

Considerações sobre os valores máximos permitidos (VMP) de *E. coli* em águas cinza, visando ao reúso por meio de avaliação quantitativa de riscos microbiológicos (AQRM)

*Considerations on the maximum permitted values (VMP) of *E. coli* for grey water reuse by means of quantitative risk assessment of microbiology (QRMA)*

Débora Brunheroto Pasin Leite¹, Rodrigo Braga Moruzzi²

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo aplicar a ferramenta de avaliação quantitativa de riscos microbiológicos (AQRM) para avaliação do reúso de águas cinza, a fim de definir uma faixa de valores máximos permitidos (VMP) para *Escherichia coli* por meio do conceito de riscos aceitáveis 10^{-3} e 10^{-6} por pessoa por ano (pppa), para as diversas finalidades de reúso. Para tal, foram avaliadas a exposição, a dose-resposta e a probabilidade de infecção para diferentes finalidades de reúso. O modelo de Beta-Poisson foi empregado para a avaliação da probabilidade de infecção. Os dados de entrada para AQRM foram avaliados mediante a compilação sistemática de dados da literatura. Os maiores riscos de infecção decorrem das culturas alimentares e da balneabilidade com águas cinza misturadas, resultando em VMP de 5,25 a 105 Número Mais Provável (NMP)/100 mL e de 3,95 a 39,5 NMP/100 mL respectivamente, para risco aceitável de 10^{-3} e 0,00 a 0,10 NMP/100 mL e 0,00 a 0,04 NMP/100 mL, simultaneamente, para risco de 10^{-6} pppa. Já o menor risco de infecção decorre do reúso de águas cinza de lavatório para lavagem de pisos, proporcionando VMP de $2,14 \times 10^1$ a $2,14 \times 10^3$ NMP/100 mL para risco aceitável de 10^{-3} e 0,71 a 14,3 NMP/100 mL, sucessivamente, para risco de 10^{-6} pppa. A AQRM com riscos aceitáveis de 10^{-3} pppa mostra-se uma potencial ferramenta para avaliação dos VMP em água cinza bruta, visando sua reutilização, e pode subsidiar decisões normativas nacionais.

Palavras-chave: risco microbiológico; águas cinza; *Escherichia coli*.

ABSTRACT

The current study had the objective to apply the tool of quantitative microbiological risk assessment (QMRA) to evaluate the reuse of greywater in order to define a range of maximum value allowed (MVA) to *Escherichia coli* by means of the concept of acceptable risk 10^{-3} and 10^{-6} per person per year (pppy), for the various purposes of reuse. For that, the following criteria were evaluated: the exposure, the dose-response and the probability of infection for different purposes of reuse. The Beta-Poisson model was used to assess the probability of infection. The input data for QMRA were evaluated from a systematic compilation of literature data. The greatest risks of infection resulted from food crops and balneability in mixed greywaters, resulting in MVA from 5.25 to 105 MPN/100 mL and from 3.95 to 39.5 MPN/100 mL respectively, to an acceptable risk of 10^{-3} and 0.00 to 0.10 NMP/100 mL and from 0.00 to 0.04 MPN/100 mL, simultaneously, to a risk of 10^{-6} ppppy. Yet, the lowest risk of infection was due to the reuse of greywater from lavatories for washing floors, providing MVA from 2.14×10^1 to 2.14×10^3 MPN/100 mL to an acceptable risk of 10^{-3} and 0.71 to 14.3 MPN/100 mL, for a risk of 10^{-6} ppppy. The QMRA with acceptable risk of 10^{-3} ppppy has been a potential tool for the assessment of MVA in crude greywater aiming the reuse and the possibility of support in national policy decisions.

Keywords: microbiological risk; greywater; *Escherichia coli*.

¹Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) - Bauru (SP), Brasil.

²Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo (USP). Professor Adjunto III na UNESP - Rio Claro (SP), Brasil.

Endereço para correspondência: Rodrigo Braga Moruzzi - Avenida 24 A, 1515 - 13506-900 - Rio Claro (SP), Brasil - E-mail: rrmoruzzi@rc.unesp.br

Recebido: 25/06/13 - **Aceito:** 28/03/16 - **Reg. ABES:** 119617

INTRODUÇÃO

O reúso de águas cinza apresenta-se como uma alternativa de ampliação da oferta de água que pode contribuir para a conservação dos recursos hídricos perante a escassez da água, não apenas pela qualidade, mas também pela quantidade. Os riscos associados à exposição rotineira ou acidental dessa fonte alternativa devem, entretanto, ser levados em conta, para que se possam estabelecer práticas seguras de reúso, uma vez que as águas de reúso contêm patógenos, tais como: vírus, bactérias, protozoários e helmintos (MAY, 2009).

A *Escherichia coli*, por exemplo, é uma bactéria bastante encontrada em águas cinza e faz parte do grupo dos coliformes termotolerantes ou fecais. Ela é comumente considerada como indicadora de contaminação fecal.

Esse microrganismo vive na microbiota intestinal humana de forma harmoniosa com o hospedeiro, quando saudável (LESER; MOLBAK, 2009 *apud* SOUZA, 2010). No entanto, em indivíduos debilitados, imunossuprimidos, ou quando a barreira gastrointestinal é violada, até mesmo as bactérias comensais de *E. coli* podem causar peritonites (PINTO *et al.*, 2011). Ademais, podem provocar diarreia, desidratação, infecções urinárias, mastites, septicemias, meningites e até morte de crianças em países em desenvolvimento (VON SYDOW *et al.*, 2006).

Em águas cinza brutas, as concentrações de *E. coli* variam de acordo com o tipo de efluente (a Tabela 1 apresenta dados especificamente de estudos nacionais sobre o tema), entretanto a água misturada, oriunda da junção de dois ou mais potenciais efluentes de águas cinza, é a fonte de reúso capaz de exibir, na maioria das vezes, as concentrações mais elevadas de *E. coli*. Já a dose infectante (N_{50}), capaz de provocar sintomas clínicos em 50% dos indivíduos em contato com água contaminada, é de 10^6 – 10^{10} de *E. coli* (FEACHEM *et al.*, 1983 *apud* MONTE; ALBURQUERQUE, 2010).

A *E. coli* é introduzida nas águas cinza por meio do banho e da lavagem das mãos, de alimentos fecalmente contaminados e de roupas, de maneira especial fraldas de crianças contaminadas (OTTOSON; STRENSTRÖM, 2003; MAY, 2009). Ao reutilizar essas águas, existem riscos diferenciados de contaminação, que podem ocorrer por meio de aerossóis, da pele e mucosas, ou da ingestão acidental decorrente na maioria dos casos de conexão cruzada entre água potável e água de reúso (BLUM, 2003).

A eliminação completa de todos os riscos de contaminação é o pressuposto fundamental do conceito de risco zero, o qual, caracterizado pela ausência de organismos indicadores ou patógenos na água de reúso, é criticado em função da sua fragilidade em termos de fundamentação epidemiológica (BLUMENTHAL *et al.*, 2000 *apud* MORUZZI, 2008). Além disso, tal abordagem requer tratamentos complexos e custosos, diminuindo a viabilidade econômica do reúso de águas menos nobres. Por outro lado, é necessário estabelecerem-se valores máximos permitidos (VMP) para água de reúso que ofereçam riscos aceitáveis aos usuários, a fim de conciliar custo com eficácia e risco com benefício.

A Organização Mundial da Saúde (WHO), conforme o documento *Guidelines for drinking-water quality: incorporating first and second addenda to third edition* (WHO, 2008), determina, para doenças diarreicas de veiculação hídrica, como é o caso de *E. coli*, risco aceitável (ou tolerável, na terminologia da WHO) de 10^{-3} por pessoa por ano (pppa). Tal número indica como aceitável, por ano, a proporção de um indivíduo infectado a cada mil pessoas. Já para a água potável, a WHO define risco tolerável de 10^{-6} pppa, ou um indivíduo contaminado a cada milhão de pessoas por ano.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar quantitativamente os riscos microbiológicos das diversas fontes de exposição dos usuários a *E. coli* na água cinza, a fim de apresentar faixa de VMP por meio do conceito de riscos aceitáveis 10^{-3} e 10^{-6} pppa, para as diversas finalidades de reúso, visando subsidiar discussões sobre referências normativas nacionais que tratam do reúso de águas cinza.

METODOLOGIA

Para estabelecer os riscos de infecção e os VMP de *E. coli* presentes em águas cinza, foi empregado o método de avaliação quantitativa de

Tabela 1 – Valores de *E. coli* presentes em águas cinza brutas em recentes trabalhos brasileiros, por ordem cronológica.

Referências	Fonte da água de reúso	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)
Rapoport (2004), p. 45	Misturada (chuveiro e lavatório)	5×10^4 – $1,6 \times 10^6$
Philippi <i>et al.</i> (2005), p. 6	Misturada (lavatório, chuveiro e tanque de lavar roupas)	$1,3 \times 10^5$
Bazzarella (2005), p. 116 <i>apud</i> Gonçalves (2006)	Misturada (lavatório, chuveiro, tanque, máquina de lavar e cozinha)	$3,25 \times 10^4$
	Lavatório	$1,01 \times 10^1$
	Chuveiro	$2,63 \times 10^4$
	Tanque	$2,87 \times 10^1$
	Máquina de lavar roupas	$2,73 \times 10^1$
Peters (2006), p. 86 <i>apud</i> Gonçalves (2006)	Cozinha	$6,47 \times 10^2$
	Misturada (tanque, lavatório e chuveiro)	$2,70 \times 10^{4*}$
Magri <i>et al.</i> (2008), p. 7	Misturada (chuveiro, lavatórios, tanque e máquina de lavar roupas)	$4,00 \times 10^4$
Valentina (2009), p. 97	Misturada (chuveiro, lavatórios, tanque e máquina de lavar roupas)	$5,21 \times 10^{0*}$

*Média geométrica; NMP: número mais provável.

risco microbiológico (AQRM), cujas etapas serão descritas nos itens subsequentes, conforme Hass *et al.* (1999).

Identificação e caracterização do perigo

Essa etapa foi realizada por meio de levantamento bibliográfico em trabalhos científicos brasileiros com dados nacionais de concentrações de *E. coli* em águas cinza brutas por fonte de reúso, considerando a diversidade de combinação de um sistema de reúso.

As fontes de águas cinza brutas para reúso investigadas foram: lavatório, chuveiro, cozinha, tanque, máquina de lavar roupas e água cinza misturada. Avaliou-se a finalidade de reúso em lavagem de veículos e pisos, máquina de lavar roupas, balneabilidade, vaso sanitário, irrigação de áreas públicas, jardim e culturas alimentares.

Vale ressaltar que microrganismos indicadores de qualidade microbiológica da água, como *E. coli*, não são os mais apropriados para a determinação de risco, por serem abundantes em águas cinza e poderem superestimar os riscos associados, minimizando as faixas aceitáveis de VMP. Optou-se, todavia, por utilizar esses indicadores por conta da disponibilidade de dados epidemiológicos na literatura. Assumiu-se, portanto, que toda concentração de *E. coli* em águas cinza é patogênica e de cepas enteroinvasivas, ou *E. coli* enteroinvasiva (EIEC), conforme apresentado por DuPont *et al.* (1971), e pode estar associada diretamente à existência de outros potenciais organismos, o que, de certo modo, é conveniente, dada a origem dessas águas. Como consequência dessa simplificação necessária à análise, a aplicação da ferramenta AQRM para *E. coli* resulta em maior segurança aos usuários, na medida em que superestima os riscos. Isso pode ser conveniente do ponto de vista sanitário, pois, em indivíduos debilitados ou imunossuprimidos, a *E. coli* pode causar infecções e até morte de crianças em países em desenvolvimento.

Avaliação da exposição

Na avaliação da exposição, estimou-se a quantidade de patógenos ingeridos para cada evento. Para tal, consideraram-se o volume, a rota de exposição e a frequência de exposição. Segundo Cohim *et al.* (2007), o volume é definido por meio da distribuição triangular com base nos valores mínimo, médio e máximo para cada finalidade. A média e o desvio padrão da frequência de eventos obedecem à distribuição normal de probabilidade.

A Dose foi avaliada por meio da Equação 1, a qual faz uso da concentração de microrganismos em águas cinza brutas por fonte de reúso, conforme Tabela 1, e do volume ingerido de água cinza, levando em conta as rotas de exposição para cada finalidade de reúso (Tabela 2).

$$Dose = E. coli \text{ na água cinza (NMP/mL)} \times \text{Volume ingerido (mL)} \quad (1)$$

Análise dose-resposta

A análise dose-resposta busca relacionar a Dose de *E. coli* administrada ao usuário e a probabilidade de infecção em uma única exposição. Ela é descrita por meio do modelo Beta-Poisson, conforme

Equações 2 e 4, apresentadas nas formas explícita ou implícita em β conforme Equação 3, nessa ordem. Tal modelo é amplamente empregado na caracterização de risco de *E. coli*, além de ser o mais recomendado (HAAS *et al.*, 1999; HAAS; EISENBERG, 2001). Segundo Haas *et al.* (1999) e Haas e Eisenberg (2001), um bom modelo dose-resposta para avaliação de risco deve ter as seguintes características:

- ajuste estatisticamente aceitável (não rejeitar hipótese nula, $p > 0,05$, para significância de 95%);
- avaliação em seres humanos ou em animais que imitem bem a fisiopatologia humana;
- preferência pela infecção como resposta, em detrimento dos sintomas ou de morte;
- análise da via de exposição similar/idêntica à via de exposição de infecção natural;
- tensão do patógeno semelhante às tensões que causam a infecção natural;
- modelo com dados reunidos por meio de duas ou mais experiências com conjuntos de dados estatisticamente semelhantes;
- valor do quociente dose infecciosa média por dose letal média (DI_{50}/LD_{50}) baixo, de modo a obter estimativa do risco conservadora.

Vale salientar que dificilmente se encontra um único modelo com todas as características listadas anteriormente. Portanto, é importante

Tabela 2 – Distribuição da exposição relacionada à água de reúso.

Finalidade de reúso	Rota de exposição	Volume (mL)	Frequência (ano)
Irrigação de jardim	Aerossol	(0,01; 0,10; 0,50)	(150,00; 20,00)
	IER	(0,10; 1,00; 2,00)	(150,00; 20,00)
	IA	(10,00; 100,00; 200,00)	(1,00)
Irrigação de áreas públicas	IER	(0,10; 1,00; 10,00)	(60,00; 10,00)
Irrigação de culturas alimentares	IAC	(1,00; 5,00; 20,00)	(150,00; 20,00)
Vaso sanitário	Aerossol	(0,01; 0,10; 0,50)	(1,460,00; 100,00)
Máquina de lavar roupas	Aerossol	(0,01; 0,10; 0,50)	(150,00; 20,00)
Balneabilidade	Ingestão	(10,00; 25,00; 100,00)	(40,00; 10,00)
Lavagem de veículo	Aerossol	(0,010; 0,10; 0,50)*	(48,00)*
	IER	(0,10; 1,00; 2,00)*	(48,00)*
Lavagem de pisos	Aerossol	(0,01; 0,10; 0,50)	(11,06)**
	IER	(0,10; 1,00; 2,00)	(11,06)**

IER: ingestão por exposição rotineira; IA: ingestão acidental; IAC: ingestão de alimentos cultivados.

Fonte: ASHBOLT *et al.* (2005) *apud* COHIM *et al.* (2007); *adaptado de TOMAZ (2003); **ZANETTI *et al.* (2011).

ressaltar que cada usuário de AQRM deve utilizar o modelo que mais lhe convier, conforme especificidades do estudo e da aplicação.

Para este artigo, as características de interação agente-hospedeiro foram obtidas com base nos dados coletados do estudo epidemiológico de DuPont *et al.* (1971), os quais definiram os valores dos parâmetros α e β (Equação 2).

$$P_i = 1 - \left[1 + \frac{d}{N_{50}} \times (2^{\frac{1}{\alpha}} - 1) \right]^{-\alpha} \quad (2)$$

A Equação 3 apresenta a relação entre os parâmetros α e β :

$$\beta = \frac{N_{50}}{2^{1/\alpha} - 1} \quad (3)$$

Pode-se reescrever a Equação 2 por meio da combinação com a Equação 3, resultando na Equação 4.

$$P_i = 1 - \left(1 + \frac{d}{\beta} \right)^{-\alpha} \quad (4)$$

Em que:

P_i = probabilidade de infecção para uma única exposição;

d = dose ou número de patógenos ingeridos (Equação 1);

α e β = parâmetros característicos da interação agente-hospedeiro, obtidos por meio de observações e experimentações, e que assumem valores de $1,55 \times 10^{-1}$ e de $2,44 \times 10^4$, respectivamente.

Caracterização do risco

Após a aplicação do modelo dose-resposta e considerando o risco de infecção em uma única exposição, foi possível determinar o risco para períodos de tempo maiores, ou seja, para múltiplas exposições durante o período de um ano (P_n), conforme a Equação 5.

$$P_n = 1 - (1 - P_i)^n \quad (5)$$

Em que:

P_n = risco anual;

P_i = probabilidade de infecção do usuário para uma única exposição (Equação 2 ou 4);

n = número ou frequência de exposições no ano.

Dessa forma, ao obter os riscos de infecção anual de *E. coli* por finalidade e fonte de reúso, de acordo com a rota de exposição, volume ingerido e sua concentração, foi possível identificar o cenário de exposição com maior e menor risco de infecção anual ao usuário. Para esses cenários, foram fixados os riscos aceitáveis estabelecidos pela WHO (2008), cujos valores são de 10^{-3} pppa para doenças diarreicas, como é o caso da *E. coli*, e de 10^{-6} pppa, para carga de doença tolerável pelo consumo de água potável. Com isso, pôde-se alcançar uma faixa de valores de VMP para *E. coli*,

faixa essa que poderá subsidiar valores de VMP aceitáveis para usuário de águas cinza. Os valores de VMP obtidos podem estar a favor da segurança, pois a hipótese é que toda concentração de *E. coli* seja patogêna, ou indicadora, e provenha de EIEC.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Tabelas 2 e 3, são apresentados o volume ingerido de água cinza e a frequência anual para as rotas de exposição para cada finalidade de reúso (Tabela 2), bem como a distribuição da exposição relacionada à fonte de reúso de águas cinza brutas (Tabela 3). Tais valores subsidiaram a determinação da dose (Equação 1).

Vale salientar que os valores de frequência de exposição anual do usuário à água de reúso (Tabela 2) empregada na lavagem de pisos e veículos se basearam no consumo anual de água para essas finalidades, conforme Tomaz (2003). Já o volume ingerido durante a lavagem de pisos foi semelhante ao da lavagem de veículos, mencionada por Zanetti *et al.* (2011), uma vez que os mecanismos de lavagem são os mesmos: mangueiras e lavadoras de alta pressão.

Os dados das Tabelas 2 e 3, associados aos parâmetros de interação agente-hospedeiro, foram fundamentais para a obtenção da dose, assim como para a caracterização do risco de infecção, visando estabelecer a faixa de VMP. Com base em cada dose a que está sujeito o receptor, foi possível obter os riscos oferecidos, mediante o modelo Beta-Poisson. Por meio desses riscos, determinou-se a faixa de VMP para cada risco tolerável.

As probabilidades de infecção única ($P(-)$) e múltipla ($Pn(-)$) podem ser visualizadas no gráfico da Figura 1, onstruída por meio da Equação 2 para doses parametrizadas, considerando o valor de N_{50} de 10^{+6} para *E. coli*, conforme preconizado por Asano *et al.* (2007) e os valores dos parâmetros α e β de $1,55 \times 10^{-1}$ e de $2,44 \times 10^4$, conforme estudo de DuPont *et al.* (1971).

Pela distribuição Beta-Poisson e levando em conta os dados simulados referentes à *E. coli* com N_{50} de 10^{+6} , verificou-se a probabilidade de infecção para a ingestão única (P) de dose (volume \times concentração de *E. coli*) de 0,01 a 100 vezes o valor de N_{50} , que resultou em variação de cerca de 6 a 70%, respectivamente. A frequência de exposições no tempo altera a probabilidade de infecção, conforme ilustram os resultados de

Tabela 3 - Concentração de *E. coli* em águas cinza brutas.

Fonte de reúso	<i>E. coli</i>
Misturada*	$3,25 \times 10^4$
Lavatório	$1,01 \times 10^1$
Chuveiro	$2,63 \times 10^4$
Tanque	$2,87 \times 10^1$
Máquina de lavar roupas	$2,73 \times 10^1$
Cozinha	$6,47 \times 10^2$

*Lavatório, chuveiro, tanque, máquina de lavar e cozinha
Fonte: extraído de Bazzarella (2005).

P_n para n de 0,1 a 52. Nessas condições, pode-se observar a relação de incremento da probabilidade de infecção com exposições variando de um por década (1/10) a um por semana (52/ano). O aumento da exposição aumenta substancialmente a probabilidade de infecção, mesmo para baixas relações de d/N_{50} . Por exemplo, para probabilidades de infecção de 20%, tem-se variação da ordem de 10^9 (1 bilhão) vezes, considerando exposições entre 0,1 e 52/ano. Tal fato demonstra a importância da definição adequada da frequência de exposição na determinação do risco associado e, por consequência, dos VMP.

Na Tabela 4, são exibidos os cenários de exposição que resultaram em menor e maior risco de infecção ao usuário por atividade de reúso, obtidos por meio dos cálculos de AQRM e dos dados levantados e expostos nas Tabelas 2 e 3, juntamente com os parâmetros de interação agente-hospedeiro. Foi possível observar que a água cinza proveniente de lavatório se apresenta como a fonte de reúso com menores riscos de infecção por *E. coli* ao usuário, independentemente da finalidade da reutilização. Tal resultado decorre da baixa concentração de *E. coli* no efluente de lavatório, apresentando risco abaixo do recomendado pela WHO, de 10^{-3} pppa. Já

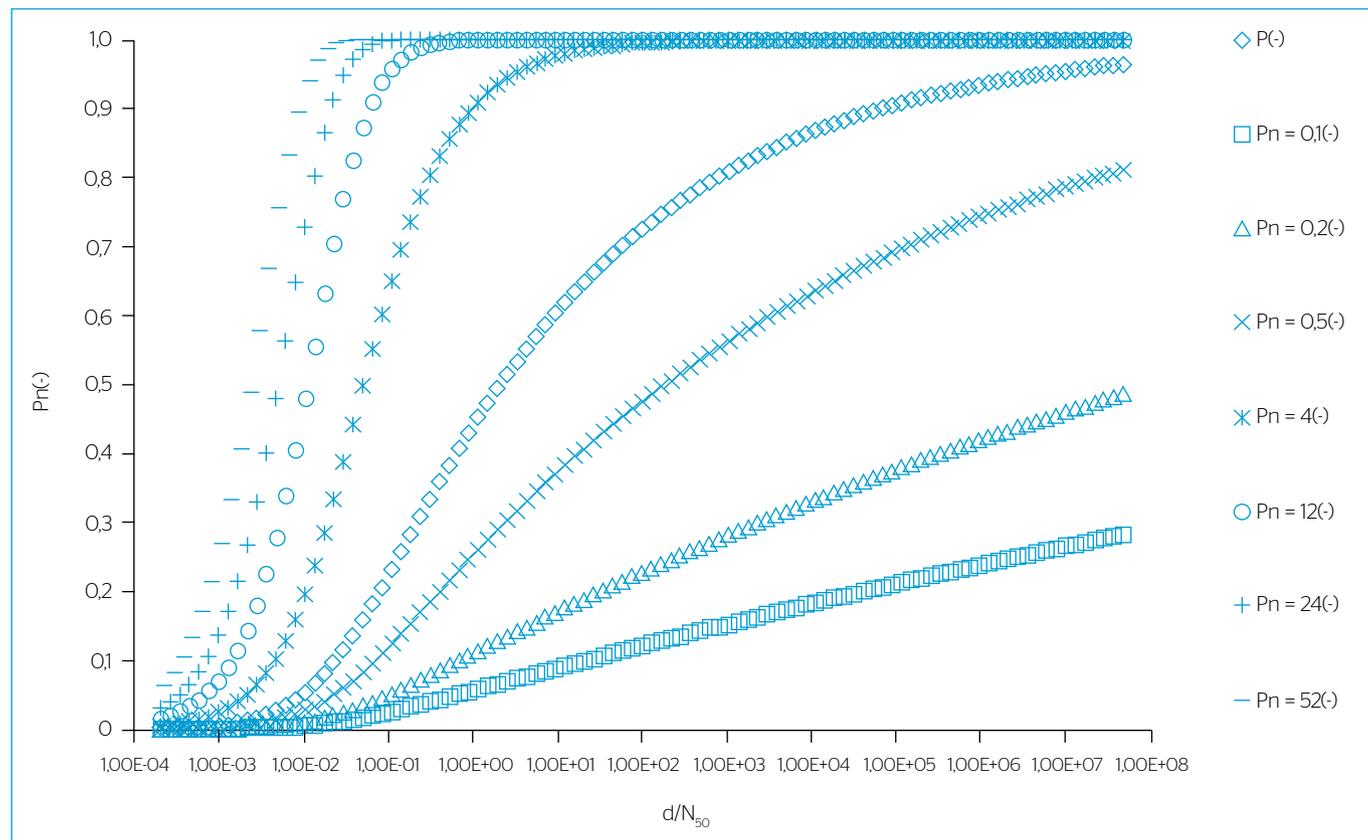


Figura 1 - Probabilidade de infecção normalizada para N_{50} de 10^{+6} para *E. coli* em função da dose-resposta para distribuição de Beta-Poisson para exposição única (P) e para diferentes valores de frequência de exposição anual (n). Cálculos efetuados para N_{50} de 10^{+6} , α de $1,55 \times 10^{-3}$ e β de $2,44 \times 10^{-4}$.

Tabela 4 - Riscos baixo e elevado de infecção anual ao usuário por *E. coli* decorrentes da fonte de reúso, rota de exposição e volume ingerido para cada finalidade de reúso.

Finalidade do reúso	Risco baixo (menor) de infecção			Risco elevado de infecção		
	Fonte de reúso	Rota de exposição/volume (mL)	Risco de infecção (pppa)	Fonte de reúso	Rota de exposição/volume (mL)	Risco de infecção (pppa)
Irrigação de jardim	L	Aerossol (0,01 mL)	$9,62 \times 10^{-7}$	AM	IER (2 mL)	$4,57 \times 10^{-1}$
Irrigação de áreas públicas	L	IER (0,1 mL)	$3,85 \times 10^{-6}$	AM	IER (10 mL)	$6,87 \times 10^{-1}$
Culturas alimentares	L	IAC (1 mL)	$9,62 \times 10^{-5}$	AM	IAC (20 mL)	$9,96 \times 10^{-1}$
Banheiro (vaso sanitário)	L	Aerossol (0,01 mL)	$9,37 \times 10^{-6}$	AM	Aerossol (0,5 mL)	$7,77 \times 10^{-1}$
Máquina de lavar roupas	L	Aerossol (0,01 mL)	$9,62 \times 10^{-7}$	AM	Aerossol (0,5 mL)	$1,43 \times 10^{-1}$
Balneabilidade	L	IA (10 mL)	$2,57 \times 10^{-4}$	AM	IA (100 mL)	$9,95 \times 10^{-1}$
Lavagem de pisos	L	Aerossol (0,01 mL)	$7,10 \times 10^{-8}$	AM	IER (2 mL)	$4,41 \times 10^{-1}$
Lavagem de veículos	L	Aerossol (0,01 mL)	$3,08 \times 10^{-7}$	AM	IER(2 mL)	$1,78 \times 10^{-1}$

L: lavatório; IER: ingestão por exposição rotineira; IAC: ingestão de alimentos cultivados; IA: ingestão acidental; AM: água misturada.

a água misturada é potencialmente infectante, com risco de contaminação de 1,43 a 9,96 pessoas para cada 10 pessoas expostas por ano. Para as outras fontes de reúso, ou seja, chuveiro, máquina de lavar roupas, tanque e cozinha, os riscos indicaram valores intermediários.

Para irrigação de jardim, por exemplo, o efluente com menor risco de contaminação é o de lavatório, pois a fonte apresenta baixa concentração de *E. coli* ($1,01 \times 10^1$ NMP/100 mL). Nesse caso, o risco de contaminação é de menos de 10 pessoas por 10 milhões por ano, ou seja, está no risco aceitável de 10^{-3} pppa, tendo em vista a rota de exposição por aerossol, ingestão de 0,01 mL de água cinza com concentração de *E. coli* de 0,101 NMP/mL. Já a água cinza misturada, para essa mesma finalidade, oferece riscos elevados, com 4,57 pessoas contaminadas a cada 10 pessoas por ano. Isto é, quase 50% dos usuários expostos são infectados, considerando a rota de exposição por meio da ingestão rotineira de 2 mL de água cinza, com concentração de *E. coli* de 325 NMP/mL de água de reúso.

Entre todas as atividades a serem desenvolvidas com a água de reúso bruta, as culturas alimentares e a balneabilidade são as que oferecem maiores riscos de infecção por *E. coli* aos usuários desse sistema, incorrendo em risco de 9,9 pessoas a cada dez indivíduos expostos, sem levar em conta os efeitos de diluição. Ou seja, quase 100% da população exposta à água cinza misturada para essas finalidades pode ser infectada, considerando riscos altos oriundos dos piores cenários de exposições.

A associação entre a faixa de VMP e os riscos aceitáveis (10^{-3} e 10^{-6} pppa) decorrentes dos piores e melhores cenários de exposições por finalidade de reúso está descrita na Tabela 5, por meio de riscos altos e baixos, e foi obtida mediante a ferramenta de AQRM, conforme as Equações 1, 4 e 5. Essa tabela foi construída atentando para os cenários de exposição e as concentrações de *E. coli* por fonte de reúso (lavatório e misturada), sendo selecionado o cenário de exposição que ocasionou maior e menor risco ao usuário por atividade de reúso, entre todas as combinações (volume, fonte e rota de exposição para cada finalidade de reúso considerada), de acordo com as Tabelas 2 e 3.

Posteriormente, por intermédio desses cenários extremos, denominados com os adjetivos *pior* e *melhor*, foram obtidas as faixas de VMP, fixando os riscos aceitáveis de 10^{-3} e 10^{-6} pppa (Tabela 5) para os diferentes volumes de ingestão considerados, os quais se encontram entre parênteses na Tabela 4.

Os riscos altos decorreram dos piores cenários de exposição (concentração de *E. coli*, volume ingerido, frequência e rota de exposição) e são potencialmente infectantes aos usuários de água cinza, resultando em baixa concentração de *E. coli* para reúso, expressa em VMP. O contrário ocorre com riscos baixos, os quais possuem diferentes cenários de exposição, com baixa dose infectante e, portanto, valores mais elevados de VMP.

Em termos gerais, pode-se dizer que a concentração de *E. coli* para irrigação de jardim deve ser $\leq 52,5$ NMP/100 mL de água cinza para risco aceitável de 10^{-3} e $\leq 0,05$ NMP/100 mL para risco de 10^{-6} pppa (Tabela 5), valores esses obtidos por meio de cálculos de AQRM, para probabilidade de risco de infecção anual (P_n), na frequência de exposição de 150 vezes por ano.

Considerando o melhor cenário de exposição para irrigação de jardim, a qual ocorre por meio de aerossol e ingerindo 0,01 mL de água cinza de lavatório, verificou-se VMP de 10.500 NMP/100 mL de água de reúso (Tabela 5). No entanto, caso o usuário esteja exposto de forma rotineira, e para essa mesma atividade, pode ingerir até 2 mL de águas cinza misturadas. Nessas condições, o VMP de *E. coli* passa a ser de 52,5 NMP/100 mL de água de reúso. Ou seja, há redução significativa do valor de VMP de 99,5%, quando comparada à primeira situação, mesmo mantendo fixos a finalidade de reúso e o risco aceitável de 10^{-3} pppa.

O reúso para irrigação de jardim e para máquina de lavar roupas apresenta os mesmos VMP (Tabela 4) e riscos de infecções anuais (Tabela 3), por ambos constarem dos mesmos cenários de exposição.

Dessa forma, uma análise mais específica pode ser feita, desde que sejam conhecidos o cenário de exposição e os valores para os riscos considerados aceitáveis.

Tabela 5 - Valores máximos permitidos de *E. coli* em águas cinza associados à finalidade do reúso e da comparação com a NBR 13.969/1997 e o manual *Conservação e reúso de água em edificações*.

Finalidade de reúso	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL) para risco de 10^{-3}		<i>E. coli</i> (NMP/100 mL) para risco de 10^{-6}		Norma e manual brasileiro	
	Risco alto	Risco baixo	Risco alto	Risco baixo	NBR 13.969/1997	Manual (SAUTCHUK <i>et al.</i> , 2005)
Irrigação de jardim	52,5	$10,5 \times 10^3$	0,05	10,5	<500	<200
Irrigação de áreas públicas	26,3	$26,2 \times 10^2$	0,03	2,62	<500	-
Irrigação de culturas alimentares	5,25	$10,5 \times 10^1$	0,00	0,10	<5.000*	-
Vaso sanitário	21,6	$10,8 \times 10^2$	0,02	1,08	<500	N. D.
Máquina de lavar roupas	$21,0 \times 10^1$	$10,5 \times 10^3$	0,21	10,5	-	N. D.
Balneabilidade	3,95	39,5	0,00	0,04	-	-
Lavagem de veículo	$16,4 \times 10^1$	$32,9 \times 10^3$	0,16	0,33	<200	N. D.
Lavagem de pisos	$71,5 \times 10^1$	$14,3 \times 10^4$	0,71	$14,3 \times 10^1$	<500	N. D.

*Exclui irrigação de hortaliças e frutas com ramas rastejantes; - : não possui dados; N. D.: não detectável.

Ressalta-se, entretanto, que a finalidade deste trabalho foi apresentar uma abordagem geral de risco associada aos VMP, com base em dados brasileiros e para situações genéricas, abordada por faixas de valores correspondentes a máximos e mínimos. Assim, podem-se tratar os resultados por cenários de exposição de alto e baixo riscos. Deve-se atentar para o fato de que o princípio da precaução tem de nortear as decisões na ausência de dados confiáveis, prezando pela adoção de VMP mais baixos, os quais resultam dos piores cenários de exposição e de riscos altos de infecções.

Vale salientar que a conexão cruzada incorre em risco potencial de contaminação ao usuário, mesmo apresentando frequência de exposição baixa, com 4×10^{-5} vezes ao ano. Isso porque o valor do N_{50} é da mesma ordem de grandeza da concentração presente em água cinza bruta. Assim, baixos volumes de ingestão conduzem a elevadas doses, resultando em riscos potencialmente elevados. Por essa razão, a conexão cruzada deve ser evitada.

Por fim, foi realizada uma comparação entre os VMP obtidos neste trabalho com a Norma Brasileira (NBR) 13.969/97 (ABNT, 1997) e o manual *Conservação e reúso de água em edificações* (SAUTCHUK *et al.*, 2005), os quais se apresentam como duas referências nacionais que abordam os padrões de qualidade da água de reúso.

Observa-se que todos os valores de VMP atendem ao critério de riscos aceitáveis para 10^{-6} pppa, independentemente de decorrerem de riscos baixos ou altos, pois contêm valores abaixo do requerido pela NBR 13.969/97. Da mesma maneira, quase a totalidade das finalidades de reúso para riscos aceitáveis de 10^{-3} pppa é atendida, exceto apenas para lavagem de pisos, em que o limite superou o valor de 500 NMP/100 mL, recomendado pela NBR 13.969/97.

Tais resultados mostram que, à luz das considerações e hipóteses adotadas para esta avaliação preliminar, normativas mais permissivas podem ser consideradas, de modo a atender ao critério de risco tolerável, sem prejuízo à saúde dos usuários. Tal fato poderia fomentar a oferta segura de água de reúso, auxiliando a difusão dessa estratégia.

Tal afirmação encontra respaldo na própria definição de riscos aceitáveis apresentada por WHO (2006). Segundo esse documento e conforme abordado por Moruzzi (2008), a adoção de valores de VMP muito restritivos relacionados ao conceito de risco zero pode inviabilizar a aplicação de técnicas de reúso, ou, por outro lado, induzir a práticas inseguras, por serem inviáveis e, portanto, negligenciadas pelos usuários.

Assim, o estabelecimento de um valor de risco considerado aceitável e seus valores correspondentes de VMP podem contribuir para a difusão de práticas seguras e para a implantação de sistemas de reúso de águas cinza.

Vale enfatizar que as finalidades de reúso investigadas consideraram o uso de água cinza bruta (sem tratamento prévio) e sem levar em conta o efeito de diluição em águas de melhor qualidade. Do mesmo modo, devem ser motivo de análise outras barreiras sanitárias, as quais podem minimizar os riscos associados à manipulação e exposição dos usuários.

CONCLUSÃO

Este trabalho buscou apresentar VMP para diferentes finalidades de reúso de águas cinzas brutas sem tratamento, à luz do conceito de riscos toleráveis, empregando ferramenta de AQRM. A maior dificuldade encontrada foi a obtenção de valores na literatura que pudessem subsidiar a definição da dose e do risco de infecção. No entanto verificou-se o potencial do emprego da ferramenta quantitativa, a qual possibilita discussão fundamentada e segura acerca dos VMP, alicerçada nas técnicas propostas.

De forma geral, a NBR 13.969/97, bem como o manual de reúso de Sautchuk *et al.* (2005), traz valores mais restritivos de VMP, quando comparados aos valores obtidos pelas técnicas quantitativas utilizadas neste artigo. Deve-se atentar que o estabelecimento de valores inatingíveis pode induzir a práticas inseguras, ou mesmo desestimular o reúso de águas cinza. Por outro lado, a adoção de VMP demasiadamente flexíveis pode aumentar o risco aos usuários finais.

Dessa maneira, o estabelecimento dos VMP para as diferentes finalidades de reúso deve ser realizado conforme os conceitos de riscos toleráveis. É fundamental também que sejam conhecidos os potenciais contaminantes presentes nas águas cinzas brutas a serem utilizadas, assim como seus usos e reúsos mais restritivos. Assim, faz-se essencial o conhecimento da rota de exposição, do potencial volume ingerido e da sua frequência de exposição associada.

Espera-se que o conteúdo ora apresentado possa auxiliar nas discussões acerca das referências normativas nacionais sobre reúso de águas cinza.

REFERÊNCIAS

ASANO, T.; BURTON, F.; LEVERENZ, H. (2007) *Water reuse: issues, technologies and applications*. Nova York: McGraw Hill.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. (1997) *NBR 13.969/1997*. Tanques sépticos: unidades de tratamento

complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT. 22 p.

BAZZARELLA, B.B. (2005) *Caracterização e aproveitamento de água cinza para uso não-potável em edificações*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 118p.

- BLUM, J.R.C. (2003) Critérios e padrões de qualidade da água. *In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reúso de água*. São Paulo: Manole. p.125-173.
- COHIM, E.; KIPERSTOK, A.; BRASIL, M.P.; BÓRTOLI, E. (2007) Avaliação de risco à saúde humana do reúso de águas residuárias tratadas em descargas de vaso sanitário: a rota dos aerossóis. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24. Anais...* Belo Horizonte. 8 p.
- DUPONT H.L.; FORMAL, S.B.; HORNICK, R.B.; SNYDER, M.J.; LIBONATI, J.P.; SHEAHAN, D.G.; LABREC, E.H.; KALAS, J.P. (1971) Pathogenesis of *Escherichia coli* diarrhea. *The New England Journal of Medicine*, v. 285, n. 1, p. 1-9.
- GONÇALVES, R.F. (Org.) (2006) *Uso racional da água em edificações*. Rio de Janeiro: Prosab. 45p.
- HAAS, C.N.; EISENBERG, J.N.S. (2001) Risk assessment. *In: FEWTRELL, L.; BARTRAM, J. (Orgs.) Water quality: guidelines, standards and health: assessment of risk and risk management for water related infectious disease*. Londres: WHO/IWA. p.161-183.
- HASS, C.N.; ROSE, J.B.; GERBA, C.P. (1999) *Quantitative microbial risk assessment*. Nova York: John Wiley & Sons. 449 p.
- MAGRI, M.E.; FENELON, F.R.; RABELO, L.; ROSSETO, T.S.; PHILIPPI, L.S. (2008) Reúso de águas cinzas tratadas em descarga de vaso sanitário e rega de jardim. *In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 12. Anais...* Belém. 8 p.
- MAY, S. (2009) *Caracterização, tratamento e reúso de águas cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações*. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 91 p.
- MONTE, H.M.; ALBUQUERQUE, A. (2010) *Reutilização de águas residuais*. Lisboa, Portugal: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos e Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 30 p. (Série Guias Técnicos, n. 14.)
- MORUZZI, R.B. (2008) Reúso de água no contexto da gestão de recursos hídricos: impacto, tecnologias e desafios. *OLAM: Ciência & Tecnologia*, v. 8, n. 3, p. 271-294.
- OTTOSON, J.; STRENSTRÖM, T.A. (2003) Faecal contamination of greywater and associated microbial risk. *Water Research*, v. 37, n. 3, p. 645-655.
- PETERS, M.R. (2006) Potencialidade de uso de fontes alternativas de água para fins não potáveis em uma unidade residencial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 63-86.
- PHILIPPI, L.S.; SEZERINO, P.H.; PETERS, M.R.; LAPOLLI, F.R. (2005) Reúso de águas cinzas (*greywater*) e água de chuva em uma unidade residencial. *In: Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23. Anais...* Florianópolis: ABES. 6 p.
- PINTO, F.A.; DIAS, C.R.; RAMOS, M.; ELLIOT, S.L. (2011) Interações simbióticas entre *Escherichia coli* e seres humanos: a instabilidade de uma relação. *Revista HCPA*, v. 31, n. 4, p. 451-455.
- RAPOPORT, B. (2004) *Águas cinzas: caracterização, avaliação financeira e tratamento para reúso domiciliar e condominial*. Dissertação (Mestrado) - Escola Nacional de Saúde Pública do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 45 p.
- SAUTCHUK, C.; FARINA, H.; HESPANHOL, I.; OLIVEIRA, L. H.; COSTI, L. O.; ILHA, M.S.O.; GONÇALVES, O.M.; MAY, S.; BONI, S.S.N.; SCHMIDT, W. (2005) *Conservação e reúso da água em edificações - Manual da FIESP*. São Paulo. 151 p.
- SOUZA, N.C.C.S. (2010) *Desenvolvimento de um imunossensor para detecção de Escherichia coli em água*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 8 p.
- TOMAZ, P. (2003) *Aproveitamento de água de chuva para áreas urbanas e fins não potáveis*. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro_conservacao/capitulo8.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2013.
- VALENTINA, R.S.D. (2009) *Gerenciamento da qualidade e da quantidade de água cinza em uma edificação residencial de alto padrão com vistas ao reúso não potável*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 97 p.
- VON SYDOW, A.C.M.D.G.; COOGAN, J.A.; MORENO, A.M.; MELVILLE, P.A.; BENITES, N.R. (2006) Ocorrência de fatores de virulência em estirpes de *Escherichia coli* isoladas de fezes de cães errantes. *Arquivos do Instituto Biológico*, v. 73, n. 4, p. 401-407.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. (2006) *WHO Guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater*. Wastewater and Excreta Use in Aquaculture. Genebra: WHO.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. (2008) *Guidelines for drinking-water quality: incorporating first and second addenda to third edition*. v. 1. 45 p. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en/>. Acesso em: 9 abr. 2013.
- ZANETTI, R.N.; RUBIO, J.; ETCHEPARE, R. (2011) Riscos químicos, microbiológicos e pré-avaliação econômica no reúso de água. Estudo de caso: lavagem de veículos. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 26. Anais...* Porto Alegre: ABES. 5 p.