

**Editora Dra. Gislaine Fongaro**

# **TENDÊNCIAS BIOTECNOLÓGICAS SUSTENTÁVEIS PARA FINS DE SAÚDE ÚNICA**

**PROSPECÇÃO DE  
MOLÉCULAS BIOATIVAS**

**PATÓGENOS VIRAIS  
E PARASITÁRIOS**

**CULTIVO CELULAR  
*IN VITRO***

**CITOTOXICIDADE**

**INTELIGÊNCIA  
ARTIFICIAL**



## Interação dos vírus entéricos com poluentes ambientais

DOI: 10.56041/9786599841859-1

**PAVI, Catielen P.**

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0003-2986-6900>

**ELOIS, Mariana A.**

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0003-2986-6900>

**SAVI, Beatriz P.**

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0002-7948-6212>

**JEMPIERRE, Yasmin F. S. H.**

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil  
<https://orcid.org/0000-00025805-9510>

**PILATI, Giulia V. T.**

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0001-9689-0279>

**CADAMURO, Rafael D.**

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0002-4096-9022>

**ZANCHETTA, Lucas**

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil  
<https://orcid.org/0000-0002-4096-9022>

**FONGARO, Gislaine\***

Laboratório de Virologia Aplicada, Departamento de Microbiologia, Imunologia e  
Parasitologia, CCB/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

<https://orcid.org/0000-000155963320>

\*Autor correspondente: gislainefongaro@gmail.com / gislaine.fongaro@ufsc.br

## RESUMO

Os vírus entéricos, que afetam o sistema gastrointestinal humano, podem ser transmitidos por meio da ingestão de água e alimentos contaminados, bem como pelo contato direto com superfícies e pessoas infectadas. Esses vírus interagem com diversos poluentes ambientais, que podem ser originados de fontes industriais, agrícolas ou domésticas, incluindo contaminantes químicos, metais pesados, microplásticos e resíduos orgânicos presentes no solo, ar e águas superficiais e subterrâneas. A presença desses poluentes pode alterar a sobrevivência, persistência, transporte e disseminação dos vírus entéricos, aumentando o risco de contaminação da água e dos alimentos. Além disso, os poluentes ambientais podem resultar na bioacumulação de vírus em plantas e animais aquáticos. Também é importante destacar que esses poluentes têm o potencial de comprometer os processos de tratamento de águas residuárias utilizados atualmente, contribuindo para a ocorrência de surtos de doenças gastrointestinais e afetando a saúde pública. Nesse contexto, a pesquisa sobre as interações entre vírus entéricos e poluentes ambientais desempenha um papel crucial na mitigação desses riscos. É essencial implementar o monitoramento rigoroso da qualidade da água e dos alimentos, bem como adotar medidas de redução da poluição ambiental e o uso de tratamentos adequados para água e esgoto.

**Palavras-chave:** Rota feco-oral; Micropoluentes ambientais; Macropoluentes ambientais; Persistência viral; Mitigação de poluentes.

## INTRODUÇÃO AOS VÍRUS ENTÉRICOS E POLUENTES AMBIENTAIS

A gastroenterite aguda é um dos problemas de saúde mais comuns em todo o mundo. Grupos diversificados de patógenos virais, bacterianos e parasitas podem causar sintomas entéricos agudos, incluindo náuseas, vômitos, dor abdominal, febre e diarreia aguda (Stuempfig & Seroy, 2023).

Os patógenos virais responsáveis pelas gastroenterites virais permaneceram desconhecidos até a década de 1970. Entretanto, estudos utilizando microscopia eletrônica do conteúdo intestinal resultaram na descoberta de numerosos enteropatógenos virais, como os norovírus, rotavírus, astrovírus e adenovírus entéricos (Kirkwood, 2008).

O norovírus humano (HNoV) pertence à família *Calicivirus* e aos genogrupos I, II, IV, XVIII e XIX do gênero *Norovirus* (Chhabra et al., 2019). Eles são responsáveis pela causa mais significativa de gastroenterite aguda, causando cerca de 200.000 mortes em todo o mundo (Brunette & Nemhauser, 2019). O rotavírus, por sua vez, pertence à família *Sedoreoviridae* e é um vírus de RNA de fita dupla nomeado devido à aparência de roda de seu capsídeo viral (ICTV, 2022). Embora o rotavírus tenha sido postulado como a principal causa de doenças infantis ao redor do mundo, a introdução da vacina oral, em 2006, contribuiu para a queda drástica no número e na gravidade dos casos de gastroenterites registrados que já chegou a causar cerca de 440.000 mortes em crianças com menos de cinco anos de idade no mundo todo (Parashar et al., 2003). Os astrovírus foram identificados pela primeira vez em 1975 e



receberam este nome com base na aparência característica de 5 ou 6 pontas observada por microscopia eletrônica (Appleton et al., 1977; Madeley, 1975). Os astrovírus são vírus esféricos, sem envelope, com um genoma de RNA de fita simples e sentido positivo e classificados dentro sua própria família, *Astroviridae*, com oito sorotipos identificados (Meyer et al., 2021; Monroe et al., 1993). Os casos de gastroenterites associados ao astrovírus ocorrem tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento e são mais comuns entre crianças com menos de dois anos de idade (Krishnan, 2014; Olortegui et al., 2018).

Visto que os adenovírus são responsáveis, majoritariamente, por doenças do trato respiratório, a sua identificação em amostras fecais de crianças com diarreia levou a comunidade científica a alguns questionamentos. Ao contrário dos adenovírus respiratórios, os adenovírus entéricos eram fastidiosos e eventualmente foram classificados dentro de seu próprio grupo (Bishop & Kirkwood, 2008). Os adenovírus são membros da família *Adenoviridae* e do gênero *Mastadenovirus*. Os 90 genótipos sorotipos identificados são divididos em 9 subgrupos (A–I), sendo que sorotipos 40 e 41 são os únicos membros do subgrupo F e que agrupam os adenovírus entéricos associados à gastroenterite em humanos (De Jong et al., 1983; Gary et al., 1979), enquanto os demais subgrupos infectam o trato respiratório (Human Adenovirus Working Group, 2018; ICTV, 2018). Os adenovírus entéricos possuem genoma de DNA de fita dupla, não possuem envelope, são icosaédricos e possuem tamanho variando de 70 a 80 nm.

Os vírus apresentados acima são predominantemente transmitidos via fecal-oral, incluindo a contaminação de alimentos e água. Além disso, eles podem ser transmitidos por fômites, vômito e possivelmente através de aerossóis, especialmente no caso de vírus como o norovírus humano e o rotavírus (De Graaf et al., 2016; Kumthip et al., 2019; Roach & Langlois, 2021; Stuempfig & Seroy, 2023). Portanto, é fundamental compreender as diferentes interações estabelecidas entre os poluentes ambientais e os vírus entéricos, que podem afetar sua capacidade de sobrevivência, transmissão e infecciosidade.

A característica distintiva dos vírus entéricos é a falta de um envelope lipídico, o que lhes confere uma notável capacidade de sobrevivência no ambiente. No entanto, a presença de poluentes químicos pode ter impacto na persistência desses vírus, tornando-os potencialmente mais resistentes aos processos de desinfecção (Waldman et al., 2017). A presença de poluentes químicos em animais marinhos também pode aumentar o tempo de sobrevivência dos vírus entéricos nos órgãos desses animais (Fiorito et al., 2019). Dessa forma, se estes animais forem consumidos crus ou mal-cozidos, podem atuar como veículos para vírus entéricos, podendo levar a infecções humanas. Além dos poluentes químicos, superfícies plásticas presentes no solo, em água doce e em ambientes marinhos também podem contribuir na sobrevivência e persistência de patógenos virais humanos (Moresco et al., 2021; Moresco et al., 2022).

A interação entre vírus entéricos e poluentes ambientais tem implicações significativas para a saúde pública. Dessa forma, se torna imprescindível o monitoramento e controle da contaminação viral e da poluição ambiental a fim de prevenir surtos virais transmitidos pela água e pelos alimentos. Os estudos neste campo estão em desenvolvimento, à medida que os cientistas continuam a explorar as complexas interações entre vírus entéricos e poluentes

ambientais para o desenvolvimento de estratégias eficazes para mitigar os riscos associados às infecções virais transmitidas pela água e pelos alimentos.

Os vírus entéricos demonstram uma notável estabilidade em ambientes aquáticos, especialmente quando se ligam a partículas sólidas, como discutido por outros artigos (Bosch, 1998, Okoh et al., 2010; Seitz et al., 2011). A adsorção a essas partículas sólidas desempenha um papel crucial na dispersão dos vírus ao longo dos sistemas aquáticos e na subsequente sedimentação e acúmulo de partículas virais nos sedimentos, onde podem persistir por longos períodos (Goyal et al., 1984; Hassard et al., 2016).

Vale ressaltar que os vírus entéricos possuem doses infecciosas extremamente baixas, sendo assim, a dose infecciosa para o NoV é de apenas 18 partículas virais, enquanto para o RV, é necessária apenas 1 unidade formadora de placa (UFP) para infectar 25% dos adultos suscetíveis (Hall, 2012; Yezli & Otter, 2011). Devido a essas baixas doses infecciosas, o uso de água não tratada de fontes ambientais frequentemente resulta em surtos de doenças virais, mesmo em situações de contaminação mínima, como enfatizado por Sinclair e colaboradores em 2009. Além disso, o risco de transmissão de vírus entéricos não está restrito ao contato com água poluída. Também está associado ao consumo de moluscos bivalves, mexilhões, ostras e vieiras, que são cultivados e colhidos em águas contaminadas por vírus (Bellou et al., 2012; Lees, 2000).

## **PERSISTÊNCIA VIRAL EM AMBIENTES AQUÁTICOS CONTAMINADOS**

A contaminação de ambientes aquáticos acarreta uma ampla gama de problemas que afetam tanto os seres vivos quanto o meio ambiente. Um dos fenômenos de maior urgência nesse contexto é a persistência viral em ambientes aquáticos contaminados, uma preocupação crítica nos domínios da saúde pública e da saúde única. Vírus patogênicos e bacteriófagos têm a capacidade de permanecer ativos e infecciosos durante períodos prolongados em corpos d'água poluídos (Crank et al., 2019; Upfold et al., 2021). A presença e estabilidade dos vírus depende de fatores físico-químicos da água, como temperatura, teor de matéria orgânica e salinidade (Skraber et al., 2009).

Sabe-se que os vírus entéricos são transportados ao longo dos corpos d'água, e podem adsorver em matéria sólida ou se acumular nos sedimentos (Hassard et al., 2016). Em ambientes contaminados por esgoto, resíduos industriais e agroindustriais, a persistência viral pode ser ainda mais acentuada, aumentando os riscos para a saúde humana e de animais de criação, especialmente quando a água é utilizada para abastecimento e recreação (Chatziprodromidou et al., 2018).

No geral, os vírus entéricos, incluindo os norovírus e outros membros das famílias *Picornaviridae*, *Caliciviridae*, *Reoviridae* e *Adenoviridae*, são os principais grupos virais associados às infecções transmitidas pela água (Farkas et al., 2020). A principal via de transmissão dos vírus entéricos ocorre por meio de água e alimentos contaminados, através da rota fecal-oral, especialmente quando o esgoto não tratado é liberado no meio ambiente, resultando na poluição ambiental e, conseqüentemente, em uma maior prevalência desses

vírus (Upfold et al., 2021).

Sabe-se, por exemplo, que os vírus entéricos podem aderir às partículas de biofilme bacteriano presentes nos ambientes aquáticos. Esse fenômeno pode aumentar a persistência dos vírus no ambiente, uma vez que há indícios de que o biofilme pode desempenhar um papel na liberação dos vírus em momentos em que o patógeno não está mais presente na água (Skraber et al., 2009). Além disso, a poluição por microplásticos é uma ocorrência comum em diversos ambientes, incluindo os aquáticos, devido à ampla utilização de materiais plásticos em todo o mundo (Moresco et al., 2021).

Neste sentido, Moresco e colaboradores (2022) demonstraram que microplásticos contaminantes de águas superficiais podem ser colonizados por biofilme microbiano, formando comunidades de “plasticíferas” que podem persistir por mais tempo no meio ambiente. Vírus associados aos pellets microplásticos colonizados por biofilme eram mais estáveis em comparação com aqueles que permaneciam na água. Os vírus utilizados no estudo foram o rotavírus (RV) e o bacteriófago envelopado Phi6 e ambos apresentaram diferentes níveis de estabilidade quando associados a pellets microplásticos colonizados por biofilme. Embora as partículas infecciosas e as cópias do genoma do RV tenham permanecido estáveis durante um período de amostragem de 48 horas, a estabilidade do Phi6 foi altamente impactada, com uma redução variando de 2,18 a 3,94  $\log_{10}$ .

Além disso, a produção de biofilmes por bactérias pode desempenhar um papel crucial na proteção de vírus entéricos contra variações de temperatura e nos tratamentos comuns usados na desinfecção da água potável. O estudo desenvolvido por Waldman e colaboradores (2017) revelou que a adição de compostos bacterianos, como lipopolissacarídeo (LPS) ou peptidoglicano (PG) presentes na parede celular bacteriana, estabilizam o capsídeo viral a partir do fornecimento da proteção térmica. A proteção, no entanto, não foi tão eficiente quando os testes foram direcionados ao genoma dos vírus. Além disso, cada interação mostrou ser específica para o sorotipo viral, sugerindo que a sequência proteica do capsídeo viral desempenha um papel importante na determinação do nível de proteção conferido pelos compostos bacterianos. Dessa forma, o estudo fornece informações sobre os mecanismos potenciais pelos quais os vírus entéricos podem persistir nas fontes de água e causar surtos de doenças transmitidas pela água.

De modo similar, bacteriófagos causadores de gastroenterites também se incorporam em biofilmes, o que aumenta sua persistência. Em seus estudos, Storey e Ashbolt (2001) descobriram que havia uma subpopulação mais persistente de fagos adsorvidos no biofilme em teste, que pode ter persistido por um tempo considerável. A presença de vírions entéricos associados ao biofilme em sistemas de distribuição de água podem representar riscos potenciais à saúde se grupos de biofilme se separarem e chegarem aos consumidores por meio da ingestão ou inalação de água contaminada.

Wasonga, Maingi e Omwoyo (2021) avaliaram a associação entre contaminantes químicos específicos das águas superficiais e contaminação por vírus entéricos, adenovírus (HAdV) e enterovírus. O metal Cd teve uma relação positiva fraca e significativa com a detecção de

HAdV, enquanto os metais Pb e o Fe tiveram uma relação positiva fraca e significativa com a detecção do genoma de enterovírus. Estes três metais estão envolvidos na manutenção da estrutura e funções do vírus, podendo, assim, influenciar a estabilidade e a sobrevivência das partículas virais (Chaturvedi & Shrivastava, 2005). Por outro lado, houve uma relação negativa entre a presença de íons fosfato e a detecção de HEV. Estes três metais pesados desempenham um papel significativo na preservação da estrutura e das funções do vírus, podendo, assim, influenciar a estabilidade e a sobrevivência do vírus. Os fosfatos desempenham um papel na interação entre proteínas e ácidos nucleicos, e, portanto, podem influenciar a estabilidade viral no ambiente (Auffinger et al., 2004).

## **POLUENTES DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA TRANSMISSÃO DE VÍRUS ENTÉRICOS**

Dentre os recursos naturais mais importantes para a humanidade, o solo desempenha um papel crucial na produção de alimentos e na preservação do ecossistema, fornecendo nutrientes essenciais para o crescimento das plantas e interagindo com microrganismos. Contudo, a crescente contaminação do solo por poluentes químicos da indústria e agricultura representa um desafio, já que os microrganismos presentes no solo podem interagir de forma direta ou indireta com os nutrientes e resíduos disponíveis, que podem ser favoráveis ao crescimento dos patógenos que geram infecções gastrointestinais. Essas infecções, causadas por vírus do solo, não apenas afetam a saúde global, mas também resultam em perdas na produção agrícola e geram custos significativos para a economia e saúde pública (Gauthier et al., 2023; Revilla-Chávez et al., 2021).

A quantificação da presença de vírus nos solos é desafiadora devido à diversidade dos solos, às limitações tecnológicas, escassez de informações em bancos de dados sobre genes virais do solo, abordagens bioinformáticas limitadas e a complexa heterogeneidade das matrizes encontradas. A metagenômica viral, conhecida como virômica, permite a análise do material genético viral, sendo uma ferramenta para compreender a diversidade e dinâmica viral em diferentes ambientes terrestres (Jansson & Wu, 2022; Roux & Emerson, 2022).

Os vírus possuem grande importância no controle de patógenos na forma de bacteriófagos, além de contribuir na liberação de carbono orgânico durante os ciclos de infecção e lise. Contudo, alguns vírus encontrados nos solos e cultivos podem apresentar patogenicidade para as plantas e seres humanos (Bora et al., 2022). O uso de lodo ou águas para irrigação contaminados podem ser fontes de transmissão de vírus entéricos para o ambiente, levando a transmissão pela ingestão de alimentos não higienizados adequadamente ou na ineficiência da inativação viral durante o processamento. Os norovírus, adenovírus e o vírus da hepatite A têm sua transmissão normalmente associada ao consumo de folhas verdes e frutas frescas provenientes das lavouras propensas a contaminações ambientais. Outros vírus podem estar relacionados com doenças provenientes da produção agrícola como enterovírus, sapovírus, rotavírus, astrovírus, adenovírus e vírus da hepatite E (Bosch et al., 2018).

Dentre as problemáticas relacionadas à contaminação dos solos, a suinocultura



possui um papel na disseminação de vírus entéricos. Os dejetos dos suínos possuem diversos microrganismos zoonóticos presentes como bactérias patogênicas e vírus, principalmente o vírus da hepatite E e rotavírus do grupo A. Estes patógenos podem penetrar no solo dos locais de produção, infiltrando e chegando a camadas mais profundas, sendo possível alcançarem águas de drenagem e subterrâneas. Além disso, o uso do esterco contaminado em lavouras pode apresentar um potencial infeccioso a partir dos alimentos cultivados. Portanto, águas e alimentos contaminados com esses agentes zoonóticos podem apresentar um potencial risco para a saúde pública e propagação de doenças (Krog et al., 2017).

Os estudos sobre vírus em ambientes terrestres são notavelmente escassos em comparação com os ambientes aquáticos. Vários fatores influenciam a diversidade viral nesses ecossistemas, incluindo o pH e a umidade do solo. Perturbações causadas por mudanças climáticas, poluição química e desflorestação podem exercer pressões seletivas e desequilibrar a microdiversidade viral. O setor agrícola, em particular, está sob grande estresse devido às atividades humanas, como o uso de fertilizantes, herbicidas e alterações constantes na vegetação (Liao et al., 2022).

Ainda, o descarte de águas residuais, uso de fertilizantes e fundição de minerais pela indústria também provocam prejuízos significativos na dinâmica e funções microbianas. A presença de plásticos ou microplásticos poluentes pode também ser uma via secundária na transmissão, facilitando a sobrevivência e persistência do vírus no ambiente, como já discutido neste capítulo (Moresco et al., 2021). Além disso, diferentes níveis de metais pesados podem reduzir a abundância de vírus que simbioticamente interagem com a vegetação, acelerar a disseminação de genes de resistência a antibióticos, alterar o equilíbrio entre bactérias e vírus e disseminar genes de resistência e patogenicidade viral (Wu et al., 2023).

A principal fonte de poluição do solo com vírus entéricos é o esgoto, e pequenas quantidades podem contaminar vastas extensões de água, representando um risco de infecções em humanos, devido à sua baixa dose infecciosa (Gholipour et al., 2022). Esse desafio é especialmente agravado em países com baixa cobertura de tratamento de esgoto, como o Brasil, onde aproximadamente 54% das áreas urbanas carecem de tratamento adequado (Governo Federal, 2020). Nesses casos, a contaminação direta de rios e solo pelo esgoto amplifica significativamente a poluição em áreas extensas.

A associação de partículas orgânicas com vírus entéricos desempenha um papel crucial na redução significativa do seu decaimento, proporcionando uma camada protetora adicional ao capsídeo viral. Essa ligação ocorre devido a interações eletroquímicas, resultando na estabilização da estrutura viral e na diminuição da interação com outros estressores ambientais (Guo et al., 2022, Yang et al., 2022). Uma análise de adenovírus humano (HAdV) em esgoto revelou que esses vírus podem persistir no ambiente por períodos prolongados, especialmente em locais de pouca exposição à luz ultravioleta (Schwarz et al., 2019). Além disso, alguns vírus entéricos podem se agrupar em vesículas encapsuladas, tornando-os mais resistentes aos desafios ambientais e à desinfecção por UV 254 (Zhang et al., 2021). Outra via de contaminação do solo por vírus entéricos ocorre devido ao descarte inadequado de carcaças

e vísceras de animais, tanto por abatedouros industriais quanto familiares, representando uma fonte de contaminação não apenas para seres humanos, por meio de vírus zoonóticos, mas também para outros animais (Franke-Whittle & Insam, 2012).

A composição química varia consideravelmente entre diferentes tipos de solo, e esse fator exerce influência significativa na afinidade dos vírus por partículas do solo (Zhuang & Jin, 2003). Portanto, dependendo do solo em questão e da cepa viral envolvida, esses patógenos podem potencialmente atingir e contaminar as águas subterrâneas destinadas ao consumo humano (Pang et al., 2021). É fundamental adotar precauções ao descartar componentes que contenham vírus entéricos, devido ao risco de contaminação ambiental e humana. Os estudos nesta área são limitados, tornando essencial uma melhor compreensão do comportamento dos vírus entéricos no solo e de sua estabilidade em diversas condições, como tipo de solo, precipitação e temperatura. Essa compreensão mais profunda possibilitará o desenvolvimento de tratamentos mais eficazes para esses poluentes e práticas de descarte mais seguras.

## **PERSISTÊNCIA E TRANSMISSÃO AÉREA DE VÍRUS ENTÉRICOS**

Devido ao tropismo gastrointestinal, os vírus entéricos são excretados em grandes concentrações nas fezes de indivíduos infectados (10<sup>5</sup> - 10<sup>11</sup>), o que resulta em sua expressiva presença em efluentes domésticos (Prez et al., 2015). A tecnologia empregada nas estações de tratamento esgoto (ETE) convencionais é ineficaz na completa remoção das partículas virais, tornando as águas residuais tratadas uma potencial fonte de partículas virais viáveis, como apresentado neste capítulo (Clarke et al., 2017; Moazeni et al., 2017). Uma vez no ambiente, os vírus entéricos podem ser transportados via água, solo e cultivos, mas, ainda hoje, são poucos os estudos que objetivam avaliar a persistência de vírus entéricos na atmosfera (Barker et al., 2013; Santamaria & Toranzos, 2003).

Muitos vírus são propagados via aerossol, que são gerados a partir de pequenas gotículas de água (Molle et al., 2016). Estes estudos que avaliam a presença e viabilidade de vírus entéricos em meios líquidos são úteis para predições sobre o destino dos vírus entéricos quando aerossolizados na atmosfera (Courault et al., 2017). A expressiva concentração de vírus entéricos em ETE, aliado ao fato de que não são completamente removidos, torna a aerossolização emitida através da aeração mecânica e difusa um potencial risco para a saúde dos trabalhadores e residentes do entorno da ETE (Clarke et al., 2017; Moazeni et al., 2017; Pasalari et al., 2019; Uhrbrand et al., 2017).

A infecção por norovírus, também conhecida como “doença do vômito do inverno”, tem na aerossolização do vômito uma das principais fontes de transmissão, enquanto a limpeza direta de evacuações líquidas não aumenta o risco do desenvolvimento de gastroenterite (Nordgren & Svensson, 2019; Sánchez & Bosch, 2016). Os vírus entéricos propagados por gotículas respiratórias de indivíduos infectados podem permanecer viáveis por meses no ambiente aquático, e tornar-se novamente presentes no ar dependendo das condições meteorológicas como temperatura, radiação solar, umidade e vento (Carducci et al., 2011; Gerba & Smith, 2005; Wan et al., 2012).

Entre os principais fatores que afetam a estabilidade das partículas virais em aerossóis estão a temperatura, pH, umidade relativa e absoluta do ar, tamanho da partícula de aerossol, composição da suspensão, exposição à luz solar, qualidade do ar e o tipo viral (Sánchez & Bosch, 2016). Sabe-se que a exposição à radiação ultravioleta, assim como a altas concentrações de ozônio, pode danificar a estrutura viral (Lazarova et al., 2013; Nuanualsuwan et al., 2008). A temperatura também representa um fator importante, pois, enquanto altas temperaturas são eficazes na inativação viral, os vírus entéricos são fortemente resistentes à temperaturas ambientais mais baixas (Bertrand et al., 2012; Pintó et al., 2010).

O mecanismo de inativação viral em partículas em suspensão no ar ainda é pouco elucidado, mas sabe-se que a umidade relativa da atmosfera parece possuir um papel significativo na persistência viral. Altas taxas de umidade relativa do ar conferem um efeito protetor aos vírions em partículas aerossolizadas (Yeargin et al., 2016). A baixa umidade relativa degrada a partícula viral ao passo em que remove moléculas de água necessárias para a integridade de componentes estruturais (Sánchez & Bosch, 2016). O RNA infeccioso de Picornavirus pode ser detectado em todos os níveis de umidade, sugerindo que a inativação viral é causada justamente pelo dano no capsídeo (Sanchez & Bosch, 2016).

Dentre os vírus entéricos, o vírus da Hepatite A e o rotavírus são mais resistentes à inativação por desidratação do que adenovírus, astrovírus e poliovírus (Roos, 2020). Sanchez e Bosch (2016) determinaram que o Poliovírus é mais estável em partículas aerossolizadas em atmosferas com uma alta umidade relativa do que com taxas mais baixas, em uma mesma temperatura de 22°C. Quanto ao norovírus, estudos como o de Colas de la Noue e colaboradores (2014) demonstraram que o modelo de estudo viral substituto (Norovírus Murino) possui maior capacidade infecciosa, ou seja, as partículas virais realizam ligação forte com moléculas presentes nas células epiteliais do trato gastrointestinal quando estão sob umidades relativas extremas (10% e 100%). Em valores de umidade relativa média entre 25% e 85% a infectividade do modelo viral murino é prejudicada.

No caso dos vírus envelopados, a bicamada lipídica fornece proteção através do potencial hidrofílico das glicoproteínas de membrana, retendo moléculas de água que são essenciais para manter a estrutura da bicamada. Ao mesmo tempo, devido à necessidade de hidratação da partícula viral envelopada, a baixa umidade relativa da atmosfera é um fator inativante para vírus como o da influenza (Weber & Stilianakis, 2008). As glicoproteínas, frequentemente encontradas no envelope, fornecem capacidade de ligação de hidrogênio, aumentando a retenção de moléculas de água e fornecendo proteção contra a perda de atividade das partículas virais (Roos, 2020).

A atmosfera contém diversos materiais particulados, tanto orgânicos, como a aerossolização advinda de ETE, de evacuações líquidas intensas ou de gotículas respiratórias, quanto inorgânicos, como poeira de solo, partículas minerais e sais inorgânicos (Ghio et al., 2012). Os vírus entéricos tendem a percorrer maiores distâncias, e a permanecerem viáveis por longos períodos, quando estão aderidos a partículas suspensas na atmosfera (Rzeżutka & Cook, 2004). Seu tamanho reduzido e a tendência a aderir-se a partículas mais finas garantem sua

persistência contra fatores de inativação presentes no ambiente (Tseng & Li, 2005). O estudo de Gonzalez-Martin e colaboradores (2018) em um conjunto de ilhas próximas ao continente africano detectou a presença de enterovírus e rotavírus em 15,4% e 36,9% das amostras de ar coletadas. Apesar da detecção de vírus entéricos como adenovírus, enterovírus e rotavírus em partículas inorgânicas na atmosfera, até o momento não há estudos que comprovem a existência de casos ou surtos de gastroenterites que apontam a atmosfera como rota de transmissão (Dennehy et al., 1998; Gonzalez-Martin et al., 2018; Lin et al., 2002).

Uma das principais dificuldades em avaliar a persistência de vírus entéricos na atmosfera é realizar a coleta de amostras de partículas consideravelmente ínfimas (30 nm até 1 µm no caso de agregados) (Verreault et al., 2008). Métodos para realizar a avaliação da contaminação viral em matrizes aquáticas ou sólidas, como plantas ou solo, são bem difundidos e apresentam resultados satisfatórios de recuperação viral (Bosch et al., 2008; Bosch et al., 2010). A captura e caracterização de vírus no ar já é mais complexa. Dentre os métodos mais aplicados estão a precipitação eletrostática e a impactação em meio líquido e meio sólido (Zhao et al., 2011).

A precipitação eletrostática é uma metodologia de amostragem empregada para capturar partículas em suspensão no ar, como poluentes atmosféricos, poeira fina, partículas orgânicas e inorgânicas e microrganismos (Nunes, 2005). Este método se baseia na utilização de um campo elétrico gerado por meio de eletrodos (Wen et al., 2015). As partículas suspensas, sob influência do campo elétrico, são atraídas em direção aos eletrodos, depositando-se onde podem ser posteriormente coletadas. Este método, apesar de apresentar eficácia, varia dependendo da carga das partículas e da intensidade das condições meteorológicas locais (EPA, 2016; Zukeran et al., 2018).

A metodologia de coleta por meio de impactação em meio líquido se baseia no bombeamento do ar amostrado para o interior de um frasco, passando através de um líquido no qual as partículas ficam suspensas. Este líquido pode ser então utilizado para avaliação de microrganismos (Nunes, 2005). Tanto a colisão em meio líquido quanto a precipitação eletrostática possuem alguns inconvenientes, como a possível degradação das partículas virais, o que leva a problemas de análise, e a grande variação na eficiência de captura de partículas (Verreault et al., 2008; West & Kimber, 2015).

## **ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO E MITIGAÇÃO**

A preocupação em relação aos poluentes emergentes, como microplásticos, poluentes químicos e metais pesados, juntamente com a presença de agentes virais em diversos ambientes, está crescendo devido à possível associação entre esses fatores e o aumento da estabilidade, infectividade e sobrevivência de vírus. Esse cenário levanta sérias preocupações, já que a liberação desses vírus pode impactar negativamente o ambiente natural e comprometer os recursos de água potável, por exemplo. Dessa forma, estratégias de mitigação e prevenção de micro e macropoluentes devem ser adotadas a fim de evitar a persistência viral no ambiente.

Algumas pesquisas já evidenciaram a mitigação de micropoluentes utilizando processos descentralizados de tratamento de águas residuais, como zonas úmidas construídas para a

remoção de antibióticos (Ávila et al., 2021) e produtos farmacêuticos (Sochacki et al., 2018), processos biológicos para a remoção de propilparabeno (Song et al., 2017), biorreatores de membrana (MBRs) para a remoção de produtos farmacêuticos (Beier et al., 2011) e sorção (nanotubo magnético de carbono) para remoção de polietileno, tereftalato de polietileno, poliamida (Tang et al., 2021). Além de evidências de métodos de biorremediação, como bioestimulação, atenuação natural e bioaumento eficientes na eliminação de pesticidas no solo (Karimi et al., 2021).

Um estudo que buscou apresentar o papel mecanicista dos contaminantes associados à poeira da estrada na propagação de vírus e outros microrganismos patogênicos, como elementos potencialmente tóxicos (metais pesados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), microplásticos, emissões de escape, e emissões de não escape, classificou, em medidas tecnológicas e não tecnológicas, estratégias para prevenir e mitigar poluentes da poeira da estrada. Dentre as estratégias de prevenção de metais pesados não tecnológicas, podem ser citadas a educação pública e gerenciamento e proibição do amianto nas pastilhas de freio e como medida de mitigação, a supressão de poeira. Dentre as estratégias de prevenção de metais pesados tecnológicas, estão escavação (remoção física) e o uso de plantas (biorremediação) e como medida de mitigação, o uso de biosensores, coagulação e floculação (Alex et al., 2023; Piscitello et al., 2021).

Diante das indagações realizadas ao longo deste texto, consuma-se que a implementação de estratégias para mitigar e prevenir a presença de contaminantes ambientais é crucial para promover a harmonia e equilíbrio nos ecossistemas. Além disso, compreender como micro e macropoluentes influenciam a sobrevivência e disseminação de patógenos virais relevantes pode impulsionar a criação de novas abordagens para mitigar e prevenir essas questões.

## REFERÊNCIAS

Alex, F. J., Tan, G., Kyei, S. K., Ansah, P. O., Agyeman, P. K., Fayzullayevich, J. V., & Olayode, I. O. (2023). Transmission of viruses and other pathogenic microorganisms via road dust: Emissions, characterization, health risks, and mitigation measures. *Atmospheric Pollution Research*, 14(1), 101642. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101642>

Appleton, H., Buckley, M., Thom, B. T., Cotton, J. L., & Henderson, S. (1977). Virus-Like Particles In Winter Vomiting Disease. *The Lancet*, 309(8008), 409–411. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(77\)92614-9](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(77)92614-9)

Auffinger, P., Bielecki, L., & Westhof, E. (2004). Anion binding to nucleic acids. *Structure*, 12(3), 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.str.2004.02.015>

Ávila, C., García-Galán, M. J., Borrego, C. M., Rodríguez-Mozaz, S., García, J., & Barceló, D. (2021). New insights on the combined removal of antibiotics and ARGs in urban wastewater through the use of two configurations of vertical subsurface flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 755, 142554. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142554>

Barker, S. F. (2013). Risk of norovirus gastroenteritis from consumption of vegetables irrigated with highly treated municipal wastewater—evaluation of methods to estimate sewage



quality. *Risk Analysis*, 34(5), 803–817. <https://doi.org/10.1111/risa.12138>

Beier, S., Cramer, C., Köster, S., Mauer, C., Palmowski, L., Schröder, H. Fr., & Pinnekamp, J. (2011). Full scale membrane bioreactor treatment of hospital wastewater as forerunner for hot-spot wastewater treatment solutions in high density urban areas. *Water Science and Technology*, 63(1), 66–71. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.010>

Bellou, M., Kokkinos, P., & Vantarakis, A. (2012). Shellfish-Borne viral outbreaks: A systematic review. *Food and Environmental Virology*, 5(1), 13–23. <https://doi.org/10.1007/s12560-012-9097-6>

Bertrand, I., Schijven, J. F., Sánchez, G., Wyn-Jones, P., Ottoson, J., Morin, T., Muscillo, M., Verani, M., Nasser, A., de Roda Husman, A. M., Myrmel, M., Sellwood, J., Cook, N., & Gantzer, C. (2012). The impact of temperature on the inactivation of enteric viruses in food and water: A review. *Journal of Applied Microbiology*, 112(6), 1059–1074. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05267.x>

Bishop, R. F., & Kirkwood, C. D. (2008). Enteric viruses. In *Encyclopedia of Virology* (pp. 116–123). Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-012374410-4.00386-1>

Bora, S. S., Naorem, R. S., Hazarika, D. J., Dasgupta, A., Churaman, A., Gogoi, M., & Barooah, M. (2022). Agricultural land use influences bacteriophage community diversity, richness, and heterogeneity. *Current Microbiology*, 80(1). <https://doi.org/10.1007/s00284-022-03129-4>

Bosch, A. (1998). Human enteric viruses in the water environment: a minireview. *International Microbiology*, 1(3), 191–196.

Bosch, A., Gkogka, E., Le Guyader, F. S., Loisy-Hamon, F., Lee, A., van Lieshout, L., Marthi, B., Myrmel, M., Sansom, A., Schultz, A. C., Winkler, A., Zuber, S., & Phister, T. (2018). Foodborne viruses: Detection, risk assessment, and control options in food processing. *International Journal of Food Microbiology*, 285, 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.06.001>

Bosch, A., Guix, S., Sano, D., & Pintó, R. M. (2008). New tools for the study and direct surveillance of viral pathogens in water. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(3), 295–301. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.04.006>

Bosch, A., Sánchez, G., Abbaszadegan, M., Carducci, A., Guix, S., Le Guyader, F. S., Netshikweta, R., Pintó, R. M., van der Poel, W. H. M., Rutjes, S., Sano, D., Taylor, M. B., van Zyl, W. B., Rodríguez-Lázaro, D., Kovač, K., & Sellwood, J. (2010). Analytical methods for virus detection in water and food. *Food Analytical Methods*, 4(1), 4–12. <https://doi.org/10.1007/s12161-010-91615>

Brunette, G. W., & Nemhauser, J. B. (2019). Travel-Related Infectious Diseases . CDC. Gov. <https://wwwnc.cdc.gov/travel/yellowbook/2020/travel-related-infectious-diseases/norovirus>

Carducci, A., Verani, M., Lombardi, R., Casini, B., & Privitera, G. (2011). Environmental survey to assess viral contamination of air and surfaces in hospital settings. *Journal of Hospital Infection*, 77(3), 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2010.10.010>

Chaturvedi, U. C., & Shrivastava, R. (2005). Interaction of viral proteins with metal ions: Role in maintaining the structure and functions of viruses. *FEMS Immunology & Medical Microbiology*, 43(2), 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.femsim.2004.11.004>

Chatziprodromidou, I. P., Bellou, M., Vantarakis, G., & Vantarakis, A. (2018). Viral outbreaks linked to fresh produce consumption: A systematic review. *Journal of Applied Microbiology*, 124(4), 932–942. <https://doi.org/10.1111/jam.13747>

Chhabra, P., de Graaf, M., Parra, G. I., Chan, M. C.-W., Green, K., Martella, V., Wang, Q., White, P. A., Katayama, K., Vennema, H., Koopmans, M. P. G., & Vinjé, J. (2019). Updated classification of norovirus genogroups and genotypes. *Journal of General Virology*, 100(10), 1393–1406. <https://doi.org/10.1099/jgv.0.001318>

Clarke, R., Peyton, D., Healy, M. G., Fenton, O., & Cummins, E. (2017). A quantitative microbial risk assessment model for total coliforms and *E. coli* in surface runoff following application of biosolids to grassland. *Environmental Pollution*, 224, 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.025>

Colas de la Noue, A., Estienney, M., Aho, S., Perrier-Cornet, J.-M., de Rougemont, A., Pothier, P., Gervais, P., & Belliot, G. (2014). Absolute humidity influences the seasonal persistence and infectivity of human norovirus. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(23), 7196–7205. <https://doi.org/10.1128/aem.01871-14>

Courault, D., Albert, I., Perelle, S., Fraisse, A., Renault, P., Salemkour, A., & Amato, P. (2017). Assessment and risk modeling of airborne enteric viruses emitted from wastewater reused for irrigation. *Science of The Total Environment*, 592, 512–526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.105>

Crank, K., Petersen, S., & Bibby, K. (2019). Quantitative microbial risk assessment of swimming in sewage impacted waters using crassphage and pepper mild mottle virus in a customizable model. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(10), 571–577. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00468>

de Graaf, M., van Beek, J., & Koopmans, M. P. G. (2016). Human norovirus transmission and evolution in a changing world. *Nature Reviews Microbiology*, 14(7), 421–433. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.201648>

De Jong, J. C., Kapsenberg, J. G., Muzerie, C. J., Wermenbol, A. G., Kidd, A. H., Wadell, G., Firtzlaff, R. -g., & Wigand, R. (1983). Candidate adenoviruses 40 and 41: Fastidious adenoviruses from human infant stool. *Journal of Medical Virology*, 11(3), 215–231. <https://doi.org/10.1002/jmv.1890110305>

Dennehy, P. H., Nelson, S. M., Crowley, B. A., & Saracen, C. L. (1998). Detection of rotavirus RNA in hospital air samples by polymerase chain reaction (PCR) • 828. *Pediatric Research*, 43(4), 143–143. <https://doi.org/10.1203/00006450-199804001-00849>

Environmental Protection Agency (EPA). (2016). Monitoring by control technique - Electrostatic precipitators. US EPA. <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-electrostatic-precipitators>

Farkas, K., Walker, D. I., Adriaenssens, E. M., McDonald, J. E., Hillary, L. S., Malham, S.

- K., & Jones, D. L. (2020). Viral indicators for tracking domestic wastewater contamination in the aquatic environment. *Water Research*, 181, 115926. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115926>
- Fiorito, F., Amoroso, M. G., Lambiase, S., Serpe, F. P., Bruno, T., Scaramuzza, A., Maglio, P., Fusco, G., & Esposito, M. (2019). A relationship between environmental pollutants and enteric viruses in mussels (*Mytilus galloprovincialis*). *Environmental Research*, 169, 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.11.001>
- Franke-Whittle, I. H., & Insam, H. (2012). Treatment alternatives of slaughterhouse wastes, and their effect on the inactivation of different pathogens: A review. *Critical Reviews in Microbiology*, 39(2), 139–151. <https://doi.org/10.3109/1040841x.2012.694410>
- Gary, G. W., Jr., Hierholzer, J. C., & Black, R. E. (1979). Characteristics of noncultivable adenoviruses associated with diarrhea in infants: A new subgroup of human adenoviruses. *Journal of Clinical Microbiology*, 10(1), 96–103. <https://doi.org/10.1128/jcm.10.1.96-103.1979>
- Gauthier, K., Pankovic, D., Nikolic, M., Hobert, M., Germeier, C. U., Ordon, F., Perovic, D., & Niehl, A. (2023). Nutrients and soil structure influence furovirus infection of wheat. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1200674>
- Gerba, C. P., & Smith, J. E. (2005). Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. *Journal of Environmental Quality*, 34(1), 42–48. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0042a>
- Ghio, A. J., Carraway, M. S., & Madden, M. C. (2012). Composition of air pollution particles and oxidative stress in cells, tissues, and living systems. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 15(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/10937404.2012.632359>
- Gholipour, S., Ghalhari, M. R., Nikaeen, M., Rabbani, D., Pakzad, P., & Miranzadeh, M. B. (2022). Occurrence of viruses in sewage sludge: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 824, 153886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153886>
- Gonzalez-Martin, C., Coronado-Alvarez, N. M., Teigell-Perez, N., Diaz-Solano, R., Exposito, F. J., Diaz, J. P., Griffin, D. W., & Valladares, B. (2018). Analysis of the impact of African dust storms on the presence of enteric viruses in the atmosphere in Tenerife, Spain. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(7), 1863–1873. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0463>
- Governo Federal. (2020). Cobertura de água e esgoto cresce no Brasil. Portal Governo Federal. <https://www.google.com/url?q=https://www.gov.br/pt-br/noticias/assistencia-social/2020/12/cobertura-de-agua-e-esgoto-cresce-no-brasil&sa=D&source=docs&ust=1698843526645589&usg=AOvVawI49wk8G3HKB5nRjOI-lIng>
- Goyal, S. M., Adams, W. N., O'Malley, M. L., & Lear, D. W. (1984). Human pathogenic viruses at sewage sludge disposal sites in the Middle Atlantic region. *Applied and Environmental Microbiology*, 48(4), 758–763. <https://doi.org/10.1128/aem484758-763.1984>
- Guo, Y., Sivakumar, M., & Jiang, G. (2022). Decay of four enteric pathogens and implications to wastewater-based epidemiology: Effects of temperature and wastewater dilutions. *Science of The Total Environment*, 819, 152000. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152000>
- Hall, A. J. (2012). Noroviruses: The perfect human pathogens? *Journal of Infectious*

Diseases, 205(11), 1622–1624. <https://doi.org/10.1093/infdis/jis251>

Hassard, F., Gwyther, C. L., Farkas, K., Andrews, A., Jones, V., Cox, B., Brett, H., Jones, D. L., McDonald, J. E., & Malham, S. K. (2016). Abundance and distribution of enteric bacteria and viruses in coastal and estuarine sediments—a review. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01692>

Human Adenovirus Working Group. (2018). HAdV Working Group. <http://hadvwg.gmu.edu/>

ICTV. (2018). Current ICTV taxonomy release. ICTV. <https://talk.ictvonline.org/taxonomy/>

ICTV. (2022). Order:Reovirales. ICTV. <https://ictv.global/report/chapter/reovirales/reovirales>

Jansson, J. K., & Wu, R. (2022). Soil viral diversity, ecology and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 21(5), 296–311. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00811-z>

Karimi, H., Mahdavi, S., Asgari Lajayer, B., Moghiseh, E., Rajput, V. D., Minkina, T., & Astatkie, T. (2021). Insights on the bioremediation technologies for pesticide-contaminated soils. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(4), 1329–1354. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01081-z>

Krishnan, T. (2014). Novel human astroviruses: Challenges for developing countries. *VirusDisease*, 25(2), 208–214. <https://doi.org/10.1007/s13337-014-02023>

Krog, J. S., Forslund, A., Larsen, L. E., Dalsgaard, A., Kjaer, J., Olsen, P., & Schultz, A. C. (2017). Leaching of viruses and other microorganisms naturally occurring in pig slurry to tile drains on a well-structured loamy field in Denmark. *Hydrogeology Journal*, 25(4), 1045–1062. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1530-8>

Kumthip, K., Khamrin, P., Ushijima, H., & Maneekarn, N. (2019). Enteric and non-enteric adenoviruses associated with acute gastroenteritis in pediatric patients in Thailand, 2011 to 2017. *PLOS ONE*, 14(8), e0220263. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220263>

Lazarova, V., Liechti, P.-A., Savoye, P., & Hausler, R. (2013). Ozone disinfection: main parameters for process design in wastewater treatment and reuse. *Water Reuse*, 3(4), 337–345. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wrd.2013.007>

Lees, D. (2000). Viruses and bivalve shellfish. *International Journal of Food Microbiology*, 59(1–2), 81–116. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(00\)00248-8](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(00)00248-8)

Liao, H., Li, H., Duan, C.-S., Zhou, X.-Y., Luo, Q.-P., An, X.-L., Zhu, Y.-G., & Su, J.-Q. (2022). Response of soil viral communities to land use changes. *Nature Communications*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-02233771-2>

Lin, T.-Y., Chang, L.-Y., Hsia, S.-H., Huang, Y.-C., Chiu, C.-H., Hsueh, C., Shih, S.-R., Liu, C.-C., & Wu, M.-H. (2002). The 1998 enterovirus 71 outbreak in Taiwan: Pathogenesis and management. *Clinical Infectious Diseases*, 34(Supplement\_2), S52–S57. <https://doi.org/10.1086/338819>

Madeley, C. R., & Cosgrove, B. P. (1975). Viruses In Infantile Gastroenteritis. *The Lancet*, 306(7925), 124. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(75\)900203](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(75)900203)

Meyer, L., Delgado-Cunningham, K., Lorig-Roach, N., Ford, J., & DuBois, R. M. (2021). Human astrovirus 1–8 seroprevalence evaluation in a United States adult population. *Viruses*, 13(6), 979. <https://doi.org/10.3390/v13060979>

Moazeni, M., Nikaeen, M., Hadi, M., Moghim, S., Mouhebat, L., Hatamzadeh, M., & Hassanzadeh, A. (2017). Estimation of health risks caused by exposure to enteroviruses from agricultural application of wastewater effluents. *Water Research*, 125, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.028>

Molle, B., Tomas, S., Huet, L., Audouard, M., Olivier, Y., & Granier, J. (2016). Experimental approach to assessing aerosol dispersion of treated wastewater distributed via sprinkler irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001039](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001039)

Monroe, S. S., Jiang, B., Stine, S. E., Koopmans, M., & Glass, R. I. (1993). Subgenomic RNA sequence of human astrovirus supports classification of Astroviridae as a new family of RNA viruses. *Journal of Virology*, 67(6), 3611–3614. <https://doi.org/10.1128/jvi.67.6.3611-3614.1993>

Moresco, V., Charatzidou, A., Oliver, D. M., Weidmann, M., Matallana-Surget, S., & Quilliam, R. S. (2022). Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution*, 308, 119594. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Moresco, V., Oliver, D. M., Weidmann, M., Matallana-Surget, S., & Quilliam, R. S. (2021). Survival of human enteric and respiratory viruses on plastics in soil, freshwater, and marine environments. *Environmental Research*, 199, 111367. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111367>

Nordgren, J., & Svensson, L. (2019). Genetic susceptibility to human norovirus infection: An update. *Viruses*, 11(3), 226. <https://doi.org/10.3390/v11030226>

Nuanualsuwan, S., Thongtha, P., Kamolsiripichaiorn, S., & Subharat, S. (2008). UV inactivation and model of UV inactivation of foot-and-mouth disease viruses in suspension. *International Journal of Food Microbiology*, 127(1–2), 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.06.014>

Nunes, Z. das G. (2005). Nunes, Z.D. (2005). Estudo da qualidade microbiológica do ar de ambientes internos climatizados. <https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/icict/8254/2/148.pdf>

Okoh, A. I., Sibanda, T., & Gusha, S. S. (2010). Inadequately treated wastewater as a source of human enteric viruses in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(6), 2620–2637. <https://doi.org/10.3390/ijerph7062620>

Olortegui, M. P., Rouhani, S., Yori, P. P., Salas, M. S., Trigoso, D. R., Mondal, D., Bodhidatta, L., Platts-Mills, J., Samie, A., Kabir, F., Lima, A., Babji, S., Shrestha, S. K., Mason, C. J., Kalam, A., Bessong, P., Ahmed, T., Mduma, E., Bhutta, Z. A., ... Kosek, M. N. (2018). Astrovirus infection and diarrhea in 8 countries. *Pediatrics*, 141(1). <https://doi.org/10.1542/peds.2017-1326>

Pang, X., Gao, T., Qiu, Y., Caffrey, N., Popadynetz, J., Younger, J., Lee, B. E., Neumann, N., & Checkley, S. (2021). The prevalence and levels of enteric viruses in groundwater of



private wells in rural Alberta, Canada. *Water Research*, 202, 117425. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117425>

Parashar, U. D., Hummelman, E. G., Bresee, J. S., Miller, M. A., & Glass, R. I. (2003). Global illness and deaths caused by rotavirus disease in children. *Emerging Infectious Diseases*, 9(5), 565–572. <https://doi.org/10.3201/eid0905.020562>

Pasalari, H., Ataei-Pirkooh, A., Aminikhah, M., Jafari, A. J., & Farzadkia, M. (2019). Assessment of airborne enteric viruses emitted from wastewater treatment plant: Atmospheric dispersion model, quantitative microbial risk assessment, disease burden. *Environmental Pollution*, 253, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.010>

Pintó, R. M., Costafreda, M. I., Pérez-Rodríguez, F. J., D'Andrea, L., & Bosch, A. (2010). Hepatitis A virus: State of the art. *Food and Environmental Virology*, 2(3), 127–135. <https://doi.org/10.1007/s12560-010-90443>

Piscitello, A., Bianco, C., Casasso, A., & Sethi, R. (2021). Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of The Total Environment*, 766, 144440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>

Prez, V. E., Gil, P. I., Temprana, C. F., Cuadrado, P. R., Martínez, L. C., Giordano, M. O., Masachessi, G., Isa, M. B., Ré, V. E., Paván, J. V., Nates, S. V., & Barril, P. A. (2015). Quantification of human infection risk caused by rotavirus in surface waters from Córdoba, Argentina. *Science of The Total Environment*, 538, 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.041>

Revilla-Chávez, J. M., Abanto-Rodríguez, C., Guerra Arévalo, W. F., García Soria, D., Guerra Arévalo, H., Domínguez Torrejón, G., & da Silva Carmo, I. L. G. (2021). Allometric models to estimate the volume of Guazuma crinitain forest plantations. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>

Roach, S. N., & Langlois, R. A. (2021). Intra- and cross-species transmission of astroviruses. *Viruses*, 13(6), 1127. <https://doi.org/10.3390/v13061127>

Roos, Y. H. (2020). Water and pathogenic viruses inactivation—food engineering perspectives. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 251–267. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09234-z>

Roux, S., & Emerson, J. B. (2022). Diversity in the soil virosphere: To infinity and beyond? *Trends in Microbiology*, 30(11), 1025–1035. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2022.05.003>

Rzeżutka, A., & Cook, N. (2004). Survival of human enteric viruses in the environment and food. *FEMS Microbiology Reviews*, 28(4), 441–453. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.02.001>

Sánchez, G., & Bosch, A. (2016). Survival of enteric viruses in the environment and food. In *Viruses in Foods* (pp. 367–392). Springer International Publishing. [http://dx.doi.org/10.1007/978331930723-7\\_13](http://dx.doi.org/10.1007/978331930723-7_13)

Santamaría, J., & Toranzos, G. A. (2003). Enteric pathogens and soil: A short review. *International Microbiology*, 6(1), 5–9. <https://doi.org/10.1007/s10123-003-0096-1>

Schwarz, K. R., Sidhu, J. P. S., Toze, S., Li, Y., Lee, E., Gruchlik, Y., & Pritchard, D. L. (2019). Decay rates of *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp., F-specific bacteriophage MS2, somatic coliphage and human adenovirus in facultative pond sludge. *Water Research*, 154,

62–71. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.027>

Seitz, S. R., Leon, J. S., Schwab, K. J., Lyon, G. M., Dowd, M., McDaniels, M., Abdulhafid, G., Fernandez, M. L., Lindesmith, L. C., Baric, R. S., & Moe, C. L. (2011). Norovirus infectivity in humans and persistence in water. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(19), 6884–6888. <https://doi.org/10.1128/aem.05806-11>

Sinclair, R. G., Jones, E. L., & Gerba, C. P. (2009). Viruses in recreational water-borne disease outbreaks: A review. *Journal of Applied Microbiology*, 107(6), 1769–1780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04367.x>

Skraber, S., Ogorzaly, L., Helmi, K., Maul, A., Hoffmann, L., Cauchie, H.-M., & Gantzer, C. (2009). Occurrence and persistence of enteroviruses, noroviruses and F-specific RNA phages in natural wastewater biofilms. *Water Research*, 43(19), 4780–4789. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.020>

Sochacki, A., Felis, E., Bajkacz, S., Nowrotek, M., & Miksch, K. (2018). Removal and transformations of diclofenac and sulfamethoxazole in a two-stage constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 122, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.039>

Song, H., Alfiya, Y., Dubowski, Y., & Friedler, E. (2017). Sorption and biodegradation of propylparaben in greywater by aerobic attached-growth biomass. *Science of The Total Environment*, 598, 925–930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.032>

Storey, M. V., & Ashbolt, N. J. (2001). Persistence of two model enteric viruses (B40-8 and MS-2 bacteriophages) in water distribution pipe biofilms. *Water Science and Technology*, 43(12), 133–138. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0724>

Stuempfig, N. D., & Seroy, J. (2023). Viral gastroenteritis. NCBI Bookshelf. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK518995/>

Tang, Y., Zhang, S., Su, Y., Wu, D., Zhao, Y., & Xie, B. (2021). Removal of microplastics from aqueous solutions by magnetic carbon nanotubes. *Chemical Engineering Journal*, 406, 126804. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126804>

Tseng, C.-C., & Li, C.-S. (2005). Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Science and Technology*, 39(12), 1136–1142. <https://doi.org/10.1080/02786820500428575>

Uhrbrand, K., Schultz, A. C., Koivisto, A. J., Nielsen, U., & Madsen, A. M. (2017). Assessment of airborne bacteria and noroviruses in air emission from a new highly-advanced hospital wastewater treatment plant. *Water Research*, 112, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.046>

Upfold, N. S., Luke, G. A., & Knox, C. (2021). Occurrence of human enteric viruses in water sources and shellfish: A focus on africa. *Food and Environmental Virology*, 13(1), 1–31. <https://doi.org/10.1007/s12560-020-09456-8>

Verreault, D., Moineau, S., & Duchaine, C. (2008). Methods for sampling of airborne viruses. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 72(3), 413–444. <https://doi.org/10.1128/mubr.00002-08>

Waldman, P., Meseguer, A., Lucas, F., Moulin, L., & Wurtzer, S. (2017). Interaction

of human enteric viruses with microbial compounds: Implication for virus persistence and disinfection treatments. *Environmental Science & Technology*, 51(23), 13633–13640. <https://doi.org/10.1021/acs.est7b03875>

Wan, G.-H., Huang, C.-G., Huang, Y.-C., Huang, J.-P., Yang, S.-L., Lin, T.-Y., & Tsao, K.-C. (2012). Surveillance of Airborne Adenovirus and *Mycoplasma pneumoniae* in a Hospital Pediatric Department. *PLoS ONE*, 7(3), e33974. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033974>

Wasonga, M. O., Maingi, J., & Omwoyo, O. (2021). Effects of contamination of freshwater habitat with common heavy metals and anions on the prevalence of human adenoviruses and enteroviruses. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.603217>

Weber, T. P., & Stilianakis, N. I. (2008). Inactivation of influenza A viruses in the environment and modes of transmission: A critical review. *Journal of Infection*, 57(5), 361–373. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2008.08.013>

Wen, T.-Y., Wang, H.-C., Krichtafovitch, I., & Mamishev, A. V. (2015). Novel electrodes of an electrostatic precipitator for air filtration. *Journal of Electrostatics*, 73, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.11.002>

West, J. S., & Kimber, R. B. E. (2015). Innovations in air sampling to detect plant pathogens. *Annals of Applied Biology*, 166(1), 4–17. <https://doi.org/10.1111/aab.12191>

Wu, Z., Cai, P., Liang, E., Chen, Q., Sun, W., & Wang, J. (2023). Distinct adaptive strategies and microbial interactions of soil viruses under different metal(loid) contaminations. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132347. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132347>

Yang, W., Cai, C., & Dai, X. (2022). Interactions between virus surrogates and sewage sludge vary by viral analyte: Recovery, persistence, and sorption. *Water Research*, 210, 117995. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117995>

Yeargin, T., Buckley, D., Fraser, A., & Jiang, X. (2016). The survival and inactivation of enteric viruses on soft surfaces: A systematic review of the literature. *American Journal of Infection Control*, 44(11), 1365–1373. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2016.03.018>

Yezli, S., & Otter, J. A. (2011). Minimum infective dose of the major human respiratory and enteric viruses transmitted through food and the environment. *Food and Environmental Virology*, 3(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s12560-011-9056-7>

Zhang, M., Ghosh, S., Kumar, M., Santiana, M., Bleck, C. K. E., Chaimongkol, N., Altan-Bonnet, N., & Shuai, D. (2021). Emerging Pathogenic Unit of Vesicle-Cloaked Murine Norovirus Clusters is Resistant to Environmental Stresses and UV254 Disinfection. *Environmental Science & Technology*, 55(9), 6197–6205. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01763>

Zhao, Y., Aarnink, A. J. A., Doornenbal, P., Huynh, T. T. T., Koerkamp, P. W. G. G., Landman, W. J. M., & de Jong, M. C. M. (2011). Investigation of the efficiencies of bioaerosol samplers for collecting aerosolized bacteria using a fluorescent tracer. II: Sampling efficiency and half-life time. *Aerosol Science and Technology*, 45(3), 432–442. <https://doi.org/10.1080/02786826.2010.543197>

Zhuang, J., & Jin, Y. (2003). Virus retention and transport as influenced by different forms of soil organic matter. *Journal of Environmental Quality*, 32(3), 816–823. <https://doi.org/10.1021/1021/acs.est7b03875>

org/10.2134/jeq2003.8160

Zukeran, A., Sawano, H., Ito, K., Oi, R., Kobayashi, I., Wada, R., & Sawai, J. (2018). Investigation of inactivation process for microorganism collected in an electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, 93, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.04.002>