

MECANISMOS DE TRANSPORTE E RETENÇÃO DE MICROORGANISMOS PATOGÊNICOS EM AQUÍFEROS

Bolivar A. Matos¹, Jorge K. Yamamoto¹ e Alberto Pacheco¹

Resumo - Normalmente, o dimensionamento de distâncias mínimas entre poços de abastecimento e fontes de contaminação por microorganismos é baseado apenas em observações empíricas da eliminação de microorganismos no meio. Este artigo faz uma revisão das equações que descrevem os mecanismos de transporte e retenção de micróbios em meios porosos, afim de termos mais ferramentas para utilizar no dimensionamento destas distâncias e nos estudos de vulnerabilidade e proteção de aquíferos.

Abstract - Usually, minimum distances between groundwater wells and a source of microorganism contamination is based solely in empirical observations of microorganism removal in aquifers. This paper reviews the equations that describe the mechanisms of transport and retention of microorganisms in porous media in order to have more tools to estimate these distances and to use them in studies of aquifer vulnerability.

Palavras-chave - transporte, retenção, microorganismos, aquíferos.

INTRODUÇÃO

Microorganismos comportam-se como colóides. Colóides são partículas muito pequenas que se encontram em suspensão (não diluídas) na solução. O transporte das partículas (microorganismos, no nosso caso) em suspensão é controlado pelos mecanismos de convecção e dispersão hidrodinâmica. A convecção ou advecção representa o movimento das partículas devido ao gradiente hidráulico. A dispersão hidrodinâmica (dispersão mecânica + difusão molecular) representa o movimento devido às mudanças na magnitude e direção da velocidade nos poros, e devido ao movimento Browniano.

A Figura 1 ilustra os três mecanismos que limitam o transporte de partículas em meios porosos.

¹ Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Cidade Universitária, Rua do Lago, 562, CEP 05508-900, São Paulo-SP, telefone: (011) 818.4052, fax: (011) 818.4207, e-mail: bolivar@usp.br
Este projeto tem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Protocolo 96/01250-3)

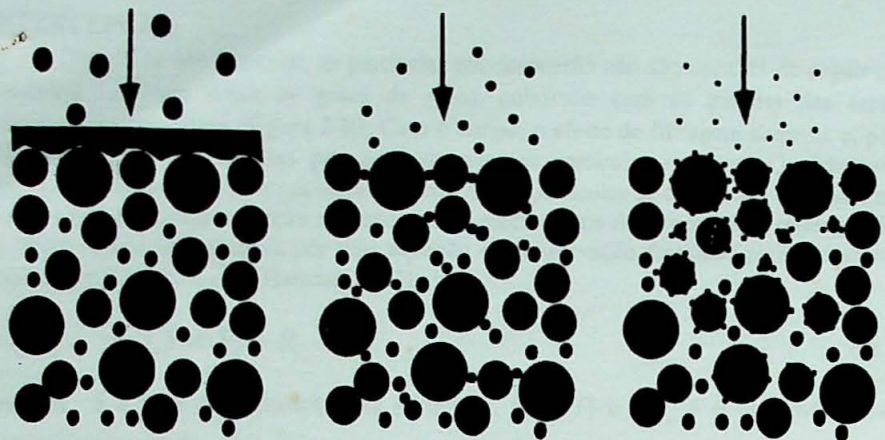


Figura 1: Principais mecanismos de filtragem. Adaptado de McDowell-Boyer et al., 1986.

1. Manto superficial ($d/d_p < 10$). (d é o diâmetro dos grãos e d_p é o diâmetro das partículas). Para partículas e agregados de partículas comparáveis ou maiores em tamanho do que os grãos do meio poroso, a penetração no meio não irá acontecer, ao invés disso, um manto superficial se formará acima do meio. Como resultado, haverá uma acumulação de partículas provocando uma diminuição na permeabilidade. É claro que este mecanismo de retenção tem sua maior importância para partículas maiores como as bactérias (tamanho: 1 a 10 μ m).

2. Filtragem ($10 < d/d_p < 12$). As partículas pequenas o bastante para penetrar no meio ainda podem ser removidas por filtragem entre os grãos. Esta fase possui uma capacidade muito limitada de acumular partículas, e não esperamos uma acentuada diminuição na permeabilidade.

3. Adsorção. As partículas muito pequenas podem ser removidas da solução por forças físicas e químicas que ocorrem entre as partículas e o meio. Para os vírus (tamanho: 0,02 a 0,08 μ m), que são bem menores que as bactérias, este é o mecanismo de retenção mais importante.

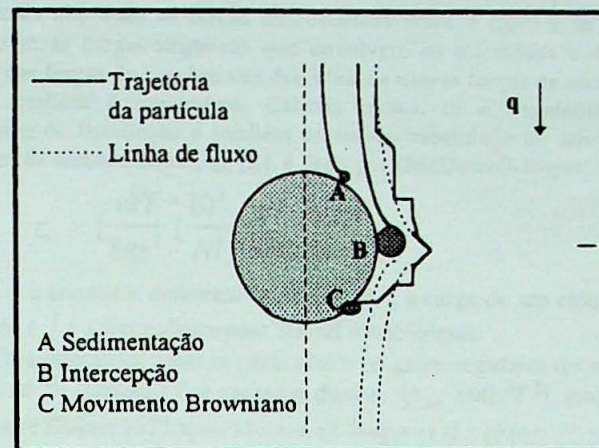


Figura 2: Mecanismos dominantes de transporte das partículas. (Adaptado de Yao et al. 1971 apud McDowell-Boyer et al., 1986).

SEDIMENTAÇÃO

A deposição gravitacional (Figura 2-A) de grãos pode ocorrer se as partículas possuem uma densidade diferente da densidade do líquido. A sedimentação gravitacional pode provocar o desvio das partículas das linhas de fluxo e a colisão com a superfície do meio. O parâmetro que controla a sedimentação é a velocidade de sedimentação de Stokes, v_s , [LT^{-1}], que para uma partícula esférica é dada (McDowell-Boyer et al., 1986):

$$v_s = \frac{g}{18\mu} (\rho_p - \rho) d_p^2 \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade, [LT^{-2}], ρ é a massa específica do fluido, [ML^{-3}], ρ_p é a massa específica da partícula, [ML^{-3}], e μ é a viscosidade do fluido, [$MT^{-1}L^{-1}$].

O volume de partículas depositadas de forma uniforme por volume total do meio poroso por sedimentação é (Corapcioglu e Haridas, 1984):

$$\sigma = \frac{1}{2} (1 - n_o) \pi Z \left(\frac{d_p}{d}\right)^2 \left[\left(1 + \frac{d_p}{d}\right)^2 - 1\right]^{1/2} \quad (2)$$

onde n_o é a porosidade inicial e Z é o número que reflete a interconexão existente entre a rede de poros do meio.

INTERCEPÇÃO

Devido ao seu tamanho, as partículas em suspensão não são capazes de seguir os caminhos tortuosos entre os grãos de solos, colidindo com as paredes das áreas convergentes dos poros (Figura 2-B). Com o tempo, o efeito de filtragem aumenta e, por fim, as partículas capturadas passam a remover as partículas menores. Quando esta acumulação aumenta e se torna instável, pedaços de partículas se quebram e retornam ao fluxo, podendo sofrer remoção novamente. Os mecanismos de deposição e reintegração ao fluxo podem ser descritos por uma equação de conservação da massa para o material depositado (Corapcioglu e Haridas, 1984):

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_p S = R_a + R_d \quad (3)$$

onde R_a é a taxa de deposição das partículas, $[ML^{-3}T]$ e R_d é o decaimento das partículas depositadas, $[ML^{-3}T]$.

O termo R_a pode ser expresso pela seguinte equação cinética (Fetter, 1993, pg. 129):

$$R_a = k_c C - k_y S \quad (4)$$

onde k_c e k_y são constantes de deposição e reposição, respectivamente.

Devido ao seu pequeno tamanho e por serem muito leves e tenderem a flutuar, os vírus e algumas bactérias não sofrem intercepção e sedimentação. Então qualquer termo da equação de conservação da massa que caracterize os efeitos de intercepção e sedimentação gravitacional pode ser desprezado para vírus e algumas bactérias.

MOVIMENTO BROWNIANO

Para partículas muito pequenas (menor que poucos micrômetros) o transporte dominante para a superfície do meio é o movimento Browniano. O movimento Browniano (Figura 2-C) é um movimento aleatório causado pelo gradiente térmico das moléculas, resultante da colisão entre moléculas ou entre outros colóides. O fluxo de massa de bactérias ou vírus devido ao movimento Browniano, J_B , $[ML^{-3}T^{-1}]$, pode ser expresso por (Corapcioglu e Haridas, 1984):

$$J_B = -D_p \theta \nabla C \quad (5)$$

onde θ é o volume ocupado pela suspensão por unidade de volume total. O coeficiente de difusão das partículas (os microorganismos), D_p , $[L^2T^{-1}]$, pode ser estimado pela equação de Stokes-Einstein (McDowell-Boyer et al., 1986):

$$D_p = \frac{kT}{3\pi\mu d_p} \quad (6)$$

onde k é a constante de Boltzmann, $[FL\theta^{-1}]$ e T é a temperatura absoluta, $[\theta]$.

A presença de íons na solução pode alterar significativamente a interação eletrostática entre o meio e as partículas. Os íons se acumulam em uma camada dupla torno das partículas e do meio. Com o aumento da força iônica, esta camada comprimida alterando as forças eletrostáticas entre o meio e as partículas. Os cátions neutralizam as cargas negativas que envolvem os micróbios e os grãos, permitindo a atuação das forças de London-van der Waals e outras forças de atração. A valência dos cátions também é importante. Cátions mono, bi e trivalentes possuem crescente capacidade de floculação e também crescente habilidade de adsorção de micróbios. A espessura da camada difusa, z_o , $[L]$, é dada por (McDowell-Boyer, 1992):

$$z_o = \left[\frac{\epsilon kT}{8\pi e^2} \left(\frac{10^3}{NI} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

onde ϵ é a constante dielétrica do fluido, e é a carga de um elétron, N é o número Avogrado e I é a força iônica para um sal monovalente.

Para interações entre as partículas e os grãos regulares do meio, onde $d/d_p \gg 1$ o potencial de interação das camadas duplas, φ_{cd} , $[ML^2T^{-2}]$, pode ser aproximado (Spielman e Cukor, 1973 apud McDowell-Boyer et al., 1986):

$$\varphi_{cd} = \frac{\epsilon d_p}{2} \psi_p \psi \ln(1 + \exp^{-r/z_o}) \quad (8)$$

onde ψ é o potencial na superfície do meio, ψ_p é o potencial na superfície da partícula e r é a distância entre a superfície da partícula e a superfície do meio, $[L]$.

A Equação 8 é válida para $\psi - \psi_p < 50$ mV e $z_o d_p > 10$. Se as superfícies possuem sinais opostos, as forças serão atrativas e φ_{cd} é negativo, enquanto que se as superfícies possuem mesmos sinais, as forças serão de repulsão e φ_{cd} é positivo.

A força dominante que controla a aderência de partículas no meio é a interação eletrostática entre uma partícula e a superfície. Porém, existem também forças atrativas dipolo-dipolo entre os átomos e moléculas chamadas forças de London-van der Waals. O potencial de interação de atração que existe entre uma esfera e uma placa plana, φ_a , dada por (Spielman e Cukor, 1973 apud McDowell-Boyer et al., 1986):

$$\varphi_a = \frac{A}{6} \left[\ln \left(\frac{r + d_p}{r} \right) - \frac{d_p}{r} \frac{r + \frac{d_p}{2}}{r + d_p} \right] \quad (9)$$

onde A é a constante de Hamaker (10^{-13} a 10^{-12} erg).

A energia potencial resultante ($\varphi_{cd} + \varphi_a$) é utilizada para determinar se a mobilização de partículas suspensas passando através do meio poroso é favorável.

não. O máximo do potencial de interação é chamado de barreira de energia. Existem forças repulsivas que atuam entre as partículas que se aproximam dos grãos do meio, apenas aquelas que possuem maior energia que este potencial máximo poderão continuar se aproximando (McDowell-Boyer, 1992).

A força iônica, I , da solução exerce um efeito expressivo na altura desta barreira. Quando I é grande, a espessura da camada dupla diminui (Equação 7), e as forças de atração de London-van der Waals dominam sobre a repulsão eletrostática em uma região chamada mínimo de energia primário.

CINÉTICA DA REMOÇÃO EM UM MEIO PURO

O propósito de estudar a cinética de remoção das partículas durante a filtração é para posteriormente prever a migração das partículas no meio poroso, e os resultados da alteração do meio pelas partículas retidas.

A remoção das partículas da solução é dada por (McDowell-Boyer et al., 1986):

$$\frac{dC}{dx} = -\lambda_0 C \quad (10)$$

onde x é a distância ao longo da direção do fluxo, [L], e λ_0 é o coeficiente de filtração em um meio puro [L^{-1}]. Meio puro é aquele em que ainda não existem partículas depositadas. λ_0 pode ser estimado medindo a concentração final de partículas através de um filtro de comprimento conhecido, ou empiricamente através da equação (McDowell-Boyer et al., 1986):

$$\lambda_0 = \frac{3(1-n)}{2d} \left[4A_s^{1/3} \left(\frac{qd}{D_p} \right)^{-2/3} + 0,56A_s \left(\frac{A}{\mu d_p^2 q} \right)^{1/8} \left(\frac{d_p}{d} \right)^{15/8} + 2,4 \times 10^{-3} A_s \left(\frac{v_s}{q} \right)^{1,2} \left(\frac{d_p}{d} \right)^{-0,4} \right] \quad (11)$$

onde n é a porosidade do meio, $A_s = \frac{1-P^5}{1-\frac{3}{2}P+\frac{3}{2}P^5-P^6}$ e $P = (1-n)^{1/3}$.

O coeficiente de filtração estimado pela Equação 11 leva em consideração a retenção de partículas devido a difusão pelo movimento Browniano (primeiro termo dentro dos colchetes da equação), devido a interceptação (segundo termo dentro dos colchetes) e devido a sedimentação gravitacional (terceiro termo dentro dos colchetes).

DECAIMENTO

O processo de morte dos microorganismos tem um papel importante durante períodos de retenção, principalmente em meio não saturado. Em geral, os tempos de sobrevivência dos microorganismos variam de semanas a meses. A sobrevivência depende de vários fatores como teor de umidade, pH, temperatura, tipos de solos, e (Gerba et al., 1975). A morte dos microorganismos pode ser expressa por um modelo de sorção cinético de primeira ordem irreversível (Corapcioglu e Haridas, 1984):

$$R_d = -k_d(\theta C + \rho \sigma) \text{ para bactérias} \quad (12-)$$

$$R_d = -k_d(\theta C + \rho C_a) \text{ para vírus} \quad (12-)$$

onde k_d é a taxa de decaimento específica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O transporte dos microorganismos depende dos mecanismos de convecção dispersão hidrodinâmica, e dos mecanismos de retenção (filtração é importante para bactérias, e adsorção é importante nos vírus). A adsorção depende do tamanho das partículas e dos grãos, e das interações eletrostáticas existentes entre elas. As interações eletrostáticas são funções do pH (do meio, da partícula e da solução) e da presença de íons.

O transporte de microorganismos não é tão bem compreendido e estudado como o transporte de solutos em sistemas aquíferos. Foi mostrado que existe uma grande quantidade de parâmetros (e.g., características físicas e químicas dos micróbios e do solo, força iônica da solução, pHs, etc.) que influenciam no transporte e retenção dos microorganismos no meio. Uma das dificuldades encontradas na simulação do modelo parece ser a de representar todos estes parâmetros. Algumas simplificações do sistema são realizadas para o desenvolvimento de modelos. Por exemplo, apesar de muitas indicações da importância da agregação e aderência aos sólidos, os modelos de previsão dos transportes de micróbios tipicamente consideram o transporte e remoção de uma única partícula.

REFERÊNCIAS

- CORAPCIOGLU, M. Y.; HARIDAS, A. (1984) Transport and fate of microorganisms in porous media: A theoretical investigation. *Journal of Hydrology*, v. 72, p. 149-166.
- FETTER, C. W. (1993) *Contaminant Hydrogeology*. New York, Macmillan Publishing Company. 458 p.
- GERBA, C. P.; WALLIS, C.; MELNICK, J. L. (1975) Fate of wastewater bacteria and viruses in soil. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, v. 101, n. IR3, 157-174.

- MCDOWELL-BOYER, L. M. (1992) Chemical mobilization of micron-sized particles in porous media under steady flow conditions. Environmental Science Technology, v. 26, n. 3, p. 586-593.
- MCDOWELL-BOYER, L. M.; HUNT, J. R.; SITAR, N. (1986) Particle transport through porous media. Water Resources Research, v. 22, n. 13, p. 1901-1921.

532