

Determinação da Condutividade Hidráulica do Solo: Lei de Darcy

Autor: Martílio Rafael Banze



Organização da Apresentação

1. Introdução
2. Revisão Bibliográfica
3. Metodologia
4. Resultados e Discussões
5. Conclusion

1. Introdução

- ❑ Segundo o PNUD (2006), cerca 1,1 bilhão de pessoas no mundo não têm acesso à água potável.
- ❑ Percentualmente, 97,6% da água do planeta é constituída pelos oceanos, mares e lagos de água salgada. A água doce, representada pelos 2,4% restantes, tem sua maior parte situada nas calotas polares e geleiras (1,9%), estando inacessível aos seres humanos pelos meios tecnológicos actuais. Da parcela restante (0,5%), mais de 95% é constituída pelas águas subterrâneas (CAPUCCI et al., 2001).
- ❑ Nesse contexto, os conhecimentos técnicos e científicos sobre as águas subterrâneas, em termos quantitativos e qualitativos, bem como sobre a vulnerabilidade de contaminação de aquíferos, são fundamentais ao planeamento ambiental. Além disso, é importante que a legislação sobre a água subterrânea se desenvolva, garantindo sua protecção e inserção na gestão dos recursos hídricos.

1. Introdução (Cont.)

- ❑ Segundo Fiori et al. (2010), a condutividade hidráulica de um solo (em superfície e em profundidade) é um parâmetro fundamental para determinar ou prever o funcionamento hídrico dos diferentes tipos de coberturas. Trata-se de um parâmetro importante não apenas para a caracterização dos solos e avaliação de sua vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, mas também para as avaliações de condições de recarga dos aquíferos, regularização de vazões de cursos de água superficiais, comportamento de plumas de contaminação, entre outras aplicações.

1.1. Objectivos

1.1.1. Objectivo Geral

- ☐ Estudar a condutividade hidráulica do solo através da lei de Darcy.

1.1.2. Objectivos Específicos

- ☐ Descrever a aplicação da Lei de Darcy;
- ☐ Identificar os factores que influenciam na condutividade hidráulica; e,
- ☐ Determinar a condutibilidade hidráulica de uma amostra de solo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Águas subterrâneas

2.1.1. Águas subterrâneas e o ciclo hidrológico

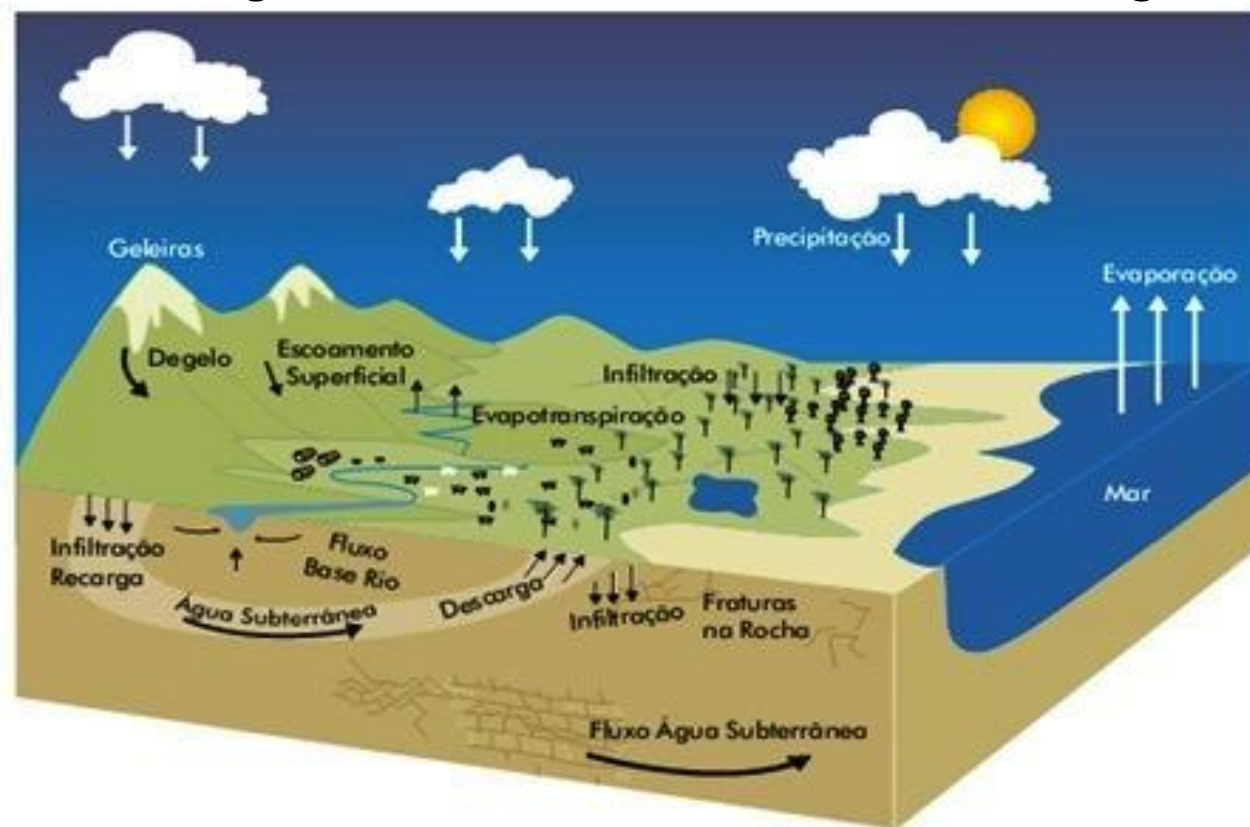


Figura 2. 1: Ciclo hidrológico (MMA, 2007).

2.1.1. Águas subterrâneas e o ciclo hidrológico (Cont.)

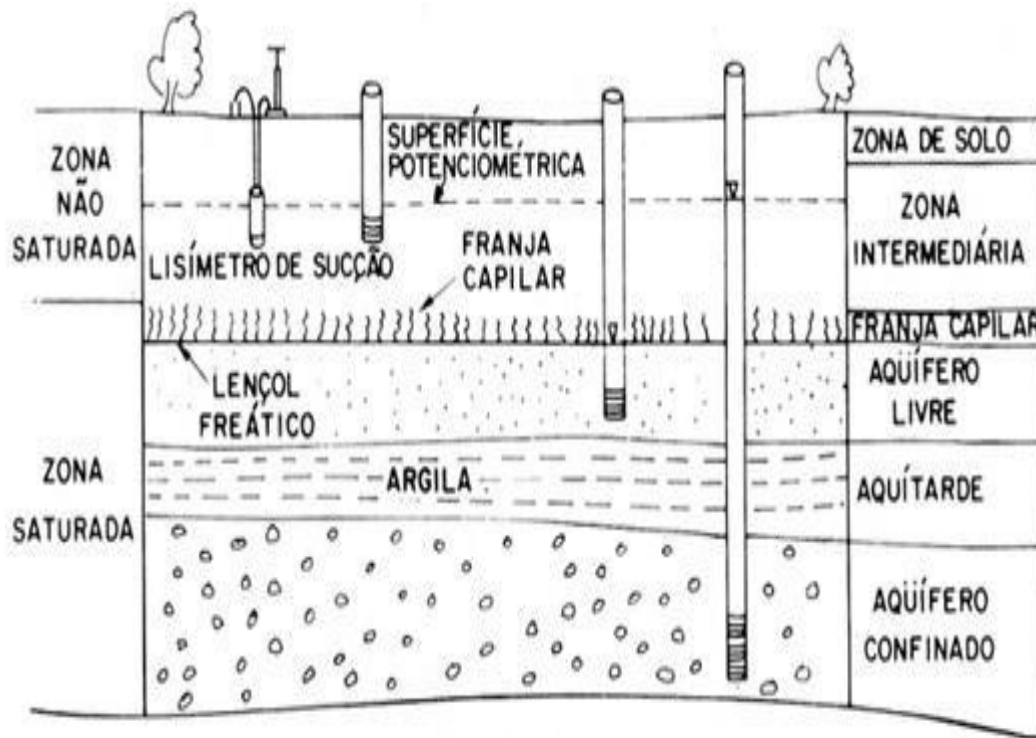


Figura 2. 2: Representação da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diferentes zonas de umidade (CLEARY, 1989).

2.2. Recarga e descarga de aquíferos

- ❑ Ocorre principalmente através da infiltração da água da chuva ou da neve derretida no solo, seguida por percolação através da zona não saturada até o lençol freático. A recarga também pode ser criada artificialmente através do estabelecimento de lagoas de infiltração e galerias, bem como pela injeção de água através de poços (GLASSER et al., 2007).
- ❑ Além dos factores citados, influenciam o volume de água recarregado a condutividade hidráulica vertical e a transmissividade do aquífero (POEHLS & SMITH, 2009). As áreas em que esse processo ocorre são denominadas zona de recarga e são extremamente importantes para a manutenção da qualidade e quantidade das águas subterrâneas (MMA, 2007), ao mesmo tempo em que destacam-se como áreas de elevado potencial de poluição dos aquíferos (SOUZA, 2009).

2.2. Recarga e descarga de aquíferos (Cont.)

- ❑ A protecção dessas áreas, portanto, é fundamental, evitando-se o desmatamento, o uso incorrecto dos solos e a instalação de actividades potencialmente poluidoras (MMA, 2007).
- ❑ A descarga de água é o fluxo de saída de água da zona saturada (POEHLS & SMITH, 2009) e ocorre por mecanismos como transpiração das plantas e evaporação directa, bem como fluxo para nascentes, rios e lagos, além de extracção através de poços (GLASSER et al., 2007).

2.3. Condutividade hidráulica e outras propriedades físicas dos aquíferos

- São três as propriedades físicas importantes que definem um aquífero: a condutividade hidráulica, a porosidade e o coeficiente de armazenamento (FEITOSA & FILHO, 2000).

2.3.1. Porosidade

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.1)$$

Em que: n é a porosidade total; V_v é o volume de vazios; e V é o volume total do material.

2.3.2. Coeficiente de armazenamento

- ❑ O coeficiente de armazenamento (S) é definido como o volume de água que um aquífero desprende ou armazena por unidade de área superficial do aquífero por variação unitária da componente de carga hidráulica normal aquela superfície. Pode ser determinado através de ensaios de bombeamento (FREEZE & CHERRY, 1979).

2.2.3. Condutividade Hidráulica

- ❑ A condutividade hidráulica é definida como a medida da resistência da água ao movimento através de um meio poroso (POEHLS & SMITH, 2009) ou como a medida da facilidade com a qual um meio transmite água. Seu significado físico é definido pelo “volume de líquido que flui perpendicularmente a uma unidade de área de um meio poroso sobre influência de um gradiente hidráulico unitário” (DELLEUR, 1999).
- ❑ É função tanto das características do meio, como porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas (FEITOSA & FILHO, 2000), quanto das características do fluido, como peso específico e viscosidade cinemática (FETTER, 2001).
- ❑ A permeabilidade depende das características do solo e do líquido (note-se que certas características da água como a viscosidade e densidade variam com a temperatura). A tabela 3.1 apresenta valores de K para os mais frequentes tipos de solos.

2.2.3. Condutividade Hidráulica (Cont.)

Tabela 3. 1: Valores da permeabilidade K para alguns tipos de solos e a água à temperatura de 20 °C.

Tipo de Solo	K (m/s)	K(m/d)
Argila	$10^{-6} - 10^{-10}$	$10^{-5} - 0.1$
Silte	$5 * 10^{-6} - 10^{-8}$	0.001 - 0.5
Areia siltosa	$10^{-5} - 10^{-6}$	0.1 - 1
Areia fina	$5 * 10^{-5} - 10^{-5}$	1 - 5
Areia média	$10^{-4} - 5 * 10^{-5}$	5 - 10
Areia grossa	$10^{-2} - 10^{-4}$	10 - 1000
Cascalho, burgau	$\geq 10^{-2}$	≥ 1000

Fonte: <https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-M.-Dez-2018-Cap%c3%adtulo-01-Hidr%c3%a1ulica-dos-Solos.pdf>. Acesso no dia 20 de Maio de 2021

2.3.3.1. Fluxo de águas subterrâneas e Lei de Darcy

- ❑ A condutividade hidráulica é um coeficiente proveniente da Lei de Darcy, que descreve o fluxo da água em meios porosos. A lei foi desenvolvida pelo engenheiro Henry Darcy através do experiência ilustrada na Figura 2.3 e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$Q = Ak \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (2.2)$$

Em que:

- ❑ Q = vazão constante que passa pelo meio poroso (L³/T); A = área da seção transversal através da qual a água flui (L²); L = distância percorrida pelo fluido (L); h₁ e h₂ são as cargas hidráulicas (L) nos pontos 1 e 2, respectivamente.

2.3.3.1. Fluxo de águas subterrâneas e Lei de Darcy (Cont.)

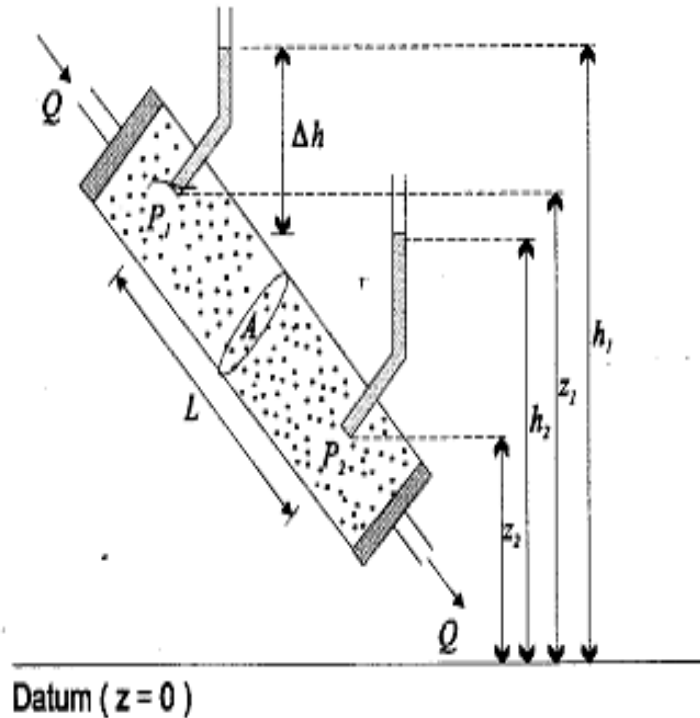


Figura 2. 3: Esquema representativo da experiência de Darcy.

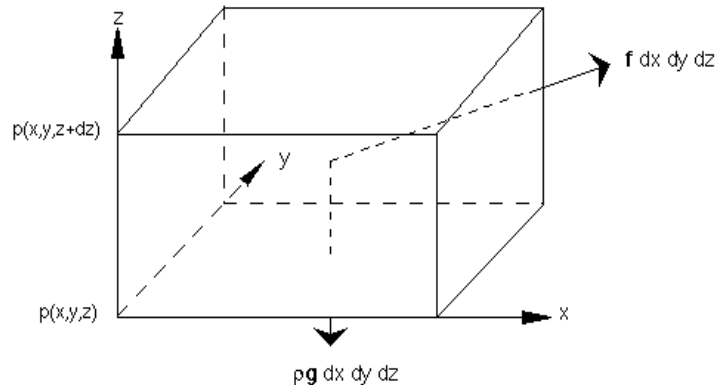
Fonte: Feitosa & Filho (2000).

- ❑ Uma diferença deve ficar clara ao estimar a verdadeira velocidade do fluxo de água subterrânea e do transporte de soluto. A velocidade de percolação (v_x) ou velocidade linear média do fluido é diferente da velocidade de Darcy ($q = Ki$) e é definida conforme a equação:

$$v_x = \frac{k}{n_e} \times i \quad (2.3)$$

- ❑ Em que: n_e é a porosidade efectiva do meio (DELLEUR, 1999). Segundo Fitts (2002), v_x é a velocidade média que um contaminante teria em água corrente, se não reagisse com a matriz do aquífero ou com outras substâncias químicas.

2.4. Determinação Experimental da Condutividade Hidráulica de Uma Amostra



- Considere um fluxo constante de fluido incompressível. Para descrever a dinâmica do problema, pode-se escrever um balanço de forças sobre algum elemento de volume $d\tau$.

$$F_z d\tau = -\rho g d\tau + p(x, y, z) dx dy - p(x, y, z + dz) dx dy + f_z d\tau \quad (2.4)$$

$$F d\tau = -\rho g d\tau - \nabla p x, y, z + f d\tau \quad (2.5)$$

$$f = -\mu q / k$$

- Com essas suposições finais, o equilíbrio de forças sobre algum elemento de volume $d\tau$ produz:

$$0 = -\mu k \nabla p - \rho g \quad (2.6)$$

- Resolvendo a equação para o vector de descarga:

$$q = -k \mu (\nabla p + \rho g) \quad (2.7)$$

2.4. Determinação Experimental da Condutividade Hidráulica de Uma Amostra (Cont.)

- Assumindo que o fluido é incompressível, ou seja, o termo entre colchetes pode agora ser reescrito:

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g) = -\frac{k\rho g}{\mu}\left(\nabla \frac{p}{\rho g} + \mathbf{e}_z\right) = -\frac{k\rho g}{\mu}\nabla\left(\frac{p}{\rho g} + z\right) \quad (2.8)$$

- Esta manipulação pode parecer um tanto artificial, mas o vector de descarga foi reescrito como o gradiente de alguma função dada pelo termo entre parenteses, geralmente chamado de potencial. O termo entre os parenteses é, portanto, frequentemente chamado de potencial hidráulico ϕ dado por;

$$\phi = z + \frac{p}{\rho g} \quad (2.9)$$

- Esta função também possui uma interpretação mais prática. Suponha que se coloque um tubo de ensaio verticalmente no solo como na figura 2.5.

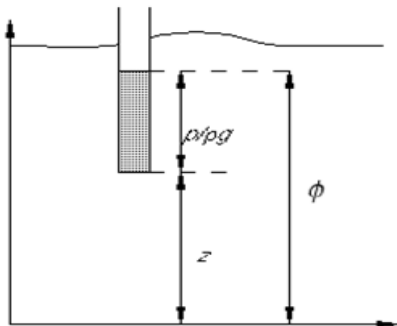


Figura 2. 5: Se um tubo de ensaio for colocado no solo, uma coluna de água surgirá dentro do tubo. A cabeça do lençol freático é a altura do nível da água em relação a algum nível de referência z .

2.4. Determinação Experimental da Condutividade Hidráulica de Uma Amostra (Cont.)

- ❑ O vector de descarga é, portanto, proporcional ao gradiente do potencial hidráulico e pode-se definir a constante de proporcionalidade a ser dada por:

$$k = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2.10)$$

A constante k é chamada de condutividade hidráulica. Agora é possível reescrever a eq. 2.8, implementando a eq. 2.9 e 2.10.

$$\mathbf{q} = -k\nabla\phi \quad (2.11)$$

- ❑ Esta equação é conhecida como lei de Darcy em sua forma mais geral, pois Darcy deduziu esta equação experimentalmente.

3. Metodologia

- ❑ Para conhecer e compreender a condutibilidade hidráulica e a lei de Darcy, foi feita a revisão bibliográfica.
- ❑ Por fim, para determinar a condutibilidade hidráulica usou-se bastou um tubo contendo uma amostra para a realização das medições do fluxo de água subterrânea. O projecto é apresentado na figura 3.1, onde o nível da água é estabilizado pelo uso de um transbordamento.

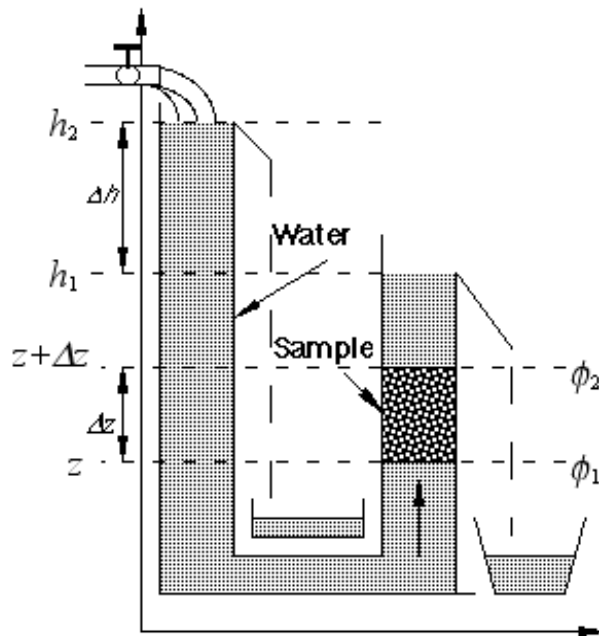


Figura 3. 1: O potencial hidráulico diferencial é proporcional à diferença entre a pressão exercida por cada uma das duas colunas de água. A configuração conforme esquematizado tem a vantagem de que as influências da entrada de água da torneira são minimizadas.

3. Metodologia (Cont.)



Figura 3. 2: Experiencia para determinação da condutibilidade hidráulica

4. Resultado e Discussões

4.1. Condutibilidade hidráulica de uma amostra de areia fina

- Na tabela 1 estão os resultados obtidos durante a realização da experiência com uma amostra do solo fino sendo que a condutibilidade hidráulica obtida é de 0,061 cm/s.

Tabela 4. 1: Tabela de registro de Valores: areia fina.

L (cm)	S (cm ²)	Q (cm ³ /s)	Δh (cm)	Δt (s)	V (cm ³)	$i = \frac{\Delta h}{L}$	$k = \frac{Q}{iA}$ (cm/s)
12	95	11,52	23.8	23	250	1.98	0,061

$$\sigma = \pm 0,8$$

4.2. Condutibilidade hidráulica de uma amostra de areia grossa

- ☐ Na tabela 2 estão os resultados obtidos durante a realização da experiência com uma amostra do solo de areia grossa. A condutibilidade hidráulica obtida é de 0,083 cm/s.

Tabela 4. 2: Tabela de registo de Valores: areia grossa.

L (cm)	S (cm ²)	Q (cm ³ /s)	Δh (cm)	Δt (s)	V (cm ³)	$i = \frac{\Delta h}{L}$	$k = \frac{Q}{iA}$ (cm/s)
12	95	15,62	23.8	16	250	1.98	0,083

$$\sigma = \pm 0,4$$

5. Conclusão

- ❑ A lei de Darcy afirma que o escoamento da água através uma coluna de areia saturada é proporcional à diferença de pressão hidráulica nos extremos da coluna e inversamente proporcional ao comprimento da coluna. O sinal negativo exprime que o escoamento vai no sentido contrário ao do gradiente hidráulico.
- ❑ Os factores que influenciam a condutibilidade hidráulica são: (i) estrutura do solo, (ii) grau de saturação, (iii) índice de vazios e, (iv) temperatura, sendo este ultimo factor, quanto maior for, menor será a viscosidade da água, logo, ela terá maior facilidade em escoar pelo solo e, sendo assim, é bem comum encontrar-se os valores da condutibilidade hidráulica igual a 20 °C e para tal faz-se uma relação para a condutibilidade hidráulica já conhecida para o solo, a 20 °C.
- ❑ A condutibilidade hidráulica determinada experimentalmente para a amostra de areia fina foi de 0,061 cm/s e para uma amostra de areia grossa foi de 0,083 cm/s. Entretanto, os resultados mostram que todas as amostras são de areia grossa e por sua vez, não foi tida em conta o factor da temperatura, todavia, as medições foram realizadas à temperatura do ambiente.

6. Obras Citadas

- CAPUCCI, E., MARTINS, A. M., MANSUR, K. L., & MONSORES, A. L. (2001). Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas. Rio de Janeiro, Brasil: SEMADS.
- CLEARY, R. W. (1989). Águas Subterrâneas. Brasil.
- DELLEUR, J. W. (1999). The Handbook of Groundwater Engineering.
- FEITOSA, F. A., & FILHO, J. M. (2000). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. (2). Brasil: Fortaleza.
- FETTER, C. (2001). Applied Hydrogeology. (4). New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- FIORI, J. O., CAMPOS, J., & ALMEIDA, L. (2010). Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de Goiás. *Geociências*, 3(1), pp. 229-235.
- FREEZE, R., & CHERRY, J. A. (1979). Groundwater.

6. Obras Citadas (Cont.)

GLASSER, S., GAUTHIER-WARINNER, J., GURRIERI, J., KEELY, J., TUCCI, P., SUMMERS, P., et al. (2007). Technical Guide to Managing Ground Water Resources.

Ministério do Meio Ambiente (MMA)-Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHAU). (2007). Águas Subterrâneas, um recurso conhecido a ser protegido. Brasília.

PNUD. (2006). Relatório do Desenvolvimento Humano 2006. Além da Escassez: Poder, Pobreza e a Crise Mundial da Água. Obtido em 2021 de Maio de 17, de http://hdr.undp.org/en/media/01_HDR06%20frontmatter_PT_revCA.pdf

POEHLIS, D., & SMITH, G. (2009). Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology.

SOUZA, N. A. (2009). *Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas – um estudo do aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) , Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

6.1. Sítios Consultados

<<http://www.few.vu.nl/environmentalphysics>>. Acesso no dia 17 de Maio de 2021

<<https://www.ufjf.br/nugeo/files/2013/06/MARANGON-M.-Dez-2018-Cap%c3%adtulo-01-Hidr%c3%a1ulica-dos-Solos.pdf>>. Acesso no dia 20 de Maio de 2021



Fim