

IRRIGAÇÃO COM ÁGUA DE REÚSO NO BRASIL: APLICAÇÃO DO MODELO SEMIQUANTITATIVO DE AVALIAÇÃO DE RISCO MICROBIOLÓGICO PARA SAÚDE HUMANA

WATER REUSE FOR IRRIGATION IN BRAZIL: APPLICATION OF THE SEMI-QUANTITATIVE MODEL OF MICROBIOLOGICAL RISK ASSESSMENT TO HUMAN HEALTH

Maíra Araújo de Mendonça Lima^a, Ana Silvia Pereira Santos^b, José Manuel Pereira Vieira^c

^aUniversidade do Estado do Rio de Janeiro, ^bUniversidade do Estado do Rio de Janeiro, ^cUniversidade do Minho

mairalima.90@gmail.com, ana.pereira@uerj.br, jvieira@civil.uminho.pt

Submissão: 26 de julho de 2021

Aceitação: 15 de agosto de 2021

Resumo

Diante da insegurança hídrica que afeta várias regiões do mundo, o reúso de água tem se tornado cada vez mais presente. Para minimizar o risco da prática, diferentes metodologias de avaliação podem ser empregadas, com abordagens distintas em relação ao reúso potável e não potável. Para a irrigação, a metodologia semiquantitativa é mais indicada, de modo a garantir a segurança, utilizando uma abordagem qualitativa empírica de julgamento para avaliar a importância relativa para perigos, cenário e via de exposição, além de multibarreiras. Dessa forma, a presente Nota Técnica apresenta uma orientação para a aplicação do método Semiquantitativo de Avaliação de Risco Microbiológico (ASqRM) no contexto nacional. De forma complementar foi elaborado um exemplo, considerando-se irrigação em cultura frutífera. Adotou-se o padrão *Escherichia coli* entre 10^3 e 10^4 NMP/100mL, com barreiras definidas a partir da irrigação por gotejamento, crescimento da cultura distante do solo (50 cm) e remoção da casca (preferencialmente) antes do consumo. Os resultados foram: Risco para o receptor agricultor = 3,04 (aceitável) e para o receptor consumidor (desprezável) = 1,89; Risco Global = 2,46 (desprezável). Observa-se a viabilidade segura de prática, apesar de apresentar risco, que deve ser gerido a partir de um adequado Plano de Gestão de Risco.

Palavras-chave: metodologia semiquantitativa, perigo, receptores, multibarreiras, risco.

Abstract

Given the water insecurity that affects various regions of the world, water reuse has become increasingly present. Different assessment methodologies can be employed to minimize the risk of the practice, with different approaches to potable and non-potable reuse. The semi-quantitative method is more suitable for irrigation, with to goal to ensure safety, using an empirical qualitative judgment approach to assess the relative importance for hazards, exposure routes and scenarios, and multi-barriers. Thus, this Technical Note provides guidance for the application of the Semiquantitative Microbiological Risk Assessment (ASqRM) method in the national context. Complementarily, an example was elaborated, considering irrigation in fruit crops. The standard *Escherichia Coli* was adopted between 10^3 and 10^4 NMP/100mL, with barriers defined from drip irrigation, high-growing crops such (50 cm) above from the ground and removing the peel (preferably) before consumption. The results were: Risk for the farmer receptor = 3.04 (acceptable) and for the consumer receptor (despicable) = 1.89; Global Risk = 2.46 (despicable). The safe feasibility of the practice is observed, despite presenting risk, which must be managed from an adequate Risk Management Plan.

Keywords: semiquantitative assessment; hazards; receptors, multi-barriers; risk.

1. INTRODUÇÃO

Diante das incertezas em relação à disponibilidade hídrica para os diferentes usos pretendidos, nomeadamente nas regiões mais áridas do planeta, o reúso de água a partir do efluente tratado, se torna cada vez mais presente. Neste cenário, além de disponibilizar água de origem alternativa para diversos fins, a prática de reutilização de água alivia as pressões hídricas regionais, minimiza os impactos de conflitos pelo uso da água, incentiva o aumento dos índices de tratamento de esgotos e a melhoria das práticas operacionais para alcance da qualidade desejada, e minimiza a poluição hídrica, ao fomentar a utilização do efluente tratado em detrimento ao seu descarte nos corpos hídricos.

Diversas são as possibilidades de reúso de água, normalmente classificadas em potáveis e não potáveis, que demandam diferentes níveis de qualidade, relacionados aos usos pretendidos (ANGELAKIS et al., 2018). Os avanços tecnológicos permitem a produção de água reciclada de alta qualidade que pode atender aos padrões mais exigentes, de forma confiável. No entanto, caso o processo de tratamento seja inadequado ou de baixa confiabilidade, os contaminantes biológicos e químicos residuais podem representar um risco para a saúde humana (MUKHEREJEE e JENSEN, 2020). Esse risco pode ser maior ou menor, quanto mais ou menos exposto ao perigo, encontra-se o receptor, respectivamente (KHAN e ANDERSON, 2018).

Apesar da comprovada confiabilidade técnico-científica, o público em geral considera a água de reúso como de elevado risco para a saúde humana, principalmente quando se trata de reúso potável (WHO, 2017; SMITH et al., 2018). Essa rejeição psicológica da sociedade baseia-se na sua insegurança em relação às ações do governo e das prestadoras de serviços de saneamento básico, bem como na sua descrença quanto à ciência e na sua incredulidade sobre informações fornecidas para a qualidade de água (FIELDING et al., 2019). Para garantia da segurança, o risco deve ser avaliado e gerido corretamente, de modo que a transparência das ações e das informações forneça subsídios para o alcance de uma relação amistosa com a população e maior aceitação dos projetos de reúso de água (SMITH et al., 2018).

De maneira geral, a avaliação do risco desenvolve-se ao longo de quatro etapas, a fim de responder questões fundamentais para a implantação segura do projeto, minimizando, até

níveis aceitáveis, o risco para a saúde pública: i) identificação do perigo, ii) identificação das vias de exposição para os diferentes receptores, iii) caracterização da exposição de acordo com a dose; iv) caracterização do risco (APA, 2019; REBELO et al., 2020; ZHITENEVA et al., 2020).

O perigo (i) é associado aos agentes potencialmente causadores de danos à saúde pública, nomeadamente microrganismos relacionados às doenças de veiculação hídrica, geralmente representados por indicadores de contaminação fecal (ZHITENEVA et al., 2020). As vias de exposição (ii), consideradas ingestão, inalação ou adsorção, são assumidas como de contato direto ou indireto, para diferentes receptores (ii), tais como seres humanos, animais (domésticos ou pecuários), vegetação paisagística ou culturas agrícolas (alimentícias ou não) (APA, 2019; WHO, 2015). A caracterização (iii) deve retratar, com o maior detalhamento possível, as potenciais situações de exposição dos receptores à água de reúso; por este motivo, trata-se da etapa mais crítica, que envolve subjetividade e incertezas (APA, 2019). Por fim, a caracterização do risco (iv) consiste na quantificação e priorização do risco à saúde humana decorrente, diretamente, dos fatores associados ao perigo, rotas de exposição, cenários aplicáveis e múltiplas barreiras instaladas (REBELO et al., 2014).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) sugere várias abordagens de avaliação do risco (WHO, 2016) que podem responder às diferentes necessidades de gestão. São modelos qualitativos e semiquantitativos ou métodos matemáticos quantitativos, além da inspeção sanitária que envolve uma abordagem simples e eficaz para pequenos fornecimentos de água (WHO, 2016).

A avaliação qualitativa ou semiquantitativa, se apoia na abordagem da matriz de risco que permite avaliar diferentes riscos associados à qualidade da água, envolvendo uma avaliação da probabilidade de ocorrência de um perigo e da sua gravidade ou consequência, caso aconteça. Já a avaliação quantitativa, conhecida pela sigla QMRA (Quantitative Microbiological Risk Assessment) ou em português, AQRM (Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico) combina o conhecimento científico sobre a presença e a natureza dos agentes patogênicos, o seu potencial destino e transporte no ciclo da água e os cenários de exposição referentes aos intervenientes, e os seus efeitos na saúde que resultam dessa exposição (WHO, 2016). Todas as abordagens, de maneiras diferentes, estimam os possíveis riscos

associados à prática de reúso, com o objetivo de reduzi-los até um nível mínimo considerado aceitável.

De acordo com APA (2019), em casos de ocorrência de exposição direta à água de reúso, em particular ingestão ou inalação, podem ser utilizados modelos matemáticos quantitativos, similares ao QMRA, proposto por WHO (2006) especificamente para as águas de consumo humano. Segundo Rebelo et al. (2020), esses modelos são complexos e apresentam uma alta incerteza na medida em que requerem dados locais extensos que nem sempre estão disponíveis para usos não potáveis. Na prática, essa limitação de dados acaba por exigir que muitas suposições sejam tomadas durante este processo (ZHITENEVA et al., 2020), absorvendo grandes incertezas para o resultado final (REBELO et al., 2020).

Vieira (2013) afirma que o modelo quantitativo, em função das características já descritas, tem grande aplicabilidade para a avaliação do risco no cenário de águas de abastecimento. Zhiteneva et al. (2020) corroboram, ao indicarem o método, em caso de reutilização, somente para fins de potabilidade (direto ou indireto).

Para lidar com as limitações da avaliação quantitativa de risco microbiológico, metodologias semiquantitativas podem ser adotadas para usos não potáveis, assim como o modelo desenvolvido por Rebelo (2018), o qual foi baseado no método qualitativo apresentado pela International Organization for Standardization (ISO). Segundo Rebelo et al. (2020), esse modelo semiquantitativo, aplicado na legislação portuguesa (PORTUGAL, 2019), compreende a utilização de uma abordagem qualitativa empírica de julgamento para avaliar a importância relativa para perigos, rotas de exposição e cenários de contato, e multibarreiras no local. Assim, os dados de entrada podem ser as normas de qualidade que representam indiretamente as doses eventualmente toleráveis (APA, 2019).

Neste contexto, Rebelo et al. (2020) afirmam que os regulamentos que viabilizam legalmente a prática de reúso de água, devem levar em consideração, não somente padrões limites para determinados parâmetros de qualidade de água e sim, um plano de gestão de risco, associado especificamente ao empreendimento em questão. O plano de gestão de riscos é elaborado tendo em consideração a probabilidade de ocorrência de todos os perigos (físicos, químicos e

microbiológicos), associada à severidade das suas consequências, e à eficácia das barreiras instaladas e a instalar, em todas as operações associadas ao reúso (APA, 2019).

Os métodos semiquantitativos são mais apropriados às diferentes modalidades de reúso de água não potável, que levam em consideração a abordagem *fit-for-purpose* (ajustado à proposta) (REBELO et al., 2020). Nessa modalidade, é possível combinar barreiras físicas, químicas ou biológicas de modo a minimizar o risco, mesmo considerando águas com mais alta possibilidade de dano. As barreiras podem, efetivamente, reduzir unidades logarítmicas de densidades de microrganismos (*Coliformes termotolerantes* ou *Escherichia coli*), ou podem, simplesmente, representar essa redução. Isso significa que águas com uma densidade inadequada de microrganismos para determinado uso, podem tornar-se adequadas, não pela redução dessa carga, mas pela implantação de uma ou mais barreiras equivalentes, que representem essa redução. Segundo APA (2019), barreira equivalente é uma medida de controle que produz um resultado equivalente a uma determinada redução microbiológica correspondente à eliminação de perigo determinado ou redução do mesmo até um nível aceitável.

A discussão atual sobre as diferentes modalidades de avaliação de risco, segundo Zhiteneva et al. (2020), pode ajudar a estabelecer modelos de avaliação de risco mais informativos e abrangentes em estudos futuros sobre o tema reúso de água, que continua a crescer. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é propor uma orientação técnica de aplicação do modelo semiquantitativo de avaliação de risco microbiológico, para a saúde humana, de forma a garantir a segurança da prática de reúso de água, para irrigação, no Brasil.

2. AVALIAÇÃO SEMIQUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO

A metodologia de avaliação de risco, baseada em modelo semiquantitativo e apresentada por Rebelo (2018) e Rebelo et al. (2020), aborda o conceito *fit-for-purpose* sugerido por ISO (2020). Essa abordagem envolve a produção de água de reúso, com a qualidade adequada às necessidades dos usuários finais. Nesse sentido, a ISO não tem por objetivo impor ou estabelecer padrões, mas sim, fomentar a elaboração de regulamentos e documentos compatíveis com a

realidade de cada região (ISO, 2020).

A abordagem da ISO já é adotada por outros países do mundo e pela União Europeia, por meio da recente *Regulation* (EU) 2020/741 (EU, 2020), com o objetivo de garantir a segurança da prática de reúso para fins de irrigação. Neste contexto, na presente Nota Técnica, encontra-se apresentada uma aplicação do método Semiquantitativo de Avaliação de Risco Microbiológico (ASqRM) no contexto nacional.

De maneira geral, a metodologia ASqRM é dividida em quatro etapas, que coincidem com aquelas apresentadas na planilha de cálculo disponibilizada como material suplementar:

- Etapa 1 – Identificação do perigo;
- Etapa 2 – Identificação das vias de exposição para os diferentes receptores;
- Etapa 3 – Cenarização da exposição de acordo com a dose;
- Etapa 4 – Caracterização do Risco.

2.1. ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO

Inicialmente, deve ser identificado o Perigo relacionado à prática de reúso de água na irrigação, que configura o risco microbiológico. Nesta etapa são identificados os possíveis agentes que possuem potencial de causar efeitos adversos. De acordo com a APA (2019) o Perigo pode ser caracterizado como aquele que possui a capacidade de ocasionar danos à saúde humana e ao meio ambiente, a curto ou longo prazo.

Segundo ISO (2020), até os dias atuais, não há evidências de efeitos adversos dos contaminantes de preocupação emergente (resíduos de fármacos e de produtos de higiene pessoal) na saúde humana ou no meio ambiente por irrigação com água de reúso ou por consumo de culturas irrigadas com água de reúso. Assim, os

perigos inerentes à água de reúso a ser disponibilizada para a irrigação, relacionam-se principalmente ao conteúdo microbiológico, em especial os microrganismos patogênicos.

Os seres humanos são a principal fonte dos agentes patógenos presentes nos esgotos e para a averiguação da patogenicidade do efluente, utiliza-se o grupo “Coliformes”, considerados indicadores de contaminação fecal. Segundo Sperling (2014), o grupo dos Coliformes Termotolerantes (CTermo) envolve, preferencialmente, bactérias de origem intestinal humana ou de animal; porém, envolve ainda, as de origem não fecal. Isso significa que o indicador CTermo não garante que a contaminação seja exclusivamente fecal. Por outro lado, a *Escherichia coli* (E. coli), além de ser a principal bactéria do grupo CTermo, é exclusivamente de origem fecal (SPERLING, 2014), configurando-se como uma variável mais adequada para definição do Perigo associado à saúde humana em práticas de irrigação com água de reúso (ZHITENEVA et al., 2020; CHHIPI-SHRESTHA et al., 2017).

De acordo com Santos et al. (2020), no Brasil, o parâmetro CTermo é o mais utilizado como padrão indicador de contaminação fecal em documentos reguladores de reúso de água, além de ser o único parâmetro comum para todos os documentos analisados pelos autores. Destaca-se ainda que outros organismos (Ex.: ovos de helmintos) podem ser utilizados como indicadores de contaminação fecal sem que haja prejuízos (APA, 2019; INTERÁGUAS, 2017).

Para o desenvolvimento do presente trabalho, adotou-se a classificação do Perigo relacionado à qualidade da água de reúso apresentada na Tabela 1. Nela podem ser obtidos os valores de classificação do Perigo em relação ao padrão de E. coli e de acordo com o nível do efluente tratado.

Tabela 1: Classificação do Perigo baseada nos tipos de tratamento de efluente e consequente qualidade microbiológica

Nível	<i>E. coli</i> (NMP/100mL)	Classificação o	Opção de tratamento
V	$E. coli \geq 10^4$	9	Secundário
IV	$10^3 < E. coli < 10^4$	7	Secundário + desinfecção
III	$10^2 < E. coli \leq 10^3$	5	Avançado
II	$10^1 < E. coli \leq 10^2$	3	Secundário + desinfecção + cloração
I	$E. coli \leq 10^1$	1	Avançado + cloração

Fonte: Adaptado de Rebelo (2018) e APA (2019).

2.2. ETAPA 2 - IDENTIFICAÇÃO DAS VIAS DE EXPOSIÇÃO PARA OS DIFERENTES RECEPTORES

Nesta etapa são identificados os possíveis receptores (Passo 1) que possuem susceptibilidade à exposição, por meio das seguintes vias: ingestão, inalação e adsorção dérmica, de forma direta ou indireta. Posteriormente, para cada receptor identificado, é necessário atribuir as vias de exposição (Passo 2).

Passo 1 – Identificação dos receptores envolvidos

Os receptores envolvidos devem ser identificados de acordo com as principais características do projeto analisado, tais como método e sistemas de irrigação, tipologia de cultura, localização da área, vizinhança, entre outros. Os potenciais receptores são aqueles que estão susceptíveis à exposição, destacando-se o ser humano, animais e vegetação (APA, 2019).

De acordo com Rebelo (2018), os seres humanos podem ser separados por faixa etária, por função ocupada na cadeia produtiva e por aderência com o projeto. No caso da faixa etária, as crianças, os adolescentes e os idosos, normalmente, são mais susceptíveis do que os adultos. Em relação à função na cadeia produtiva, destaca-se maior vulnerabilidade dos agricultores e operadores do sistema (produtores) do que dos comerciantes, pelo fato de o primeiro grupo estar mais próximo ao evento da irrigação. E, em relação à aderência com o projeto, consumidores e vizinhança apresentam diferentes graus de susceptibilidade, em se tratando da distância a que se encontra a vizinhança dos sistemas de irrigação e da forma de consumo da cultura por parte dos consumidores.

Já os animais, normalmente são diferenciados em domésticos e de origem pecuária, sendo que neste caso, cada ambiente determina uma maior ou menor susceptibilidade, a depender das características locais do empreendimento. Por fim, a vegetação é classificada em agrícola ou paisagística (ISO, 2020). Ambas podem estar em concomitância em um projeto dessa natureza. Entretanto, a vegetação paisagística é mais característica de ambientes urbanos e a agrícola, de ambientes rurais.

No desenvolvimento deste passo, é importante avaliar com critério, todas as características envolvidas com a identificação dos

receptores. Os receptores e suas respectivas susceptibilidades ao perigo, são sempre distintas em cada projeto de reutilização de água na irrigação dos diferentes tipos de cultura. Assim, destaca-se a importância da aplicação da ASqRM, que aborda todos os aspectos, de maneira mais completa do que aquela simplista, que leva em consideração somente se o tipo de cultura é para consumo humano ou não, se é consumida crua ou não, com ou sem remoção de casca e se é desenvolvida rente ou distante do solo.

Passo 2 – Receptores x vias de exposição

De acordo com Rebelo et al. (2020), as vias de exposição (ingestão, inalação e adsorção dérmica) e suas ocorrências (direta ou indireta) podem se combinar de diferentes formas, a exemplo da via ingestão, por ocorrência direta, que pode ser intencional, acidental, pela falta de informação sobre a potabilidade da água, inadvertidamente pela ingestão de microgotículas durante a irrigação por aspersão, entre outros.

A inalação por seres humanos acontece de forma direta por aspiração da água de reúso, por exemplo, em casos de irrigação por aspersão; e de forma indireta, por meio de animais domésticos que levam as gotículas para esses ambientes. Já a adsorção se dá por meio do contato com superfícies molhadas ou úmidas, por ocorrência direta ou indireta (APA, 2019).

De acordo com a OMS (2006), as vias de exposição de mais alto risco em relação à água de reúso são a ingestão e a inalação, principalmente em situações em que são produzidos aerossóis, como o caso da irrigação por aspersão; sobre a adsorção dérmica, menores evidências de infecção são conhecidas.

De maneira geral, para os receptores ser humano e animal, as três vias de exposição são possíveis (ingestão, inalação e adsorção). Por outro lado, no caso da vegetação, somente a via de exposição por meio da adsorção é possível.

2.3. ETAPA 3 - CENARIZAÇÃO DA EXPOSIÇÃO DE ACORDO COM A DOSE

Passo 1 – Cenários de exposição

A elaboração dos cenários de exposição é apontada como uma das etapas que mais demanda atenção devido à complexidade da análise e ao elevado nível de incerteza, principalmente em áreas de acesso irrestrito com elevada circulação de pessoas (REBELO et al., 2020). É imprescindível a exposição de todos os

cenários possíveis, independentemente da probabilidade de sua ocorrência (APA, 2019).

Rebello et al. (2020) apresentam e discutem vários cenários para as diferentes vias de exposição (ingestão, inalação e adsorção) e suas ocorrências (direta e indireta) em projetos de reutilização em ambientes urbanos, agrícolas e industriais. No entanto, de maneira mais simplificada e aplicada à irrigação agrícola, os cenários mais comuns podem ser classificados da seguinte forma:

- **exposição direta:** i) ingestão inadvertida durante a irrigação; ii) ingestão intencional a partir do sistema de irrigação; iii) inalação de microgotículas durante a irrigação; iv) adsorção por contato com a cultura irrigada; v) adsorção por contato com o sistema de irrigação; vi) adsorção por contato com outras superfícies.
- **exposição indireta:** i) ingestão a partir do contato com animais no contexto rural; ii) ingestão da cultura; iii) ingestão do solo; iv) adsorção por contato com animais no contexto rural; v) adsorção pelo contato da cultura irrigada com as pessoas envolvidas.

Passo 2 – Atribuição dos fatores de importância para as vias e os cenários de exposição

Para cada cenário de exposição é importante levar em consideração as características específicas do local e dos hábitos regionais, bem como dos critérios operacionais de aplicação da água de reúso. Ainda, para cada tipo de receptor o valor atribuído deve variar em função do entendimento de maior ou menor exposição em cada situação e das evidências descritas na literatura, relacionadas à infecção associada aos cenários, conforme apresentado por (REBELO et al., 2020). Este passo engloba elevado grau de

incertezas devido à ausência de dados que demonstrem as infecções relacionado ao uso não potável (REBELO et al., 2020).

No contexto da ASqRM, fatores de importância (f_i), relacionados à probabilidade de infecção, são atribuídos aos distintos receptores, para cada cenário estabelecido, com valores que variam de 1 a 9 (SAATY, 1980), em função de uma abordagem qualitativa empírica de julgamento. De acordo com Rebello et al. (2014), o uso dessa escala permite tratar a complexidade do problema por meio da sua decomposição em fatores claros e dimensionáveis, facilitando o estabelecimento de relações comparativas para a construção de hierarquias e a definição de prioridades.

Com o intuito de reduzir as incertezas, a análise deve sempre considerar a perspectiva de pior caso possível; cenários que apresentam vias de exposição com elevada importância de infecção devem ser considerados com os mais altos f_i (REBELO et al., 2020). Para as atribuições de f_i , devem ser apontadas justificativas condizentes e adequadas à cada situação. De acordo com Rebello et al. (2020), essa justificativa, baseada nas hierarquias construídas e nas prioridades definidas, proporciona uma minimização das incertezas, além de intensificar a avaliação do risco, garantindo maior confiabilidade.

Na Tabela 2 podem ser observados os f_i relacionados aos cenários de exposição ($f_{i \text{ cen exp}}$). Para níveis intermediários entre dois julgamentos podem ser atribuídos valores de 2, 4, 6 ou 8 de acordo com a necessidade.

Na Tabela 3 são apresentados os f_i aplicáveis à cada via de exposição ($f_{i \text{ via exp}}$) e as justificativas respectivamente associadas. Entretanto, as seguintes variações são admitidas (REBELO et al., 2020): para via de ingestão é sempre atribuído o valor 9, para inalação, 5 ou 9, e para adsorção dérmica, o valor 3.

Tabela 2: Fator de importância aplicáveis a cada cenário de exposição ($f_{i \text{ cen exp}}$)

Nível de importância	$f_{i \text{ cen exp}}$
Absoluta (via de infecção extremamente elevada)	9
Demonstrada (via de infecção essencial ou forte)	7
Eventual (via de infecção possível)	5
Fraca (ausência de dados sobre a via de infecção)	3
Baixa (ausência de via de infecção)	1

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Tabela 3: Fator de importância aplicável à cada via de exposição ($f_{i \text{ via exp}}$)

Via de exposição	$f_{i \text{ via exp}}$	Justificativa
Ingestão	9	Via de importância absoluta
Inalação	9	Via de importância absoluta em irrigação por aspersão
Adsorção	5	Via de importância eventual em outros sistemas de irrigação
	3	Via de fraca importância devido à ausência de dados de infecção

Fonte: Adaptado de Rebelo et al. (2020).

Passo 3 – Cálculo da Vulnerabilidade do receptor

O cálculo da Vulnerabilidade (Equação 4) deve ser realizado para cada receptor e, para isso, devem ser adotadas as Equações 1, 2 e 3, todas adaptadas de Rebelo (2018) e Rebelo et al. (2020). A Equação 1 caracteriza uma soma das relações individuais entre o f_i da via de exposição e o número de cenários para cada situação. Na Equação 2 é realizado o somatório do produto do f_i da via de exposição com o f_i do cenário de exposição. Já na Equação 3 tem-se o cálculo do fator de normalização, onde o fator de importância máximo é igual a 9, pois considera-se o maior valor de importância.

- Somatório do $f_{i \text{ via exp}}$

$$\sum(f_{i \text{ via exp}} \times n^{\circ} \text{ cen exp}_i) \quad (1)$$

Onde:

$f_{i \text{ via exp}}$ = fator de exposição de cada via de exposição.
 $n^{\circ} \text{ cen exp}_i$ = número de cenários aplicável a cada receptor.

- Somatório do produto do ($f_{i \text{ via exp}}$) com o ($f_{i \text{ cen exp}}$)

$$\sum(f_{i \text{ via exp}} \times f_{i \text{ cen exp}}) \quad (2)$$

Onde:

$f_{i \text{ via exp}}$ = fator de exposição de cada via de exposição.
 $f_{i \text{ cen exp}}$ = fator de importância de cada cenário de exposição.

- Cálculo do fator de normalização

$$f_{i \text{ máx}} \times \sum(f_{i \text{ via exp}} \times n^{\circ} \text{ cen exp}_i) \quad (3)$$

Onde:

$f_{i \text{ máx}}$ = valor máximo da escala de fatores de importância ($f_{i \text{ máx}} = 9$)

$n^{\circ} \text{ cen exp}_i$ = número de cenários aplicável a cada receptor.

- Cálculo da Vulnerabilidade

$$V_{\text{receptor}} = \frac{\sum(f_{i \text{ via exp}} \times f_{i \text{ cen exp}})}{f_{\text{normalização}}} \quad (4)$$

Onde:

$f_{i \text{ via exp}}$ = fator de exposição de cada via de exposição.
 $f_{i \text{ cen exp}}$ = fator de importância de cada cenário de exposição.
 $f_{\text{normalização}}$ = fator de normalização.

2.4. ETAPA 4 - CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

Passo 1 – Identificação das barreiras

Com o objetivo da minimização do contato da água de reúso com os receptores, pelas vias de exposição (direta e indireta) através da ingestão, inalação e adsorção dérmica, é introduzido o conceito de barreiras físicas ou químicas (ISO, 2020). Dessa forma, uma barreira pode ser definida como o meio de redução e prevenção dos riscos associados à saúde e ao meio ambiente, evitando o contato com a água de reúso e/ou melhorando sua qualidade (ISO, 2020).

Assim, a qualidade da água não se configura como o único parâmetro de garantia da proteção à saúde em projetos de reúso. Outras opções, como tipo e horário de irrigação, características das culturas ou opções de colheita podem limitar o contato entre os receptores e os organismos patogênicos presentes na água de reúso (REBELO et al., 2020). A barreira exerce um papel de equivalência em relação à patogenicidade da água de reúso, mesmo que esta ainda apresente valores mais elevados do que o máximo aceitável para o padrão indicador de contaminação fecal, para aquele fim (ISO, 2020).

Assim, ao considerar essas opções, a água de reúso com menor qualidade pode ser usada

para diferentes fins em contexto de barreiras múltiplas (REBELO et al., 2020). Neste caso, o risco é minimizado, pois a probabilidade de falha de múltiplas barreiras é inferior à probabilidade de falha de uma única barreira (APA, 2019). O princípio básico das múltiplas barreiras é que a falha de uma barreira pode ser compensada pela

operação eficaz das barreiras restantes, de forma a tornar o projeto mais confiável.

Na Tabela 4 estão apresentados tipos de barreiras, suas correspondentes reduções de unidades logarítmicas de organismos patogênicos e o número associado de barreiras equivalentes.

Tabela 4: Barreiras e número de barreiras equivalentes associadas à redução de organismos patogênicos para irrigação de culturas alimentícias com água de reúso

Tipo de barreira	Aplicação	Redução de Patógenos (unidades logarítmicas)	Número de barreiras equivalentes
Irrigação por gotejamento	Irrigação por gotejamento com crescimento próximo do solo (25 cm), crescimento distante do solo (50 cm) ou subterrâneo ¹	2 – 6	1 - 3
Irrigação por aspersão	Irrigação por aspersão e microaspersão de culturas de crescimento, próximo do solo (25 cm) ou de árvores frutíferas distantes do solo (50 cm) ¹	2 – 4	1 - 2
Cloro residual	Desinfecção que garanta concentração residual menor que < 1 mg.L ⁻¹ (baixo nível) ou que garanta concentração residual menor que > 1 mg.L ⁻¹ (alto nível) ²	2 – 4	1 - 2
Redução de organismos patogênicos	Interrupção da irrigação antes da colheita	0,5 a 2 por dia	1 - 2
Lavagem antes da venda para o consumidor	Lavagem das culturas de legumes, verduras e frutas com água potável	1	1
Desinfecção antes da venda para o consumidor	Lavagem das culturas de legumes, verduras e frutas com solução desinfetante e enxague com água potável	2	1
Remoção da casca	Descascamento das frutas e raízes	2	1
Cultura de consumo após o cozimento	Imersão em água fervente ou em altas temperaturas até o cozimento do produto	6 – 7	3
Restrição do acesso	Restrição de entrada no local irrigado por 1 dia ou mais após a irrigação ou 5 dias ou mais após a irrigação ³	0,5 a 2 – 2 a 4	1 - 2
Secagem de safras de forragem	Culturas forrageiras ou outras que são expostas para secagem ao sol e colhidas antes do consumo	2 a 4	2

Legenda: 1 – Culturas com crescimento mais próximo do solo apresentam valores mais baixos de redução de patógenos e de barreiras equivalentes; o oposto é verdadeiro. 2 – Desinfecção de baixo nível está associada a valores mais baixos de redução de patógenos de barreiras equivalentes; o oposto é verdadeiro. 3 – Inclui trabalhadores e animais; quanto mais dias de restrição de acesso, mais elevada pode ser considerada a redução de patógenos e o número de barreiras equivalentes. Fonte: Adaptado de ISO (2020) e WHO (2006).

Passo 2 - Determinação do Dano

Neste ponto, é analisada a severidade do dano *versus* a probabilidade de falha de cada barreira associada ao projeto, definida no Passo 1. Vieira (2018) apresenta um modelo de aplicação

generalizada para este tipo de análise, denominada matriz de priorização (Figura 1), cujas células, agrupadas num determinado número de classes, representam valores, relacionando a probabilidade (frequência) da ocorrência dos

eventos com a consequência (severidade) dos respectivos impactos. De maneira análoga e

adaptada, adota-se a matriz de Dano apresentada na Figura 2.

Figura 1: Modelo generalizado de matriz de priorização

Probabilidade	Consequência				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Rara	B	B	M	A	A
Improável	B	B	M	A	E
Moderada	B	M	A	E	E
Alta	M	A	A	E	E
Muito Alta	A	A	E	E	E

Obs.: B – Risco baixo ou negligenciável; M – Risco moderado; A – Risco de grande impacto; E – Risco extremo. Fonte: Vieira (2018).

Figura 2: Matriz de determinação do Dano parcial para cada barreira

Severidade dos danos ↓	Probabilidade				
	Rara	Pouco provável	Possível	Provável	Quase certa
Insignificante	1	1	2	2	3
Fraco	1	2	4	4	5
Moderado	2	4	4	6	7
Forte	2	4	6	8	9
Severo	3	5	7	9	9

Fonte: Adaptado de Rebelo (2020) e Vieira (2018).

Primeiramente, deve-se realizar o somatório dos danos parciais (Equação 5), referentes à cada barreira associada ao projeto. Posteriormente, procede-se com o cálculo do fator de normalização (Equação 6). E, por fim, calcula-se o Dano (Equação 7) a partir das duas anteriores; todas adaptadas de Rebelo (2018) e Rebelo et al. (2020).

- Somatório dos danos parciais (d_i)

$$\sum(d_i * n) \quad (5)$$

Onde:

d_i = danos parciais = severidade dos danos x probabilidade de falha na barreira.

n = número de barreiras equivalentes de acordo com a tabela 4.

- Cálculo do fator de normalização

$$f_{normalização} = (f_{i_{máx}} * n) \quad (6)$$

Onde:

$f_{i_{máx}}$ = valor máximo da escala da matriz de dano ($f_{i_{máx}} = 9$)

n = número de barreiras equivalentes de acordo com a Tabela 4.

- Cálculo do Dano

$$Dano = \frac{\sum(d_i * n)}{f_{normalização}} \quad (7)$$

Onde:

d_i = danos parciais = severidade dos danos x probabilidade de falha na barreira.

n = número de barreiras equivalentes de acordo com a tabela 4.

$f_{normalização}$ = fator de normalização

Passo 3 – Estimativa do Risco

Neste passo procede-se com o cálculo da estimativa do Risco para cada receptor de acordo com a Equação 8, adaptada de Rebelo (2018) e Rebelo et al. (2020).

$$R_{receptor} = Perigo * Dano * V_{receptor} \quad (8)$$

Onde:

$R_{receptor}$ = Risco estimado para cada receptor

$V_{receptor}$ = Vulnerabilidade de cada receptor

O Perigo foi previamente estabelecido na Tabela 1 (Etapa 1), o Dano foi calculado por meio da Equação 5 (Etapa 4 – Passo 2) e a Vulnerabilidade de cada receptor por meio da Equação 4 (Etapa 3 – Passo 3).

O Risco Global (R_{Global}) é uma média aritmética entre os riscos individuais associados a cada receptor, conforme apresentado na Equação 9.

O Risco Global apresenta valores que variam entre maior que zero e menor que nove,

dependendo das características envolvidas em cada projeto (cenários, fatores de importância atribuídos, barreiras etc.). A priorização é alcançada pela conversão do R_{Global} em uma escala qualitativa de três níveis, conforme apresentado na Tabela 5 e adotado por outros autores (REBELO et al., 2020).

$$R_{Global} = \frac{\sum R_{Receptor}}{N_{Receptores}} \quad (9)$$

Em caso de Risco Global inaceitável, é necessário realizar a repetição de todo o processo, de forma a reavaliar as etapas, com novas ações como alteração do nível de tratamento do efluente e aplicações de novas barreiras de forma a alcançar um risco aceitável ou desprezável. Caso o nível minimamente aceitável não seja obtido, considera-se inviável a implantação do projeto (APA, 2019).

Uma vez atingido o nível de Risco adequado a um projeto específico, o Perigo previamente estabelecido (neste caso uma determinada densidade de E. coli) na caracterização do risco pode ser validado de modo equivalente ao padrão de qualidade (PORTUGAL, 2019).

Tabela 5: Níveis de Risco Global na escala quantitativa e qualitativa

Nível do Risco Global	
Escala Quantitativa	Escala Qualitativa
$0 < R_{Global} < 3$	Risco global desprezável
$3 \leq R_{Global} < 7$	Risco global aceitável
$7 \leq R_{Global} < 9$	Risco global inaceitável

Fonte: Rebelo (2018).

3. ORIENTAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO ASQRM NA IRRIGAÇÃO

Com o objetivo de disseminação da ASqRM para a irrigação com água de reúso, foi realizado um exemplo de aplicação do método, com as principais características apresentadas na Tabela 6. Na Tabela 7 estão apresentados, para o exemplo proposto, os cenários (Etapa 3) e a caracterização do Risco (Etapa 4), com seus respectivos valores atribuídos (f_i e dano parcial), calculados (Vulnerabilidade e Dano) e estimados (Risco receptor e Risco Global).

É importante ressaltar que a legislação de

Portugal (PORTUGAL, 2019), além de definir padrões para E. Coli, indica a necessidade do estudo de avaliação de risco, baseada na metodologia aqui descrita. O diploma ainda define o número de barreiras aplicáveis para cada uso previsto, conforme indicado por ISO (2020). Assim, adotou-se para o exemplo, uma situação que permite irrigação com restrição de acesso, em culturas consumidas crua, que crescem acima do solo, e em que a parte consumível não está em contato direto com a água (Classe C; E. Coli $\leq 10^3$; 3 barreiras aplicáveis). Para aplicação em outras situações, há que se levar em consideração os aspectos do diploma.

Tabela 6: Características gerais do exemplo proposto (Etapas 1 e 2)

Item	Característica
Método de irrigação; Sistema de irrigação	Localizado; Gotejamento
Características da cultura	Alimentícia, consumida crua, com remoção de casca, desenvolve distante do solo, água de irrigação não tem contato com a cultura
Identificação do Perigo; receptores	7; agricultor e consumidor

Tabela 7: Desenvolvimento das Etapas 3 e 4 em relação ao exemplo proposto

Cenário	Ser humano					
	Agricultor			Consumidor		
	f _{i cen exp}	f _{i via exp}	Justificativa	f _{i cen exp}	f _{i via exp}	Justificativa
i) ingestão inadvertida durante a irrigação	9	9	Absoluta. Sempre elevada	-	-	Não aplicável
ii) ingestão intencional a partir do sistema de irrigação	9	9	Absoluta. Sempre elevada	-	-	Não aplicável
iii) ingestão da cultura	3	9	Fraca. Cultura não tem contato com a água	3	9	Fraca. Cultura não tem contato com a água
iv) ingestão do solo	5	9	Eventual. Cultura sem contato com o solo, mas pode ser armazenada no solo eventualmente úmido	5	9	Eventual. Cultura sem contato com o solo, mas pode ser armazenada no solo eventualmente úmido
v) inalação de microgotículas durante a irrigação	5	5	Eventual. Sistema de irrigação é gotejamento	-	-	Não aplicável
vi) adsorção por contato com a cultura irrigada, folhas e raízes	7	3	Demonstrada. Apesar do sistema de irrigação ser gotejamento	3	3	Fraca. Apesar do sistema de irrigação ser gotejamento
vii) adsorção por contato com o sistema de irrigação	5	3	Eventual. Sistema de irrigação é gotejamento	-	-	Não aplicável
viii) adsorção por contato com outras superfícies	5	3	Eventual. Sistema de irrigação é gotejamento	-	-	Não aplicável
S (f _{i via exp})		50			21	
S [(f _{i via exp}) x (f _{i cen exp})]		310			81	
fator de normalização		450			189	
Vulnerabilidade		0,69			0,43	
Barreiras: Irrigação por gotejamento - crescimento distante do solo (50 cm) e Remoção da casca - Descascamento das frutas						
Dano	0,63 (para todos os receptores)					
Risco Receptor		3,04			1,89	
Risco Global	2,46					

No exemplo proposto, optou-se por incluir cultura alimentícia de consumo preferencialmente cru, com remoção de casca, onde a cultura não tem contato direto com a água de reúso, em função do sistema de irrigação por gotejamento. Em relação aos receptores, observou-se, como já era de se esperar, maior Vulnerabilidade para o agricultor (0,69), em relação ao consumidor (0,43), que refletiu, de maneira análoga, em Risco maior para o agricultor (3,04) quando comparado ao consumidor (1,89). No caso do agricultor, o Risco apresentou-se levemente superior à faixa indicada como desprezável, mas ainda assim, aceitável; para o consumidor, se mostrou desprezável. O Risco Global (2,46) se apresentou dentro da faixa considerada como desprezável.

Toda essa contextualização demonstra a existência do Risco para a prática proposta, porém considerando que ela pode ser segura (no nível desprezável), desde que todos os aspectos previstos sejam assegurados. Para isso, é necessária a elaboração do Plano de Gestão do Risco, que segundo APA (2019), deve ter em consideração a probabilidade de ocorrência de todos os perigos (físicos, químicos e microbiológicos), associada à severidade das suas consequências, e a eficácia das barreiras instaladas e a instalar em todas as operações associadas ao reúso.

Destaca-se que as premissas aqui apresentadas podem ser alteradas, de modo que se adequem melhor ao projeto real, inclusive com a inclusão de outros receptores, caso seja necessário. Em situações de irrigação por aspersão, por exemplo, deve-se incluir o receptor “vizinhança”, que tem forte relação com a ingestão de microgotículas, dependendo da distância em que se encontra do sistema e do método de irrigação.

Essas adequações são as principais vantagens da metodologia, já que a realidade de cada projeto pode ser traduzida na estimativa do Risco. Assim, quanto mais detalhados forem os cenários, menor será a incerteza. Outro ponto forte do método é a possibilidade de reavaliações, em um processo iterativo, que permite uma avaliação estratégica. Caso o projeto se torne inviável (com Risco Global inaceitável), ou em casos em que se deseja passar da categoria aceitável ($3 \leq R \text{ Global} < 7$) para desprezável ($0 \leq R$

Global < 3), ou ainda com o simples objetivo de baixar o Risco, é possível alterar as barreiras e/ou incluir outras, de modo a apresentar diferentes soluções técnicas possíveis aos gestores e tomadores de decisão.

Para finalizar, é importante destacar que os resultados aqui apresentados para o exemplo proposto foram alcançados por meio do uso da planilha de cálculo apresentada como material suplementar. Neste caso, o objetivo é facilitar o acesso para os usuários. Entretanto, faz-se aqui uma ressalva em relação ao uso indiscriminado da planilha disponibilizada. O usuário deve aplicá-la sempre com muito critério, considerando as características locais reais de cada projeto de reutilização de água na irrigação. Destaca-se que o risco de contaminação microbiológica existe, mas pode ser minimizado com uma gestão adequada. Essa gestão, passa pela aplicação correta da metodologia ASqRM.

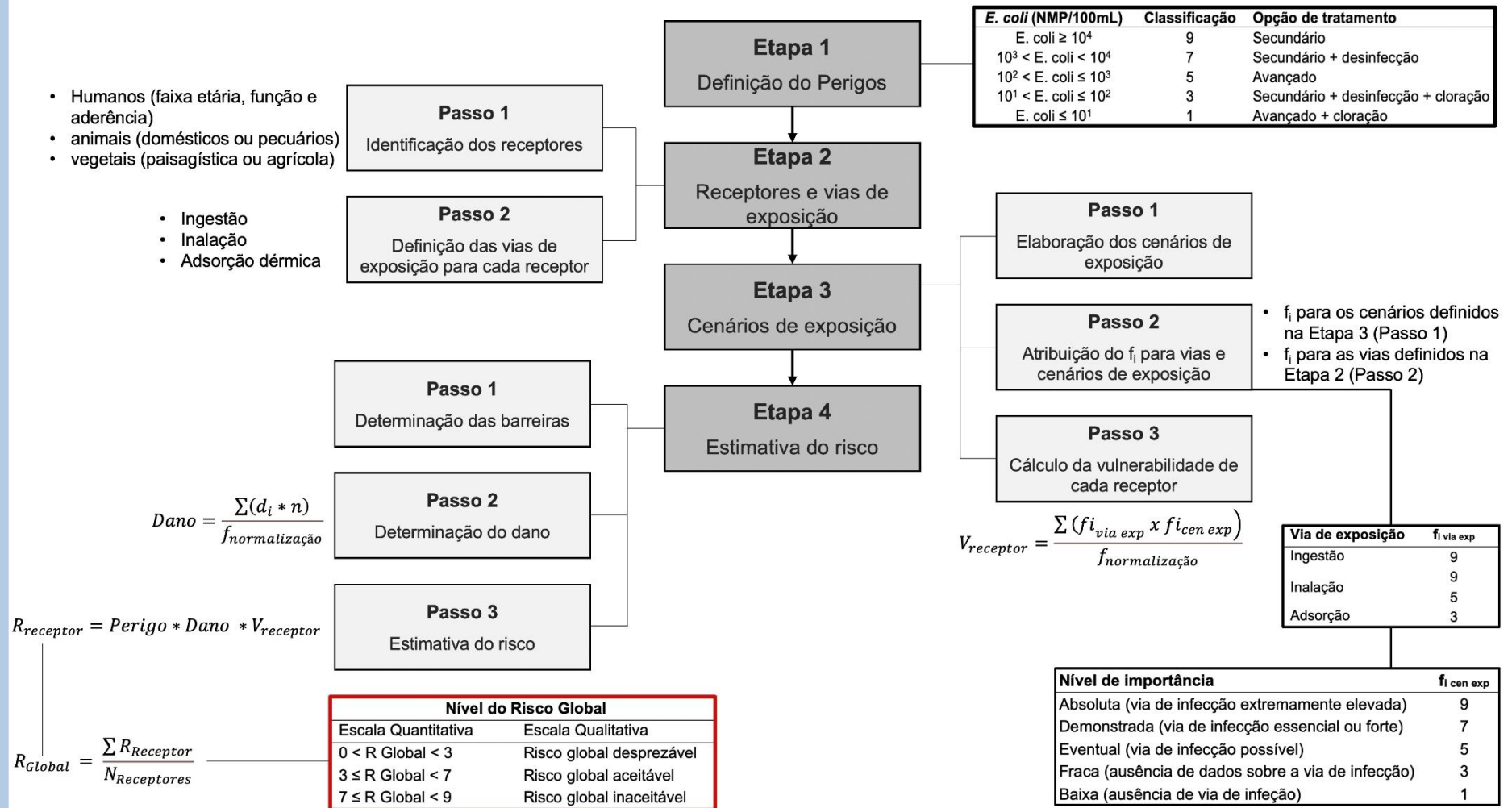
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma a facilitar o entendimento e o uso da metodologia, apresenta-se na Figura 3, um fluxograma de ações para a aplicação da ASqRM.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Dra. Anabela Rebelo (Técnica Superior do Departamento de Recursos Hídricos da Agência Portuguesa do Ambiente – APA), responsável pelo desenvolvimento e aplicação da metodologia semiquantitativa no contexto da regulamentação para reutilização de água em Portugal (Decreto 119/2019), pela revisão desta Nota Técnica.

Figura 3: Fluxograma de aplicação da metodologia de ASqRM



REFERÊNCIAS

- ANGELAKIS, A. N.; ASANO, T.; BAHRI, A.; JIMENEZ, B. E.; TCHOBANOGLIOUS, G. Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, 2018.
- APA. AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. **Guia para reutilização de água – usos não potáveis**. Lisboa: APA, 2019.
- CHHIPI-SHRESTHA, G.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Microbial quality of reclaimed water for urban reuses: Probabilistic risk-based investigation and recommendations. **Science of total Environment**, v. 576, p. 738-751, 2017.
- EU. **Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the council**. Of 25 May 2020. On minimum requirements for water reuse. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0741>>. Acesso em: 24 de jun. 2021.
- FIELDING, K. S.; DOLNICAR, S.; SCHULTZ, T. Public acceptance of recycled water. **International Journal of Water Resources Development**, v. 35, n. 4, p. 551-586, 2019.
- INTERÁGUAS. PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR ÁGUAS. **Elaboração de proposta de plano de ações para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil**. Produto III – Critérios de qualidade de água. Brasília. 2017.
- ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16075-1: 2020 – Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects - Part 2: Development of the project**. International Organization for Standardization, Geneva. 2020.
- KHAN, S. J.; ANDERSON, R. Potable reuse: Experiences in Australia. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 2, p. 55-60, 2018.
- MUKHERJEE, M.; JENSEN, O. Making water reuse safe: A comparative analysis of the development of regulation and technology uptake in the US and Australia. **Safety Science**, v. 121, p. 5-14, 2020.
- PORTUGAL. **Decreto Lei nº 119 de 21 de agosto de 2019**. Estabelece o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como da sua utilização. Lisboa, 2019.
- REBELO, A.; FERRA, I.; GONÇALVES, I.; MARQUES, A. M. A Risk Assessment Model for Water Resources: Releases of dangerous and hazardous substances. **Journal of Environmental Management**, v. 140, p. 51-59, 2014.
- REBELO, A. Reutilização de água: Abordagem para o desenvolvimento de práticas de reutilização de água. In: Atas do 14º Congresso da Água, Évora, Portugal, 2018. **Anais [...]**, Évora, Portugal, 2018.
- REBELO, A.; QUADRADO, M.; FRANCO, A.; LACASTA, N.; MACHADO, P. Water reuse in Portugal: New legislation trends to support the definition of water quality standards based on risk characterization. **Water Cycle**, p. 41-53, v. 1, 2020.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. 1ª Edição, McGraw-Hill, New York, NY, 1980.
- SANTOS, A. S. P.; GONÇALVES, R. F.; MELO, M. C. de; LIMA, M. A. M.; ARAUJO, B. M. de. Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reúso no Brasil. **Sustinere: Revista de Saúde e Educação**, v. 8, p. 437-462, 2020.
- SMITH, H. M.; BROUWER, S.; JEFFREY, P.; FRIJINS, J. Public responses to water reuse – Understanding the evidence. **Journal of Environmental Management**, v. 207, p. 43-50, 2018.
- SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2014.
- VIEIRA, J. M. P. Plano de Segurança da água em mananciais de abastecimento de água para consumo humano. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 1, n.1, pp. 87-97, 2013.
- VIEIRA, J. M. P. **Água e Saúde Pública**. Edições Sílabo, 2018.
- WHO. World Health Organization. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Volume 2: Wastewater use in agriculture. Geneva: World Health Organization. 2006.
- WHO. World Health Organization. **Sanitation safety planning: manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta**.

World Health Organization, 2015.

WHO. World Health Organization. **Quantitative Microbial Risk Assessment:** Application for Water Safety Management. World Health Organization, 2016.

WHO. World Health Organization. **Potable reuse:**

guidance for producing safe drinking-water. World Health Organization, 2017.

ZHITENEVA, V.; HÜBNER, U.; MEDEMA, G. J.; DREWES, J. E. Trends in conducting quantitative microbial risk assessments for water reuse systems: a review. **Microbial Risk Analysis**, v. 16, 2020.