

Sugestões para Classificação de Águas Subterrâneas

Apresentadas ao GT-CONAMA

Chang, Hung Kiang
UNESP/IGCE/DGA/LEBAC
22/03/2006

Roteiro

1- Água em Sub-superfície

Z. não-saturada / Z. saturada

2- Propriedades Hidrodinâmicas

ϕ , α , β , S, K, T

3- Unidades Hidrogeológicas

Camadas Confinantes

Aqüíferos e Tipos de Aqüíferos

4- Produtividade e Testes de Aqüíferos

Equação Geral de Fluxo

Soluções de Theis e Jacob (Raio de Interferência)

Laboratório (Granulometria e Permeâmetros)

Traçadores

Testes de *Slug* e de Bombeamento

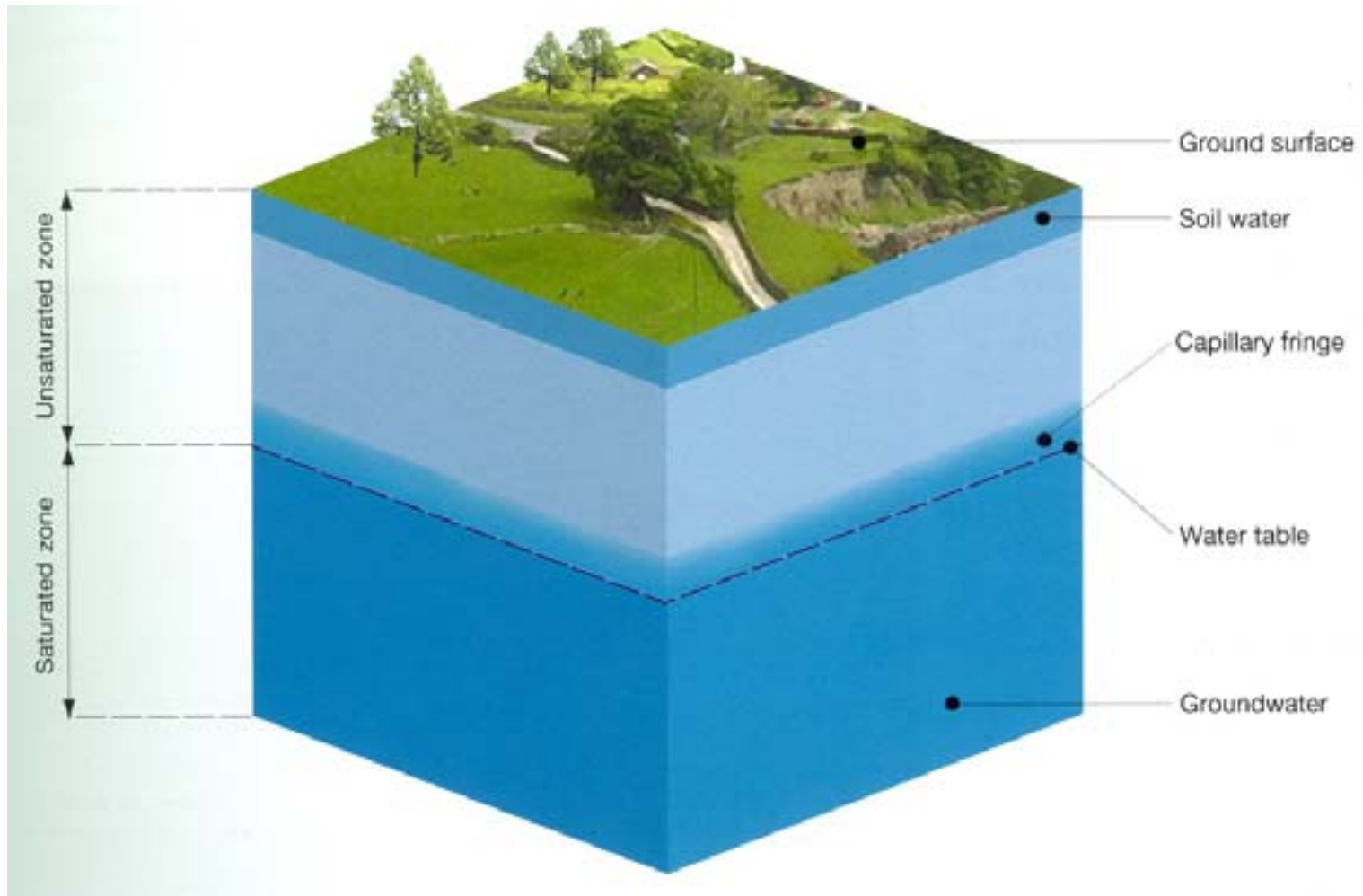
6- Heterogeneidades em Aqüíferos

Estruturais

Estratigráficas

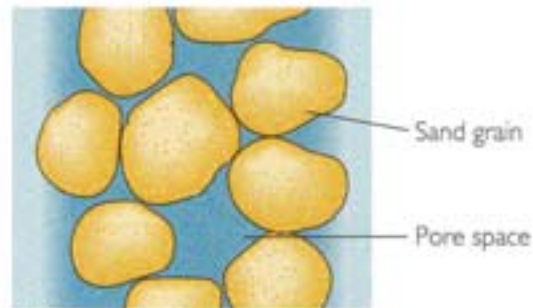
7- Parâmetros Importantes para Classificação de Aqüíferos

Água em Sub-Superfície

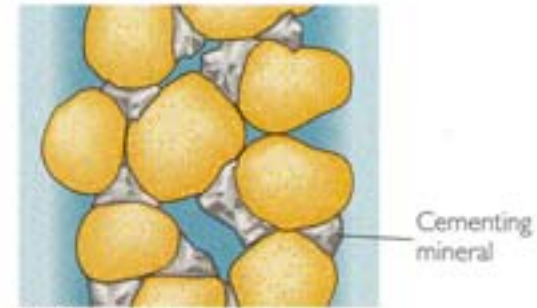


Água em Sub-Superfície

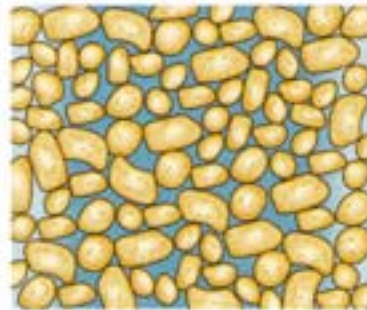
Zona Saturada



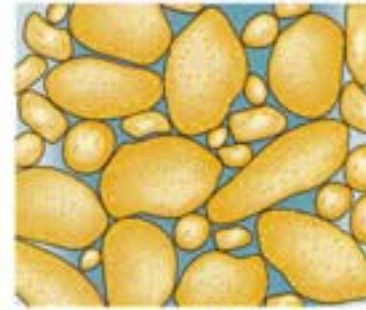
(a) Porous sandstone



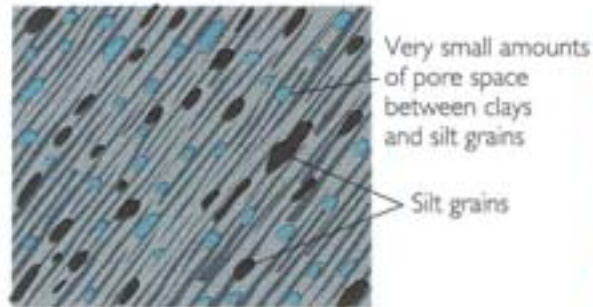
(b) Cemented sandstone



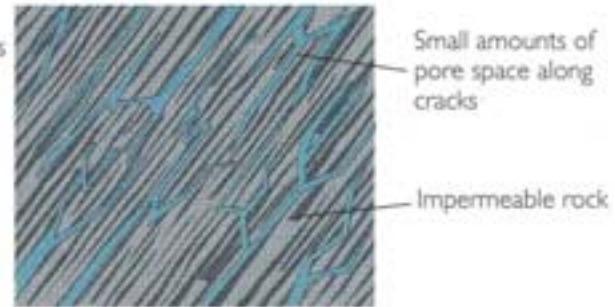
(c) Fine-grained sandstone



(d) Sandstone with irregular shapes



(e) Unfractured shale



(f) Fractured shale

Propriedades Hidrodinâmicas

Porosidade

Porosidade - % de vazios no total da rocha ou solo

$$\phi = \frac{100 V_v}{V}$$

- **Produção específica (*specific yield*)** – qtidade de água que flui da rocha, sob ação da gravidade
- **Retenção específica (*specific retention*)** – qtidade de água que não drena, sob ação da gravidade
- **Porosidade = Produção específica + Retenção específica**
- **Porosidade efetiva** – vazios que permitem o escoamento de fluido
- **Porosidade primária** – vazios formados junto c/ a rocha
- **Porosidade secundária** – vazios formados após a consolidação da rocha (dissolução, fraturamento)

Propriedades Hidrodinâmicas

Compressibilidade

AQUÍFERO

$$\alpha = - \frac{dV_T / V_T}{d\sigma_e}$$

$d\sigma_e \rightarrow$ variação na tensão efetiva

ÁGUA

$$\beta = - \frac{dV_W / V_W}{dp}$$

TIPO DE ROCHA	α (m^2/N ou Pa^{-1})
<i>Argila</i>	10^{-6} a 10^{-8}
<i>Areia</i>	10^{-7} a 10^{-9}
<i>Cascalho/rocha fraturada</i>	10^{-3} a 10^{-10}

$$\beta = 4.4 \times 10^{-10} m^2 / N (Pa^{-1})$$

Propriedades Hidrodinâmicas

Coeficiente de Armazenamento (S)

- Aquífero Confinado

$$S_s = (\alpha + n\beta) \rho g ,$$

$$S = S_s \cdot b ,$$

$$S = (\alpha + n\beta) \rho g b ,$$

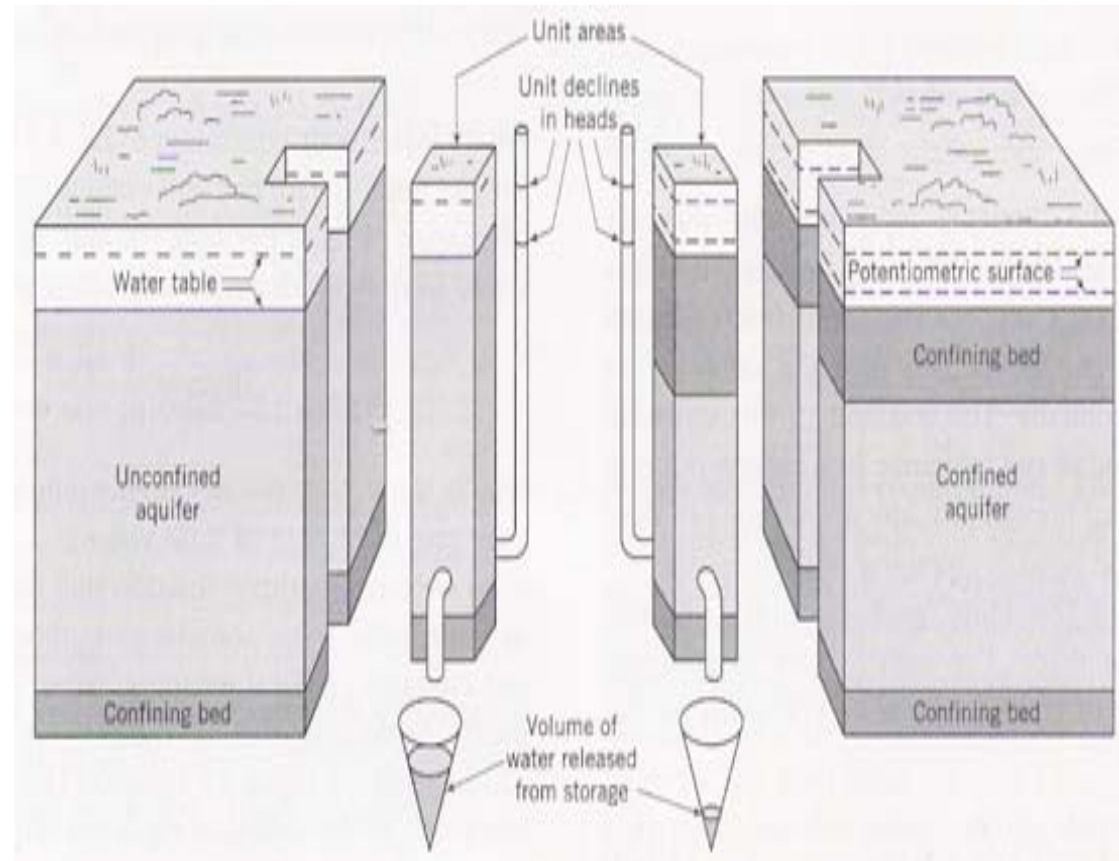
b = espessura do aquífero

- Aquífero Não-Confinado (Livre)

$$S = (S_s + S_Y) h$$

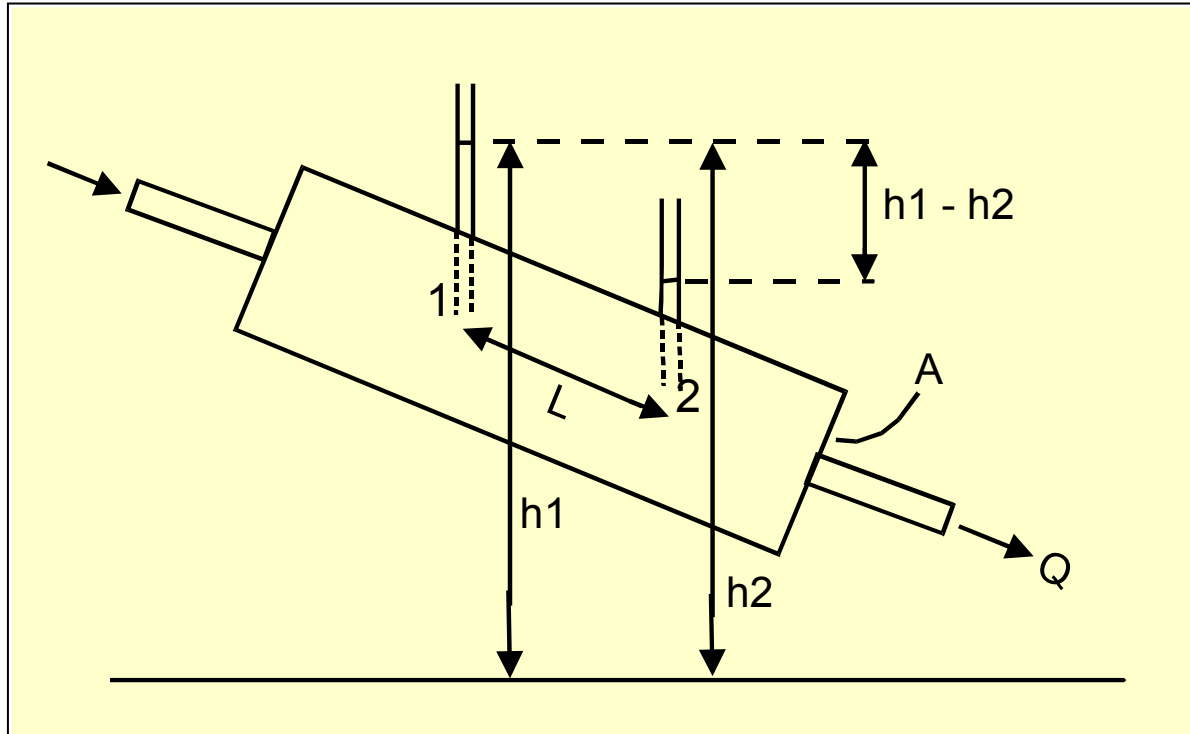
$$S = [(\alpha + n\beta) \rho g + S_Y] h ,$$

h = espessura da zona saturada



Propriedades Hidrodinâmicas

Experimento de Darcy



$$Q \propto h_1 - h_2$$

$$Q \propto 1/L$$

$$Q \propto A$$

$$Q = -K A \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right)$$

Lei de Darcy

$$Q = -K A \frac{dh}{dl},$$

$$v = -K \frac{dh}{dl}$$

$$V_x = -\frac{K}{ne} \frac{dh}{dl}$$

Velocidade Linear Média

Propriedades Hidrodinâmicas

Permeabilidade Intrínseca (K_i)

$$K = \frac{K_i \rho g}{\mu} \quad \text{ou} \quad K_i = \frac{K \mu}{\rho g}$$

Transmissividade (T)

$$T = K \cdot b \quad (\text{L}^2/\text{T}),$$

ou

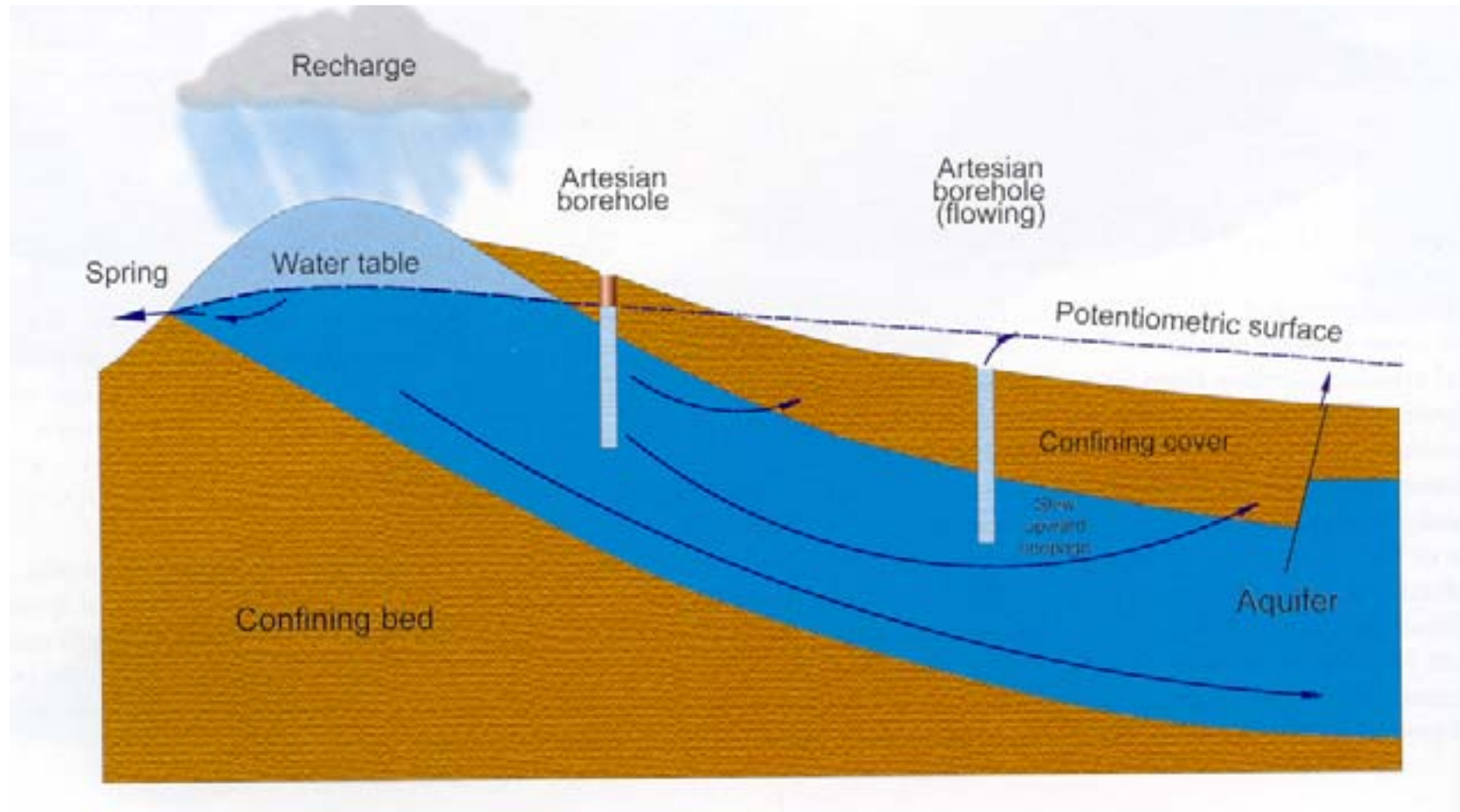
$$T = \frac{K_i \rho g}{\mu} b$$

$T > 0.015 \text{ m}^2 / \text{s}$ - bom aquífero

Difusividade Hidráulica (D)

$$D = \frac{T}{S} = \frac{K}{S_s} \quad (\text{L}/\text{T})$$

Unidades Hidrogeológicas



Unidades Hidrogeológicas

Aqüífero Livre

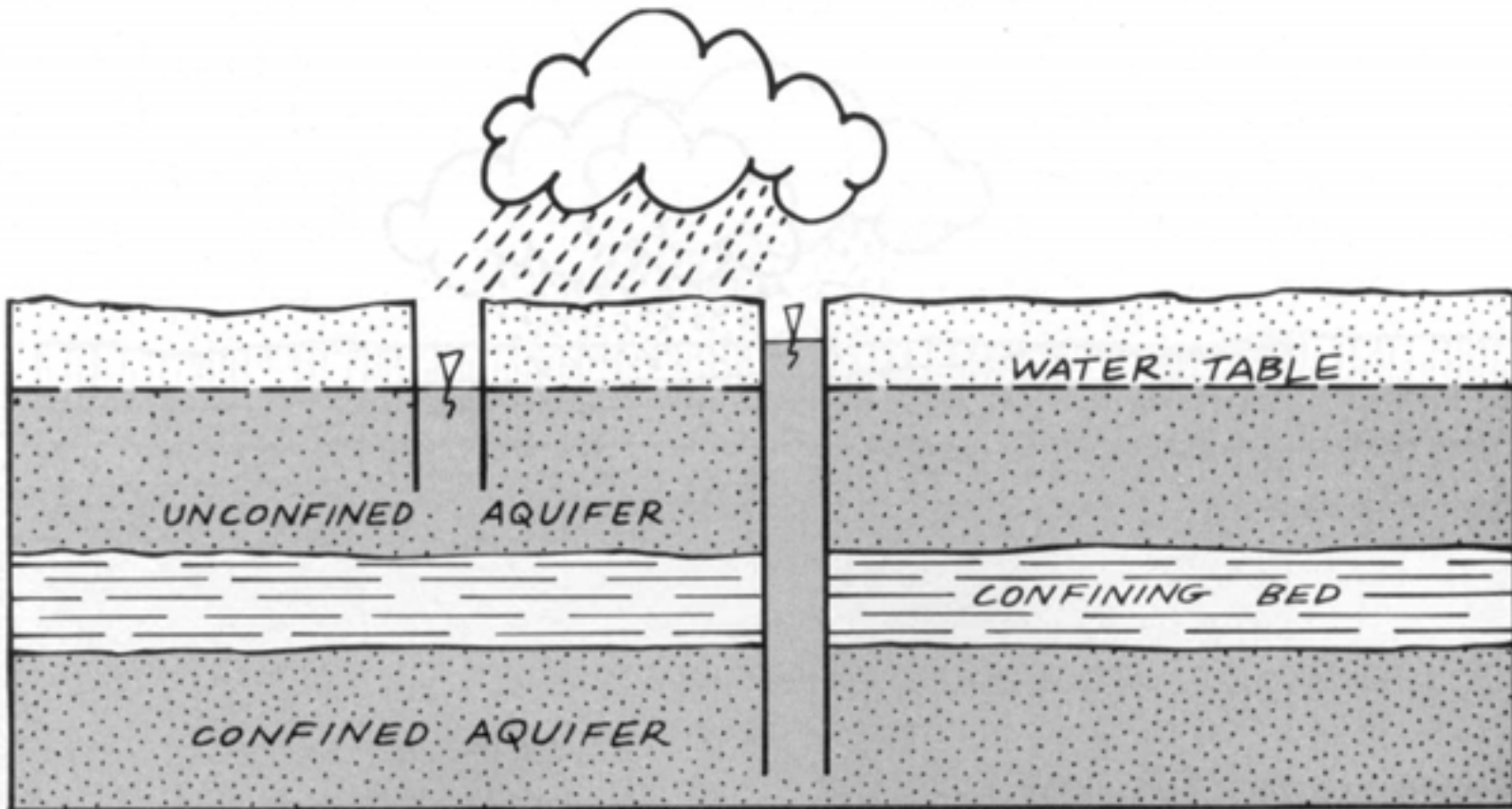
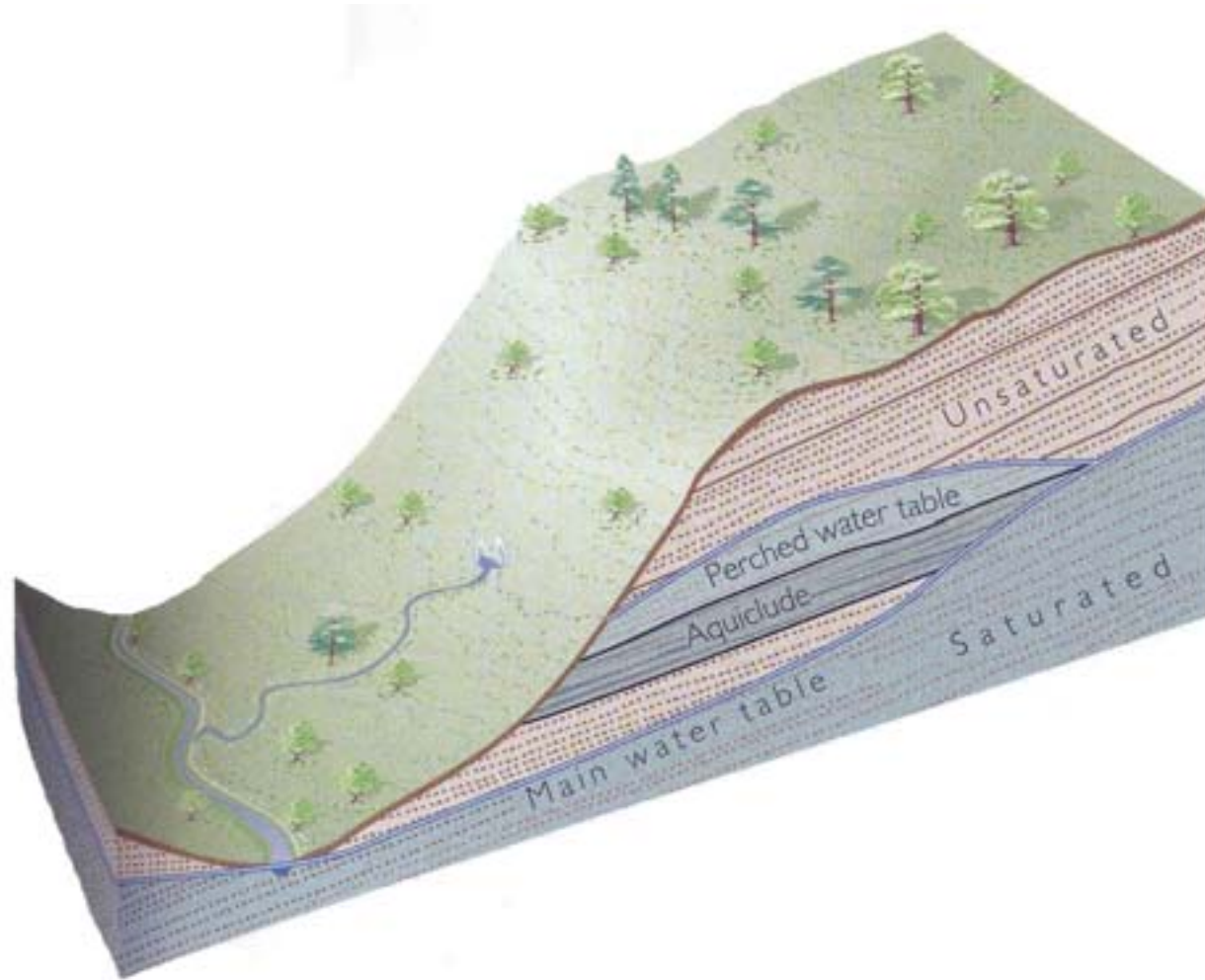


Figure 7.8 Typical occurrence of groundwater in confined and unconfined aquifers.

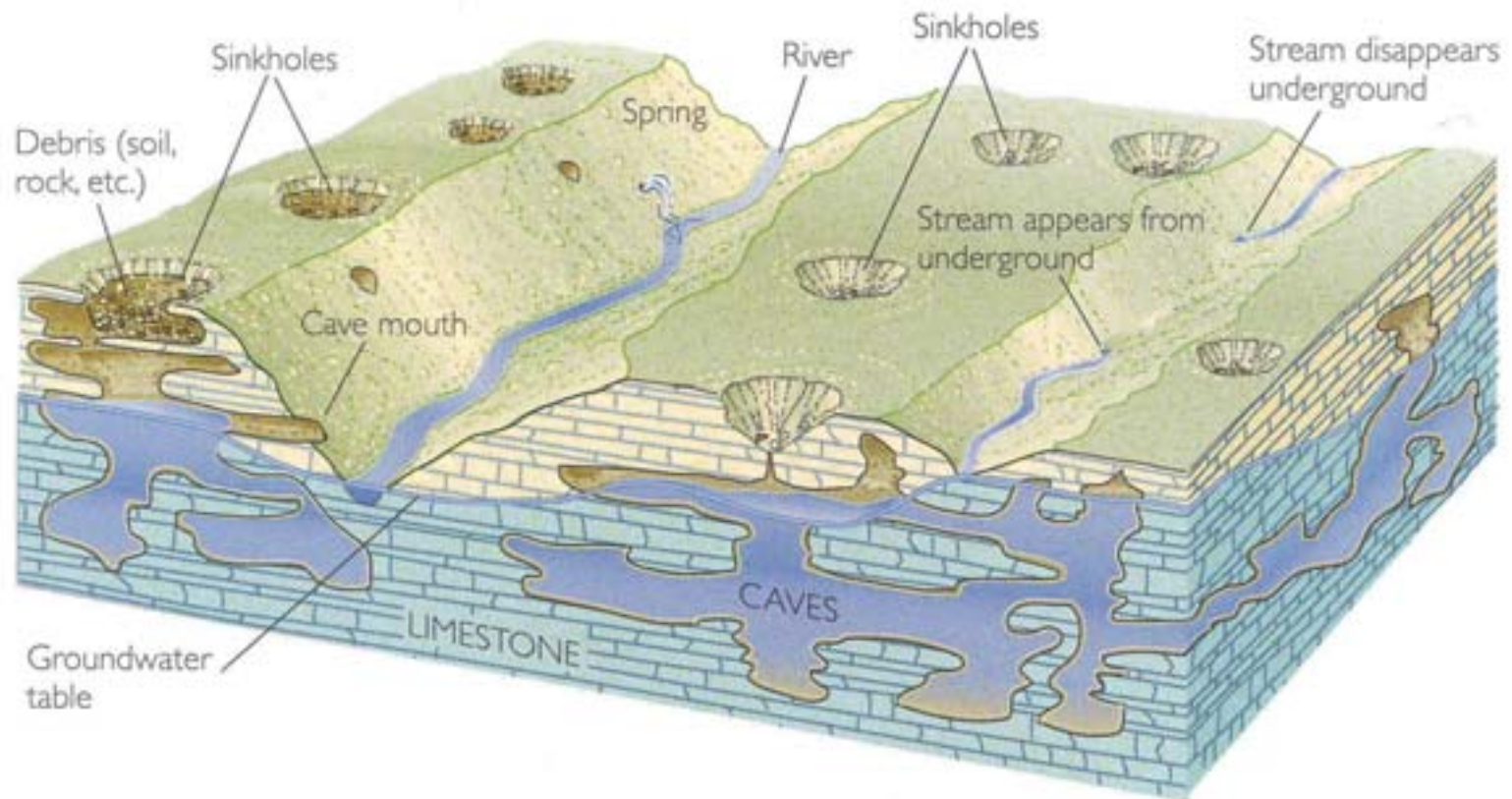
Unidades Hidrogeológicas

Aquífero Suspenso



Unidades Hidrogeológicas

Aquífero Cárstico



Unidades Hidrogeológicas

Aquífero Fraturado

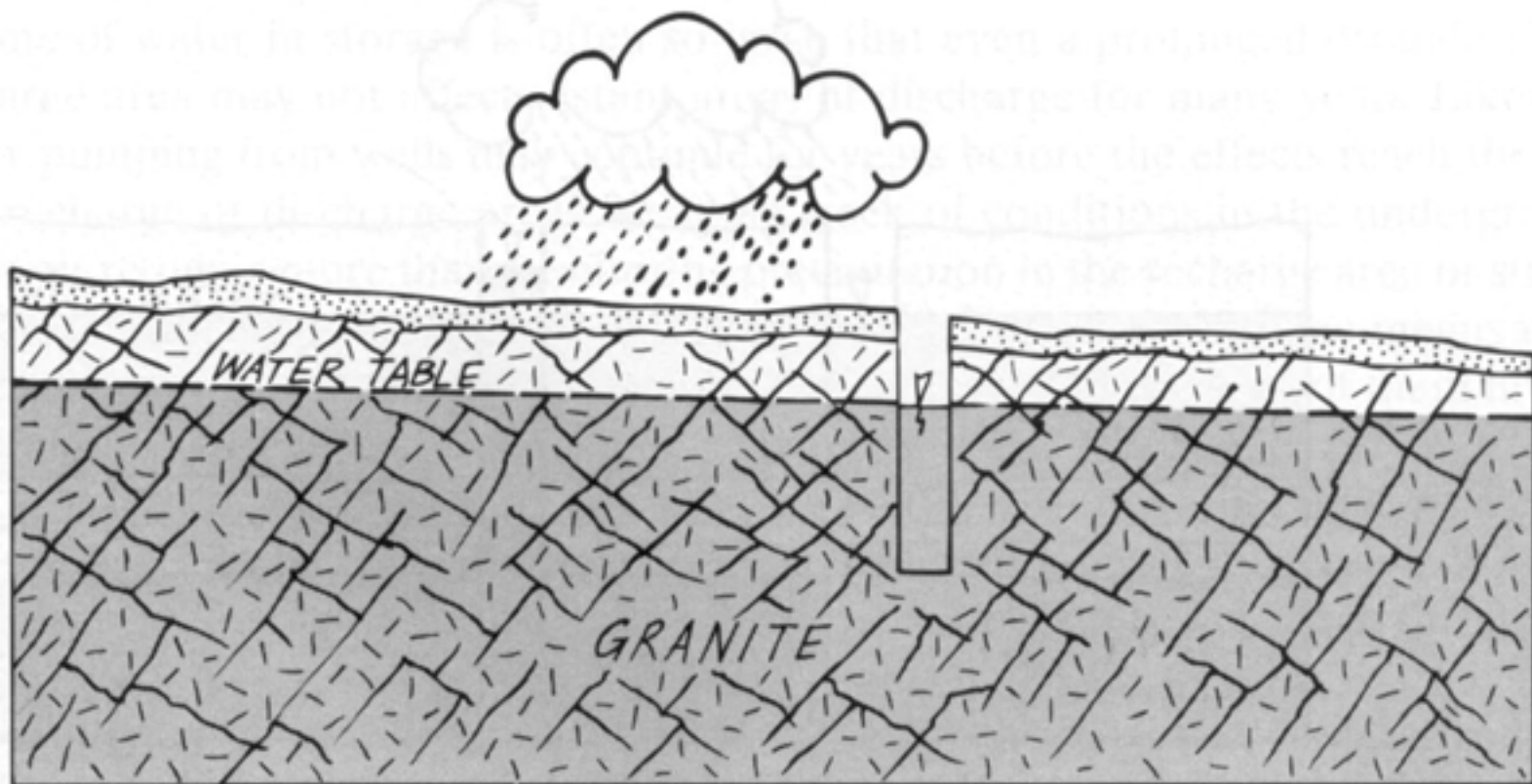


Figure 7.7 Groundwater in fractured granite.

Unidades Hidrogeológicas

Aquífero Fraturado

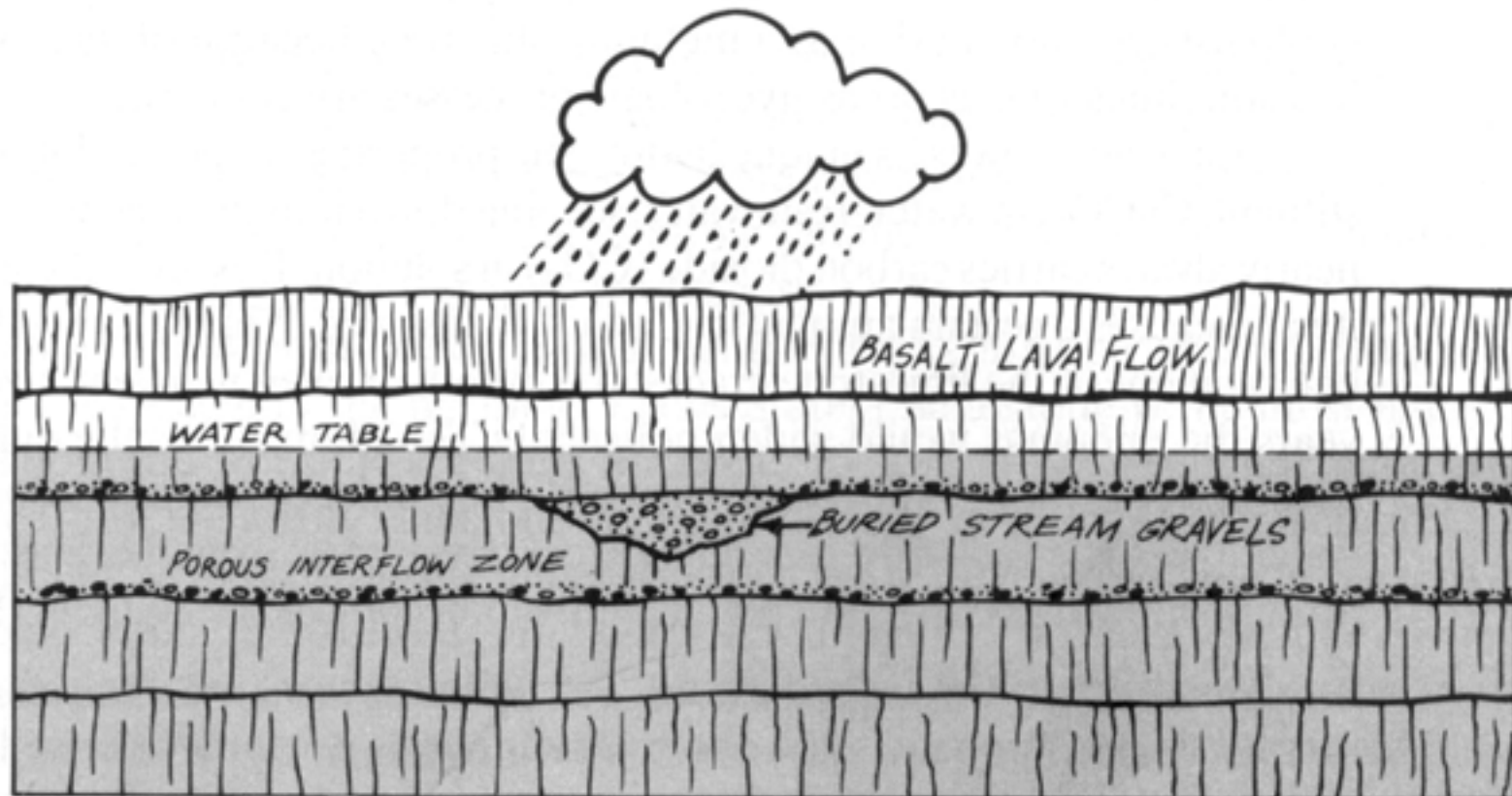
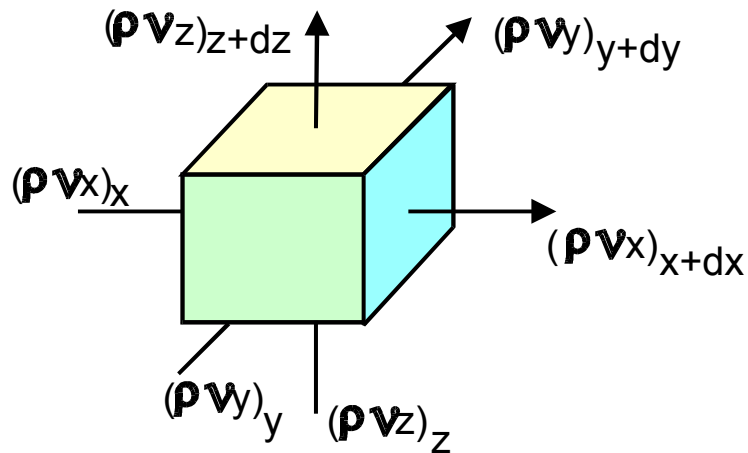


Figure 7.6 Distinctive features of basalt aquifers.

Produtividade e Testes de Aquíferos

EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO



Massa entrando – Massa saindo =
Acumulação de Massa

Equação da continuidade (Conservação da massa)

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \rho S_s \frac{\partial K}{\partial t} = 0$$

Darcy:

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Produtividade e Testes de Aquíferos

EQUAÇÃO GERAL DO FLUXO

Substituindo Eq. Darcy na Eq. Conservação da Massa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

desprezados os termos em $\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2$, $\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2$, $\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)^2$ e p/ meio isotrópico: $K_x = K_y = K_z = K$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Fluxo Radial [$h = h(r, t)$]

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Eq. da Difusividade

Produtividade e Testes de Aquíferos

Solução de Theis:

Condição inicial: aquífero em equilíbrio

$$h(r, 0) = h_0$$

Condição de contorno externa: aquífero infinito

$$h(\alpha, t) = h_0$$

Condição de contorno interna: vazão constante no poço (r_0)

$$Q = 2\pi T \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right)_{r_0} \cong 2\pi T \lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right)$$

Solução:

$$h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

onde:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Produtividade e Testes de Aquíferos

Solução de Cooper-Jacob

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \right]$$

Para valores $\downarrow\downarrow$ de r e $\uparrow\uparrow$ de t ($u < 0,01$):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right]$$

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Parâmetros Importantes para Classificação de Aquíferos

- **Condutividade Hidráulica**
- **Espessura Saturada**
- **Dimensões da Unidade Portadora de Água Subterrânea - (UPAS)**

Classificação das águas subterrâneas deve levar em conta:



- Prioridade de uso para abastecimento público (critério preponderante)
- Qualidade química da água : definida pelo TDS ou CE
- Potencialidade hídrica da unidade portadora de água subterrânea (UPAS) : definida por suas características hidráulicas (K, S e espessura saturada)

Roteiro Preliminar de Classificação

1. *Default*: Classe I
2. Critério de uso:
 - a. Classe I: corpo hídrico utilizado para abastecimento público com captações situadas num raio de 1 km na UPAS.
 - b. Classe I, II ou III: corpos de água distantes de 1 km de poços de abastecimento público na UPAS. (consultar tabela de classes).
3. Tabela de classes:

Salinidade (mg/L) - TDS		Potencial produtivo (m ³ /dia)		
		Alto	Médio	Baixo
		> 500	25 a 500	< 25
Doce	< 1000	I	I	II
Salobra	1000 a 3000	I	II	III
Salina	> 3000	II	III	III

Caracterização e Definição de UPAS

UPAS é a porção de aquífero ($K > 10^{-5}$ cm/s) com características hidráulicas e hidroquímicas semelhantes.

Elementos necessários à sua caracterização:

1. parâmetros hidráulicos: K, S, h (espessura saturada).
2. parâmetros hidroestratigráficos: estratigrafia, faciologia, geometria, etc.
3. parâmetros hidroquímicos: TDS, CE e pH .

Regiões de interesse

Definidas pelos órgãos gestores e fiscalizadores competentes.

Critério de Escolha dos Valores Limites de Potencial Produtivo

g/d	m ³ /d	m ³ /h	m ³ /d	# hab abast (250L/hab)
TCEQ				
144000	545,1	22,7	500	2000
5000	18,9	0,8	25	100
150	0,5	0,02	5	20

Solução de Theis

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Condição inicial: aquífero em equilíbrio

$$h(r, 0) = h_0$$

Condição de contorno externa: aquífero infinito

$$h(\alpha, t) = h_0$$

Condição de contorno interna: vazão constante no poço (r_0)

Solução:

$$h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

onde:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Solução de Cooper-Jacob

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \right]$$

Para valores $\downarrow\downarrow$ de r e $\uparrow\uparrow$ de t ($u < 0,01$):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[-0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right]$$

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Aplicação da Equação da Função Poço (Cooper-Jacob)

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Confinado

$$\begin{aligned} \text{Raio (')} &= 6 \\ \text{Raio (m)} &= 0,15 \\ S &= 1 \times 10^{-4} \\ T \text{ (d)} &= 1 \end{aligned}$$

$$Q = \frac{5,46(s)(K)(b)}{5,98 + \log(Kb)}$$

Não-Confinado

$$\begin{aligned} \text{Raio (')} &= 6 \\ \text{Raio (m)} &= 0,15 \\ S &= 1 \times 10^{-1} \\ T \text{ (d)} &= 1 \end{aligned}$$

$$Q = \frac{5,46(s)(K)(b)}{2,98 + \log(Kb)}$$

Exemplos de Aplicação da Equação da Função Poço (Cooper-Jacob)

Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-04
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-03
Esp. saturada (m)	40
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	20
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-01
Transmis. T (m ² /d)	34,560
Vazão (m ³ /d)	501,62
Vazão (m ³ /h)	20,90

Classe 1

Não-Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-01
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-03
Esp. saturada (m)	40
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	20
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-01
Transmis. T (m ² /d)	34,560
Vazão (m ³ /d)	834,19
Vazão (m ³ /h)	34,76

Classe 1

Exemplos de Aplicação da Equação da Função Poço (Cooper-Jacob)

Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-04
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-04
Esp. saturada (m)	40
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	20
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-02
Transmis. T (m ² /d)	3,456
Vazão (m ³ /d)	57,85
Vazão (m ³ /h)	2,41

Classe 2

Não-Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-01
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-04
Esp. saturada (m)	40
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	20
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-02
Transmis. T (m ² /d)	3,456
Vazão (m ³ /d)	107,09
Vazão (m ³ /h)	4,46

Classe 2

Exemplos de Aplicação da Equação da Função Poço (Cooper-Jacob)

Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-04
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-04
Esp. saturada (m)	20
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	10
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-02
Transmis. T (m ² /d)	1,728
Vazão (m ³ /d)	15,16
Vazão (m ³ /h)	0,63

Classe 3

Não-Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-01
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-04
Esp. saturada (m)	20
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	10
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-02
Transmis. T (m ² /d)	1,728
Vazão (m ³ /d)	29,27
Vazão (m ³ /h)	1,22

Classe 2

Exemplos de Aplicação da Equação da Função Poço (Cooper-Jacob)

Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-04
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-05
Esp. saturada (m)	40
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	20
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-03
Transmis. T (m ² /d)	0,346
Vazão (m ³ /d)	6,83
Vazão (m ³ /h)	0,28

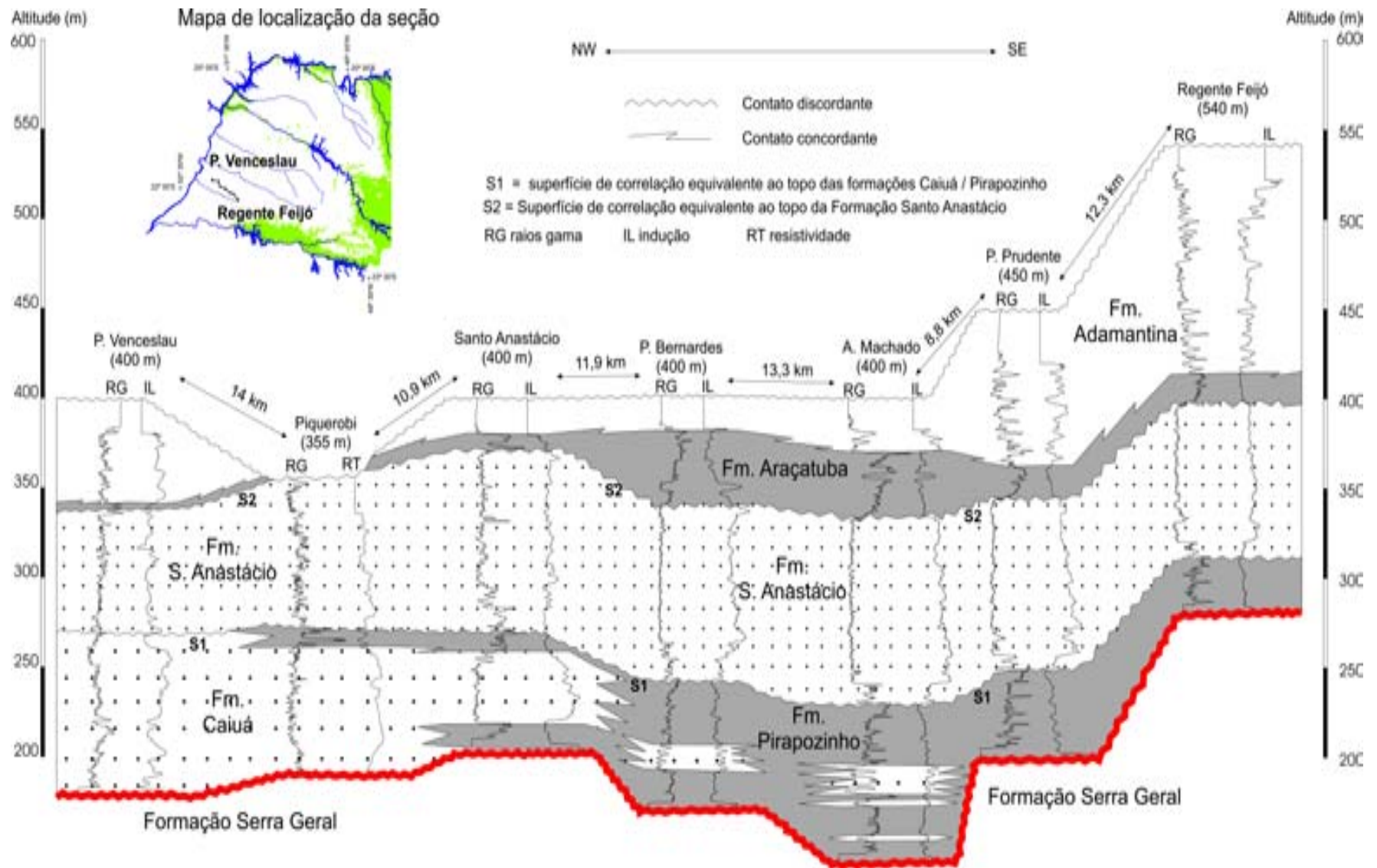
Classe 3

Não-Confinado

Caso	
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-01
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-05
Esp. saturada (m)	40
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	20
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-03
Transmis. T (m ² /d)	0,346
Vazão (m ³ /d)	14,95
Vazão (m ³ /h)	0,62

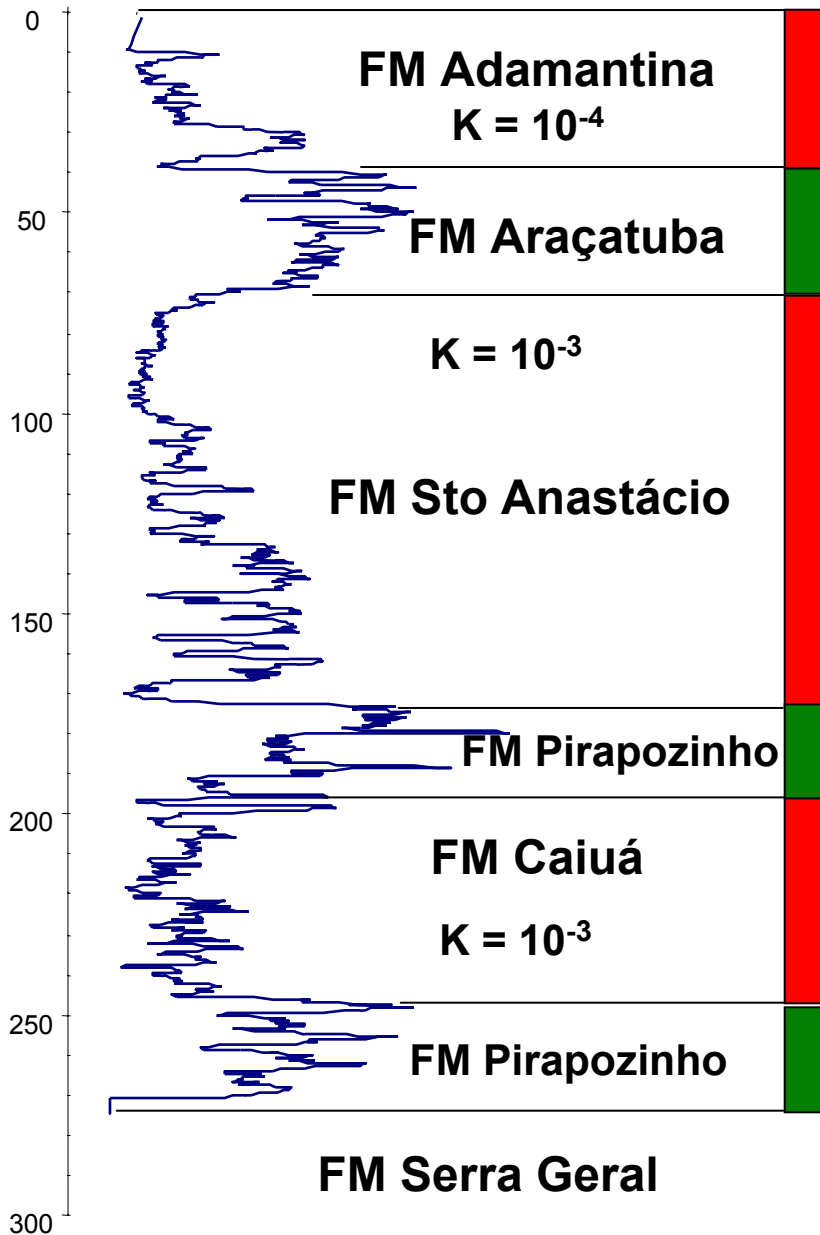
Classe 3

Sistema Aquífero Bauru - Bacia do Paraná



GRUPO BAURU – Região sudoeste de São Paulo

RG API



← NE = 10 m - livre

Caso	1
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,5E-01
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-04
Esp. saturada (m)	30
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	15
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-02
Transmis. T (m ² /d)	2,592
Vazão (m ³ /d)	65,86
Vazão (m ³ /h)	2,74

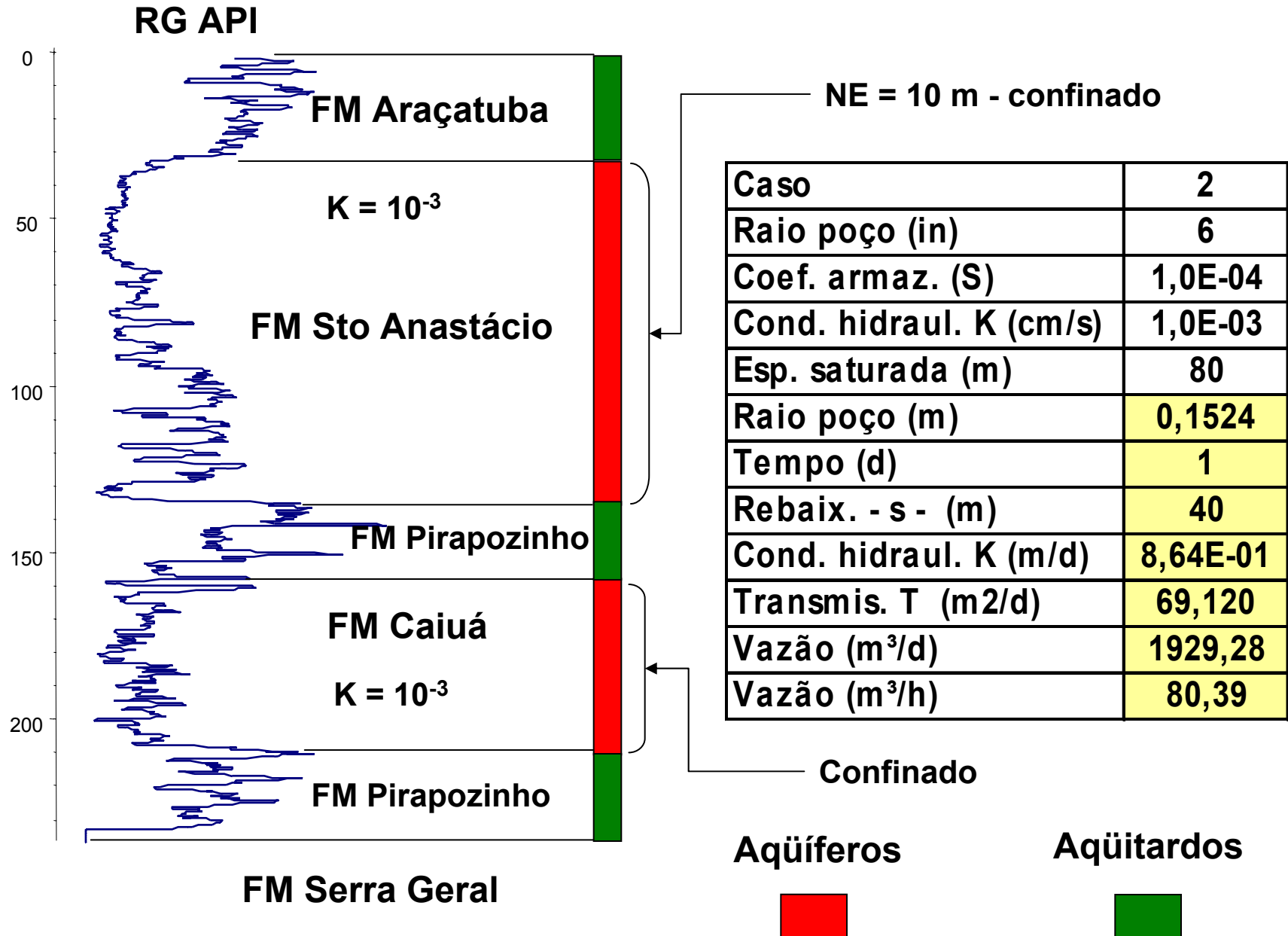
Confinado

Aqüíferos

Aqüitardos

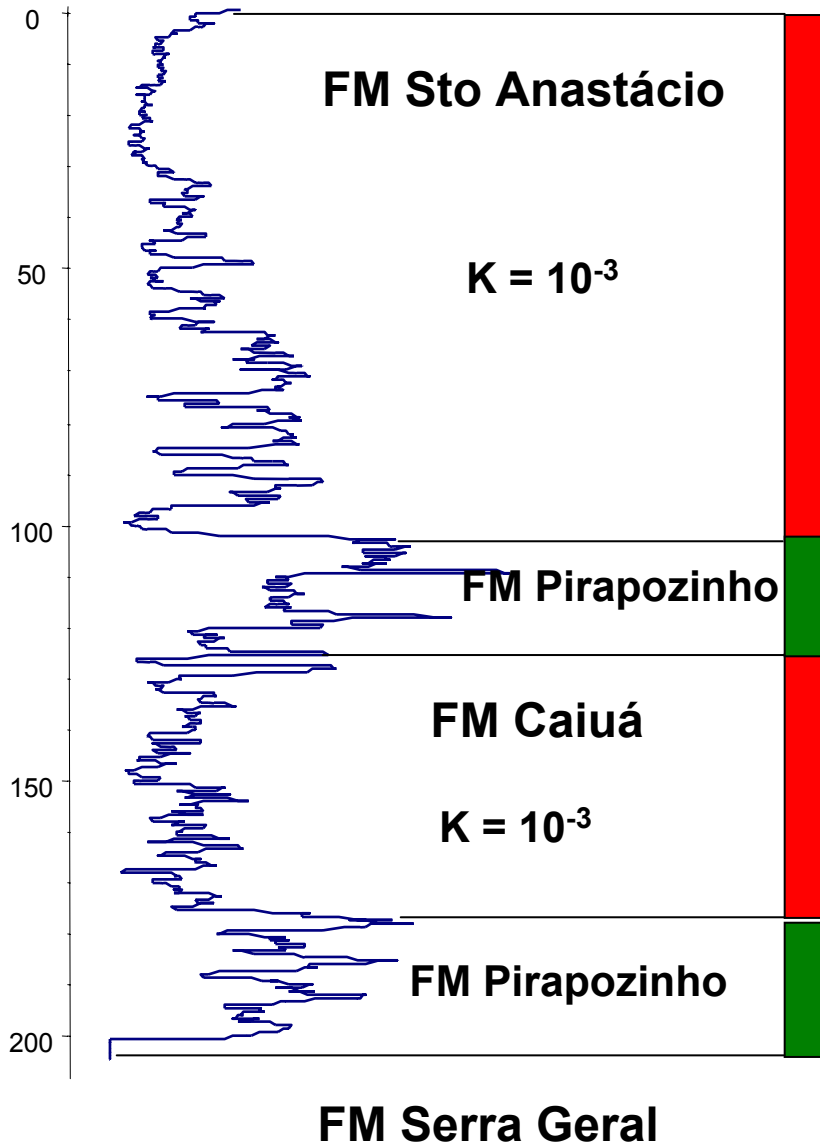


GRUPO BAURU – Região sudoeste de São Paulo



GRUPO BAURU – Região sudoeste de São Paulo

RG API



NE = 40 m - livre

Caso	3
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,5E-01
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-03
Esp. saturada (m)	40
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	20
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-01
Transmis. T (m ² /d)	34,560
Vazão (m ³ /d)	867,97
Vazão (m ³ /h)	36,17

Confinado

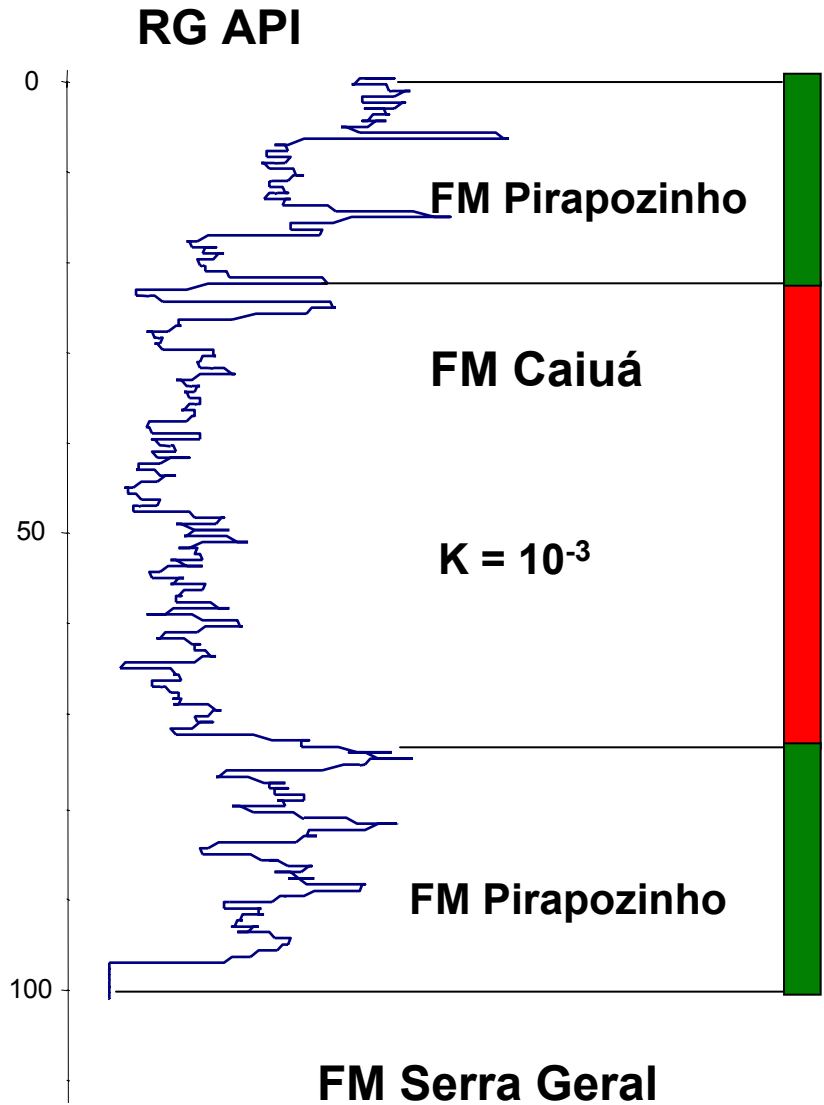
Aqüíferos



Aqüitardos



GRUPO BAURU – Região sudoeste de São Paulo



NE = 10 m - confinado

Caso	4
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,0E-04
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-03
Esp. saturada (m)	50
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (d)	1
Rebaix. - s - (m)	25
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-01
Transmis. T (m ² /d)	43,200
Vazão (m ³ /d)	773,81
Vazão (m ³ /h)	32,24

Aqüíferos

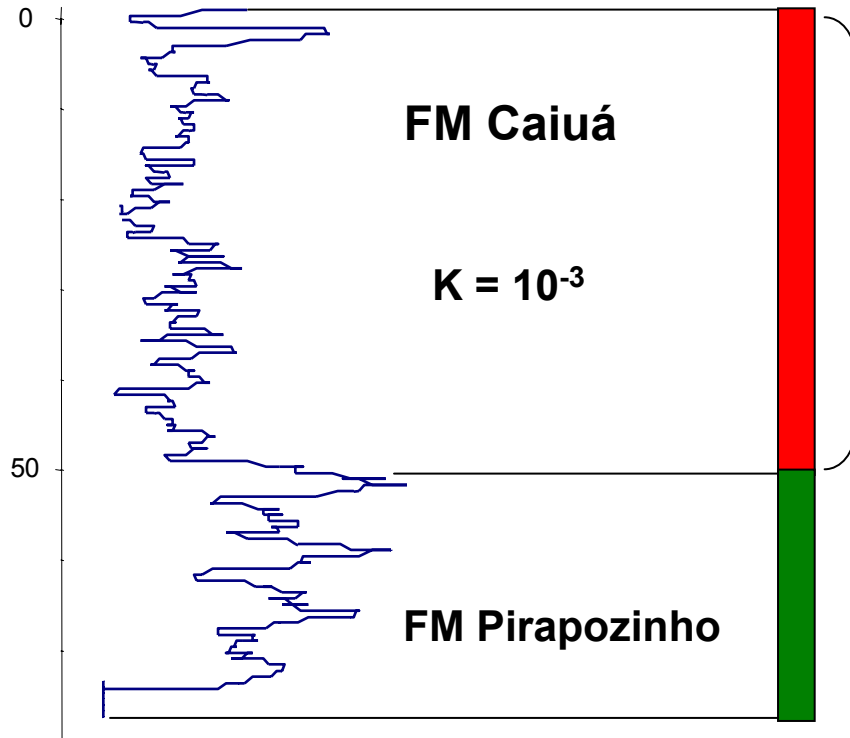


Aqüitardos



GRUPO BAURU – Região sudoeste de São Paulo

RG API



NE = 15 m - livre

Caso	5
Raio poço (in)	6
Coef. armazen. (S)	1,5E-01
Cond. hidrául. K (cm/s)	1,0E-03
Esp. saturada (m)	35
Raio poço (m)	0,1524
Tempo (t)	1
Rebaix. - s - (m)	17,5
Cond. hidrául. K (m/d)	8,64E-01
Transmis. T (m²/d)	30,240
Vazão (m³/d)	673,52
Vazão (m³/d)	28,06

FM Serra Geral

Aqüíferos



Aqüitardos

