,71	2	23,84	47,68	CRL	1,42	1	15,89	15,89
Turb	0,58	1	11,92	11,92	Turb	0,74	1	11,92	11,92
CRC	1,58	3	10,60	31,80	CRC	1,70	3	10,60	31,80
Cor	7,5	2	7,95	15,90	Cor	8,40	3	7,95	23,85
pH	7,52	0	3,97	0,00	pH	7,31	1	3,97	3,97
BHF	15	1	17,88	17,88	BHF	17	1	17,88	17,88
Baixo				1,2518	Baixo				1,0531
P3					P7				
CRL	1,52	2	15,89	31,78	CRL	2,30	5	15,89	79,45
Turb	0,74	1	11,92	11,92	Turb	0,70	1	11,92	11,92
CRC	1,88	3	10,60	31,80	CRC	1,94	3	10,60	31,80
Cor	7,90	3	7,95	23,85	Cor	6,60	2	7,95	15,90
pH	7,32	1	3,97	3,97	pH	7,31	1	3,97	3,97
BHF	17	1	17,88	17,88	BHF	6	1	17,88	17,88
Baixo				1,2120	Moderado				1,6092
P4					P8				
CRL	1,33	1	15,89	15,89	CRL	0,03	5	23,84	119,20
Turb	0,80	1	11,92	11,92	Turb	1,02	1	11,92	11,92
CRC	1,81	3	10,60	31,80	CRC	0,73	1	10,60	10,60
Cor	8,10	3	7,95	23,85	Cor	9,10	3	7,95	23,85
pH	7,32	1	3,97	3,97	pH	7,28	1	3,97	3,97
BHF	15	1	17,88	17,88	BHF	22	1	17,88	17,88
Baixo				1,0531	Moderado				1,8742
P5					P9				
CRL	1,36	1	15,89	15,89	CRL	1,57	2	15,89	31,78
Turb	0,60	1	11,92	11,92	Turb	0,60	1	11,92	11,92
CRC	2,14	3	10,60	31,80	CRC	1,86	3	10,60	31,80
Cor	8,4	3	7,95	23,85	Cor	9,10	3	7,95	23,85
pH	7,26	1	3,97	3,97	pH	7,39	1	3,97	3,97
BHF	14	1	17,88	17,88	BHF	8	1	17,88	17,88
Baixo				1,0531	Baixo				1,2120

PTO: ponto; CRL: cloro residual livre (mg.L⁻¹); Turb: turbidez (UT); CRC: cloro residual combinado (mg.L⁻¹); Cor (uH); pH: potencial hidrogeniônico; BHF: bactérias heterotróficas (UFC.mL⁻¹).

de abastecimento influenciam diretamente na qualidade da água distribuída.

O risco moderado foi calculado para o ponto P8 por interferência de outro indicador, que está intimamente relacionado com o CRL: o CRC. Como o CRL tem baixa concentração, o CRC, que é um produto de reações com o CRL, também está muito pouco concentrado (SAWYER *et al.*, 2003). Essa baixa concentração de CRC é, segundo os riscos identificados na metodologia FMEA, um fator favorável à qualidade da água. Contudo, a adequada concentração de CRL é bem mais significativa para assegurar a saúde dos consumidores que a adequada concentração de CRC (SAWYER *et al.*, 2003). Porém, por problemas de compensação de critérios da soma ponderada, ocorreu essa interferência, sendo interessante o emprego de um conjunto mais restrito de indicadores. Dessa forma, o uso apenas dos indicadores

sentinelas é justificável, a fim de evitar a interferência dos indicadores menos influentes — como CRC, cor e pH —, que mascaram o resultado do risco total do SAA.

Utilizando apenas os indicadores sentinelas, os pontos P4, P5 e P6 mostraram risco desprezível; os pontos P1, P3 e P9 risco baixo; o ponto P7 continuou de risco moderado; e o ponto P8 foi de risco alto.

As mudanças no ponto P8 foram interessantes, pois com a remoção da interferência dos indicadores auxiliares, o risco da baixa concentração de CRL foi ressaltado, mostrando a alta degradação da qualidade da água naquela área. Para os pontos P4, P5 e P6, a mudança também foi favorável, pois apesar das médias dos indicadores desses pontos e dos pontos P1, P3 e P9 serem similares, nesses existe uma maior variação, conseqüentemente, uma maior concentração de não conformidades. Dessa forma, os pontos P4, P5 e P6 se-

Tabela 7 – Risco total calculado para os indicadores sentinelas.

PTO	Média aritmética	Classificação	Risco		PTO	Média aritmética	Classificação	Risco	
			%	Total				%	Total
P1					P6				
CRL	0,71	2	46,15	92,30	CRL	1,42	1	30,77	30,77
Turb	0,58	1	23,08	23,08	Turb	0,74	1	23,08	23,08
Baixo				1,1538	Desprezível				0,5385
P3					P7				
CRL	1,52	2	30,77	61,54	CRL	2,30	5	30,77	153,85
Turb	0,74	1	23,08	23,08	Turb	0,70	1	23,08	23,08
Baixo				0,8462	Moderado				1,7693
P4					P8				
CRL	1,33	1	30,77	30,77	CRL	0,03	5	46,15	230,75
Turb	0,80	1	23,08	23,08	Turb	1,02	1	23,08	23,08
Desprezível				0,5385	Alto				2,5383
P5					P9				
CRL	1,36	1	30,77	30,77	CRL	1,57	2	30,77	61,54
Turb	0,60	1	23,08	23,08	Turb	0,60	1	23,08	23,08
Desprezível				0,5385	Baixo				0,8462

PTO: ponto; CRL: cloro residual livre (mg.L⁻¹); Turb: turbidez (UT).

rem classificados como de um nível mais baixo que os pontos P1, P3 e P9, para ressaltar a estabilidade nos dados, é adequado.

Trabalhos anteriores descreveram o SAA de Campina Grande. Guimarães (2010) concluiu que os pontos críticos do sistema de abastecimento eram o P7 e o P8, tendo o indicador CRL como o principal fator de controle da qualidade da água, levando em consideração seu excesso e sua escassez, assim como este trabalho.

Coutinho (2011) mostrou que, de uma maneira geral, o ponto P8 era o mais crítico entre os pontos de amostragem, devido à precariedade das condições da rede de distribuição da região, ressaltando a idade, o material — cimento amianto — e a manutenção deficiente, aspectos influentes na degradação da qualidade da água.

Santos (2011) registrou que, pelo indicador bactérias heterotróficas, os pontos P6 e P8 eram os mais críticos do sistema de abastecimento, diferindo deste trabalho. Esse resultado discrepante foi devido ao fato de que a autora considerou o indicador bactérias heterotróficas como principal fator de degradação da qualidade da água, enquanto que este estudo considerou a baixa concentração de CRL como de maior risco..

De fato, no SAA de Campina Grande, a baixa concentração de CRL representa maior risco à qualidade da água do que as altas concentrações de bactérias heterotróficas. Apesar de ambas estarem relacionadas ao aumento da probabilidade da presença de microrganismos patogênicos, a ocorrência de casos de alta concentração de bactérias heterotróficas é baixa, diferentemente da ocorrência de baixa concentração de CRL, como pode ser verificado no formulário FMEA (Tabela 5).

No trabalho de Santos (2011), por exemplo, foram verificadas apenas duas não conformidades: uma com o padrão de potabilidade, no ponto P6, e uma no ponto P8, para o indicador bactérias heterotróficas. Por sua vez, para o indicador CRL, foram identificadas 10 não conformidades com o padrão de potabilidade no ponto P6 e 30 no ponto P8.

Além disso, é possível que a alta concentração de bactérias heterotróficas no ponto P8 esteja relacionada à baixa concentração de CRL, de maneira que a alta concentração dessas bactérias seja um mero efeito da baixa concentração de CRL, ressaltando maior importância do indicador CRL em detrimento do indicador bactérias heterotróficas.

CONCLUSÃO

Considerando todos os riscos listados no formulário FMEA, a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) (P1), a Escola Municipal Ana Azevedo (P4), a Vila Olímpica Plínio Lemos (P5) e Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio (E.E.E.F.M.) Solon de Lucena (P6), Severino Cabral (P3) e Félix Araújo (P9) foram classificadas como de risco baixo, pois grande parte dos danos obtidos, para os indicadores analisados, sempre estiveram em conformidade com o padrão de potabilidade. As E.E.E.F.M. Monte Carmelo (P7) e Clementino Procópio (P8) foram classificadas como de risco moderado, dada a não conformidade com a Portaria n.º 518/2004 do MS (BRASIL, 2004), para o indicador CRL. A E.E.E.F.M. Monte Carmelo (P7) apresentou não conformidade com o padrão máximo e a Clementino Procópio (P8) com o padrão mínimo. Utilizando apenas os riscos associados aos indicadores sentinelas, os resultados ficaram mais representativos, permanecendo a UEPB (P1) e as E.E.E.F.M. Severino Cabral (P3) e Félix Araújo (P9) com risco baixo; a Escola Municipal Ana Azevedo (P4), a Vila Olímpica Plínio Lemos (P5) e a E.E.E.F.M. Solon de

Lucena (P6) com risco desprezível; a E.E.E.F.M. Monte Carmelo (P7) com risco moderado; e a E.E.E.F.M. Clementino Procópio (P8) com risco alto. Esse resultado reforça a utilização dos indicadores sentinelas para monitorar a qualidade de água em um SAA.

Apesar de ter havido pelo menos uma não conformidade com o padrão de potabilidade em todos os indicadores analisados, após a remoção dos *outliers* e o cálculo da média, somente o CRL nas E.E.E.F.M. Monte Carmelo (P7) e Clementino Procópio (P8) esteve em não conformidade com a Portaria n.º 518/2004 do MS, denotando uma boa qualidade da água do sistema de distribuição de Campina Grande, com necessidade de monitoramento contínuo do ponto P8, que apresentou risco alto.

A análise de risco mostrou-se ser um método muito eficaz também na caracterização de riscos de qualidade da água potável de um sistema de abastecimento, pois o método FMEA apresentou resultados bem con-

sistentes com o discutido por vários especialistas em abastecimento de água em relação à importância dos indicadores para controle e vigilância da qualidade da água. O método elegeu como principais perigos a baixa concentração de CRL e as altas concentrações de bactérias heterotróficas, CRL e turbidez.

Por sua vez, o método da soma ponderada trouxe uma atenuação do risco total do SAA devido à compensação de critérios inerentes ao método, como no caso da E.E.E.F.M. Clementino Procópio (P8), no qual, mesmo

com concentrações ínfimas de CRL, outros indicadores de menor importância mascararam o verdadeiro risco a que estava submetida essa região.

O estudo necessita de reprodução da metodologia em outras condições, com outros indicadores e em outros SAAs, a fim de verificar a dimensão substantiva e pedagógica da replicabilidade, desenvolvendo o aprimoramento e acúmulo do conhecimento científico, bem como difundindo o uso da análise de risco em SAAs.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION (APHA/AWWA/WPCF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 2012.

BARTRAM, J.; COTRUVO, J. A.; EXNER, M.; FRICKER, C. R.; GLASMACHER, A. (Orgs.). *Heterotrophic plate counts and drinking-water safety: the significance of HPCs for water quality and human health*. London, UK: World Health Organization (WHO), 2003. 271p.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; MIERZWA, J. C. Análise de risco aplicada ao abastecimento de água para consumo humano. In: PÁDUA, V. L. (Coord.). *Remoção de microrganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano*. Rio de Janeiro: ABES, 2009, p. 328-362.

_____. Ministério da Saúde. *Portaria n.º 518*, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília: Ministério da Saúde, 2004. 15p.

_____. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. *Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância em Saúde Ambiental Relacionada à Qualidade da Água para Consumo Humano*. Brasília: Ministério da Saúde, 2006a. 60p.

_____. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. *Inspeção sanitária em abastecimento de água*. Brasília: Ministério da Saúde, 2006b. 84p.

_____. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. *Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano*. Brasília: Ministério da Saúde, 2006c. 212p.

BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria n.º 2.914*, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Ministério da Saúde, 2011. 32p.

CARMO, R. F.; BEVILACQUA, P. D.; BASTOS, R. K. X. Vigilância da qualidade da água para consumo humano: abordagem qualitativa da identificação de perigos. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 326-434, out./dez. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000400011>

COUTINHO, K. C. O. *Efeito da reservação predial na deterioração da qualidade de água de abastecimento humano*. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

- GUIMARÃES, R. M. *Ocorrência de cloro residual combinado no sistema de distribuição de água de Campina Grande (PB)*. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (Org.). *Abastecimento de água para consumo humano*. 2nd ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2010. 872p.
- KALMAZ, E. V.; KALMAZ, G. D. The health effects and ecological significance of chlorine residual in water. *Chemosphere*, Great Britain, v. 10, n. 10, p. 1163-1175, 1981. DOI:10.1016/0045-6535(81)90187-9
- NASCIMENTO, R. S.; OLIVEIRA, R. *Capítulo 4: avaliação de risco*. Aula proferida na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campina Grande, 2011.
- PAYMENT, P.; ROBERTSON, W. The microbiology of piped distribution system and public health. In: AINSWORTH, R. (Ed.). *Safe piped water: managing microbial water quality in piped distribution systems*. London, UK: World Health Organization (WHO), 2004. 18p.
- ROHLF, F. S.; SOKAL, R. R. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. 3rd ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1995. 850p.
- SANTOS, S. G. *Distribuição espacial de bactérias heterotróficas na rede de distribuição de água de Campina Grande – PB*. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- SAWYER, C. N.; MCCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. *Chemistry for environmental engineering and science*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2003. 768p.
- SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. *Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias*. Campina Grande: O autor, 2001. 266p.
- SOUZA, J. *Conformidade da água de abastecimento de Campina Grande (PB) com o padrão de aceitação para consumo humano*. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- SPIESMAN, A. L.; SPEIGHT, V. L. A risk-based methodology for contaminant prioritization. *Journal American Water Works Association*, v. 106, n. 3, p. 150-159, mar. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5942/jawwa.2014.106.0034>
- STAMATIS, D. H. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. 2nd ed. Milwaukee: American Society for Quality, 2003. 459p.
- TOLEDO, J. C.; AMARAL, D. C. *FMEA: análise do tipo e efeito de falha*. São Carlos: UFSCar, 2006.
- VIANA, D. B. *Contribuições para a construção de modelos de estimativa de riscos à saúde associados à transmissão de Giardia e Cryptosporidium via abastecimento de água para consumo humano*. 258 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- ZAMBRANO, T. F.; MARTINS, M. F. Utilização do método FMEA para avaliação do risco ambiental. *Gestão e Produção*, São Carlos, v. 14, n. 2, p. 295-309, 2007.