



**PHA 3523  
TECNOLOGIAS DE  
REMEDIÇÃO DE ÁREAS  
CONTAMINADAS**

**PROFESSORA AMARILIS LUCIA CASTELI FIGUEIREDO GALLARDO**

**PHA**



# **AULA 5**

- **HIDROGEOLOGIA**
- **MÉTODOS GEOFÍSICOS PARA INVESTIGAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS – PROFESSORES CONVIDADOS  
OTÁVIO BRASIL E LAPS - IPT**

# **AGENDA DA AULA DE HOJE: ÁGUA SUBTERRÂNEA E MÉTODOS GEOFÍSICOS**

- **ÁGUA SUBTERRÂNEA**
- **MÉTODOS GEOFÍSICOS**

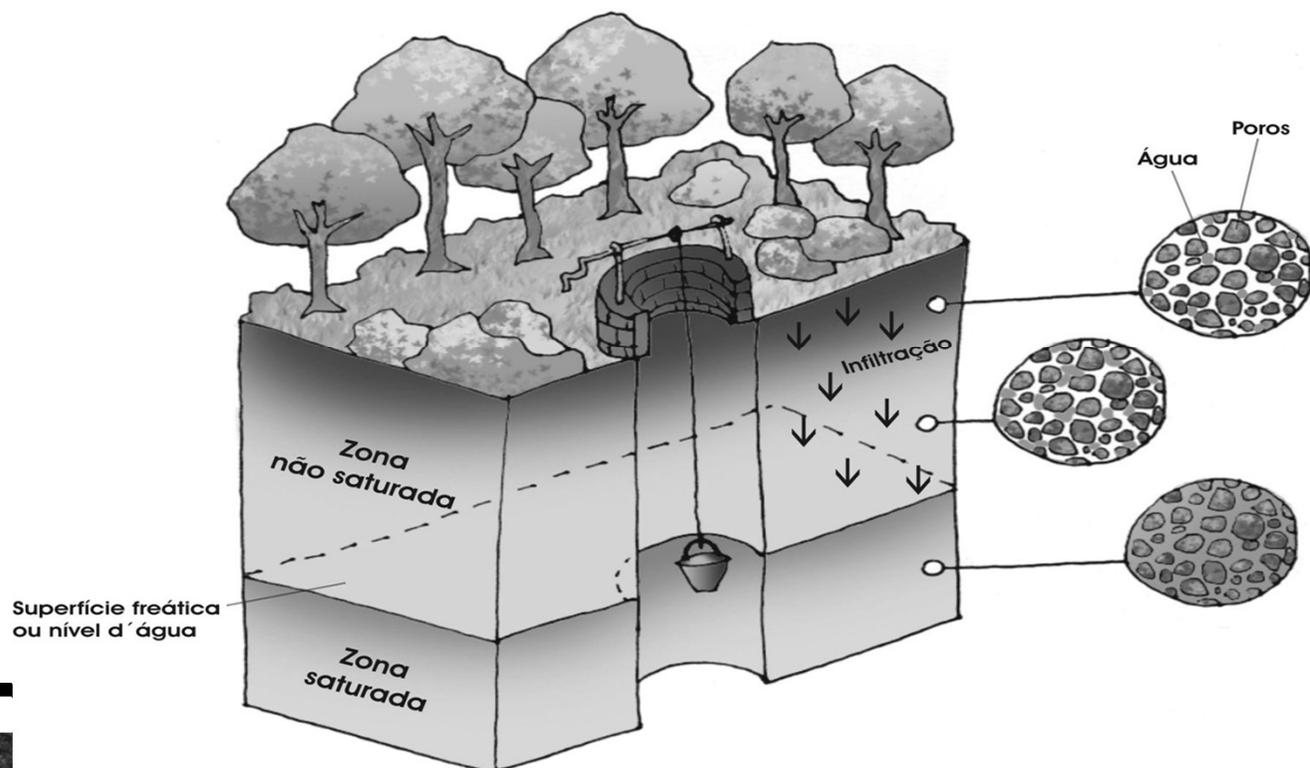
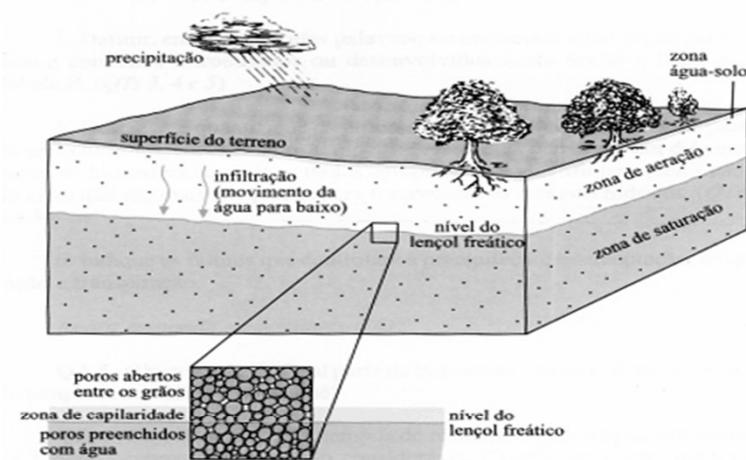
# ÁREAS CONTAMINADAS E ÁGUA SUBTERRÂNEA

- [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=8ZJB\\_1YPXOM](https://www.youtube.com/watch?v=8ZJB_1YPXOM)
- [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=GAZNBt3YLCS](https://www.youtube.com/watch?v=GAZNBt3YLCS)

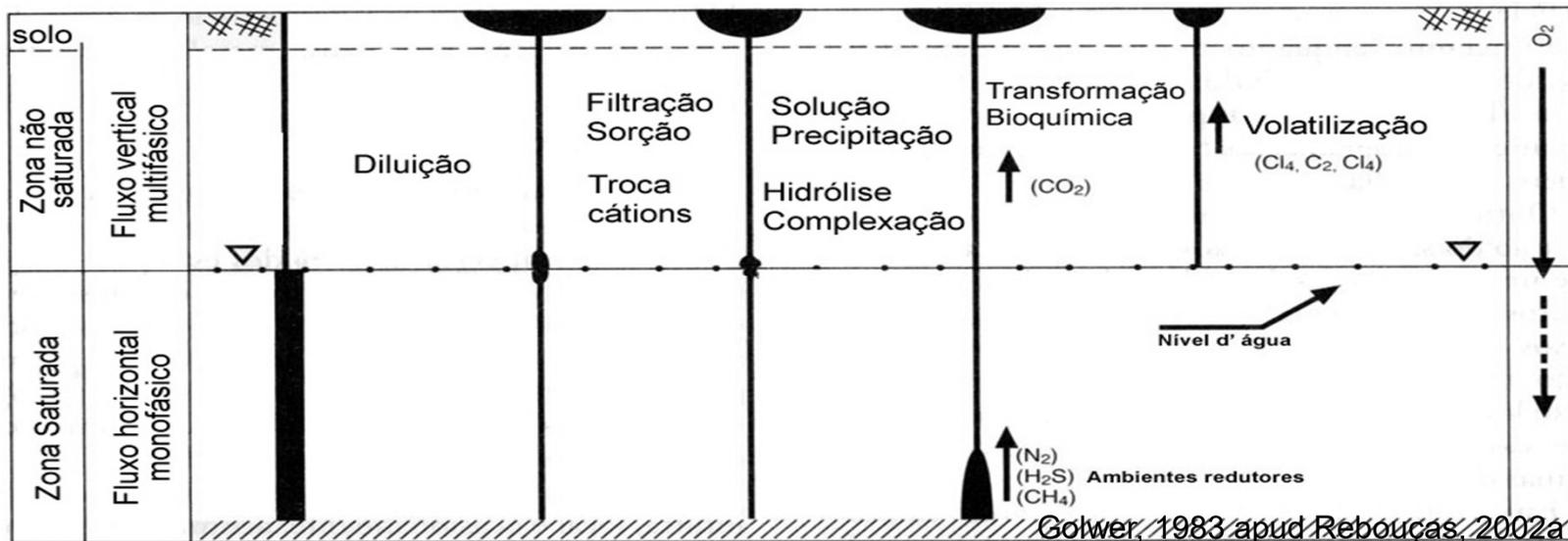
# Constituição da água subterrânea

De acordo com Custodio e Llamas (1976), um dos livros clássicos de hidrologia subterrânea, na água subterrânea natural, a maioria das substâncias dissolvidas encontra-se em estado iônico.

- Os íons mais frequentes são: os ânions – clorato ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e bicarbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e os cátions de sódio ( $\text{Na}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ).
- A partir da composição química da água podem-se destacar dados importantes para o estudo de contaminação desse recurso



**Atenuação natural: processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo**  
 redução da massa ou concentração de contaminantes na água subterrânea em função do tempo e distância da fonte de contaminação devido a processos naturais.



Sorção: habilidade do solo, pelas suas características, em reter substâncias

Volatilização: passagem para a fase gasosa

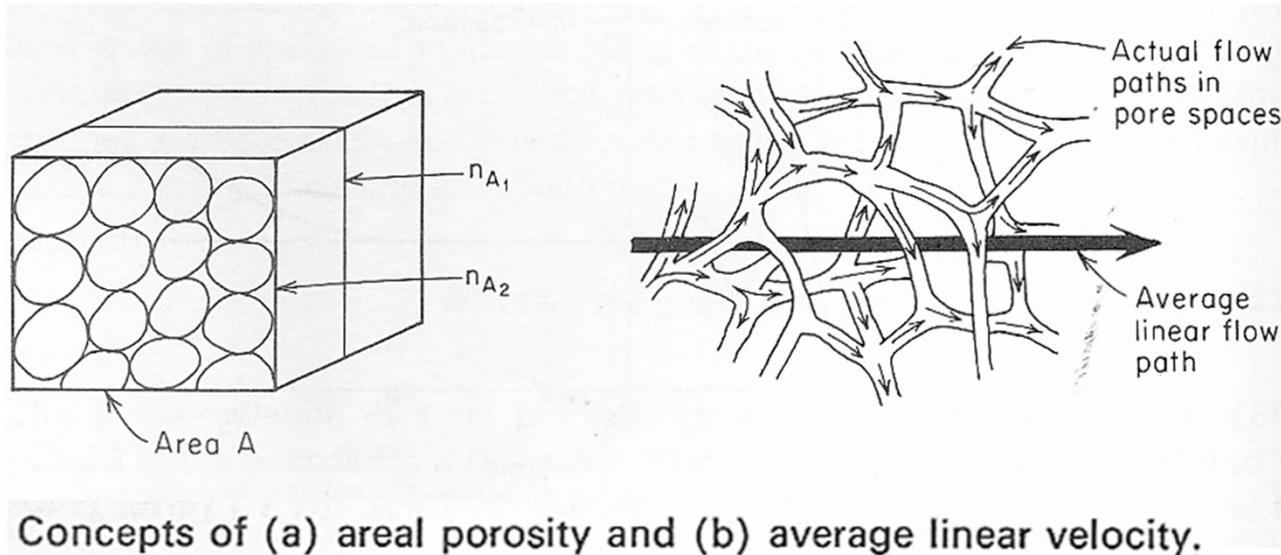
Complexação: uma reação de complexação é uma reação entre um íon metálico, M, e um ligante, L, resultando na formação de um complexo, ML

**6**

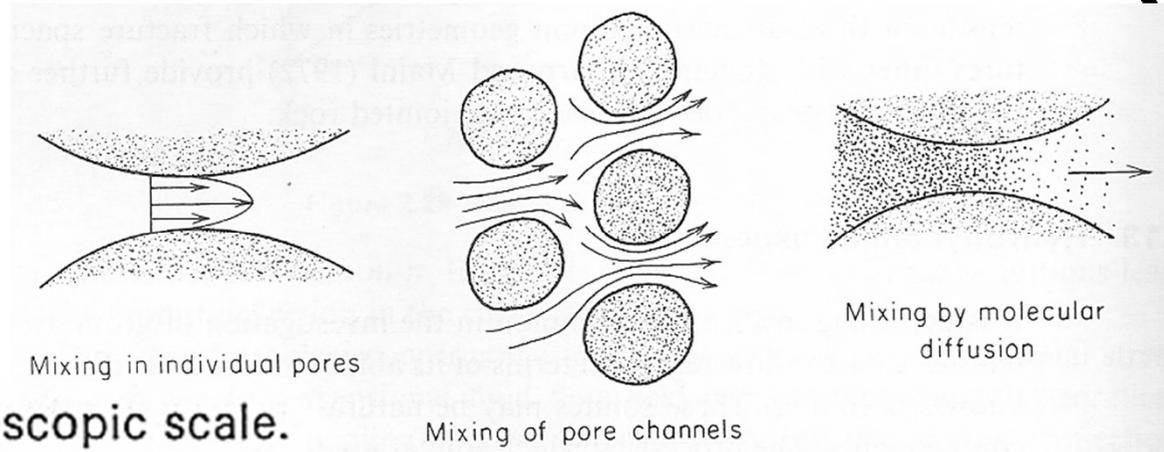
Transformação bioquímica: processos bioquímicos degradativos

Hidrólise: reação da substância com molécula de água

# Mecanismos de transporte

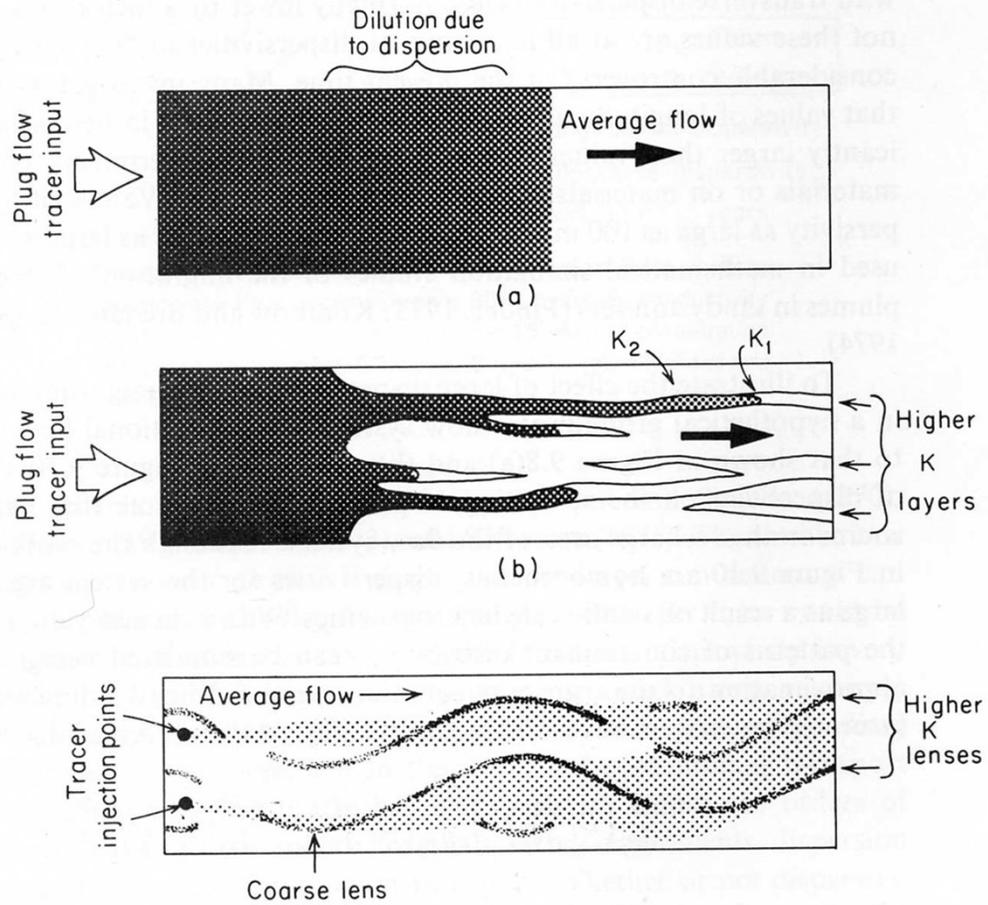


Concepts of (a) areal porosity and (b) average linear velocity.



Processes of dispersion on a microscopic scale.

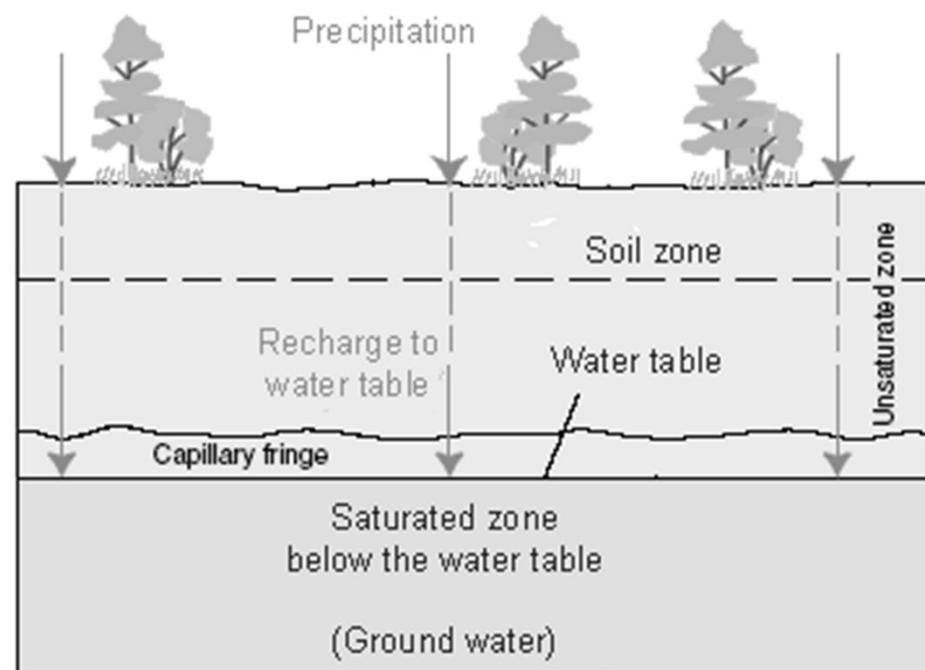
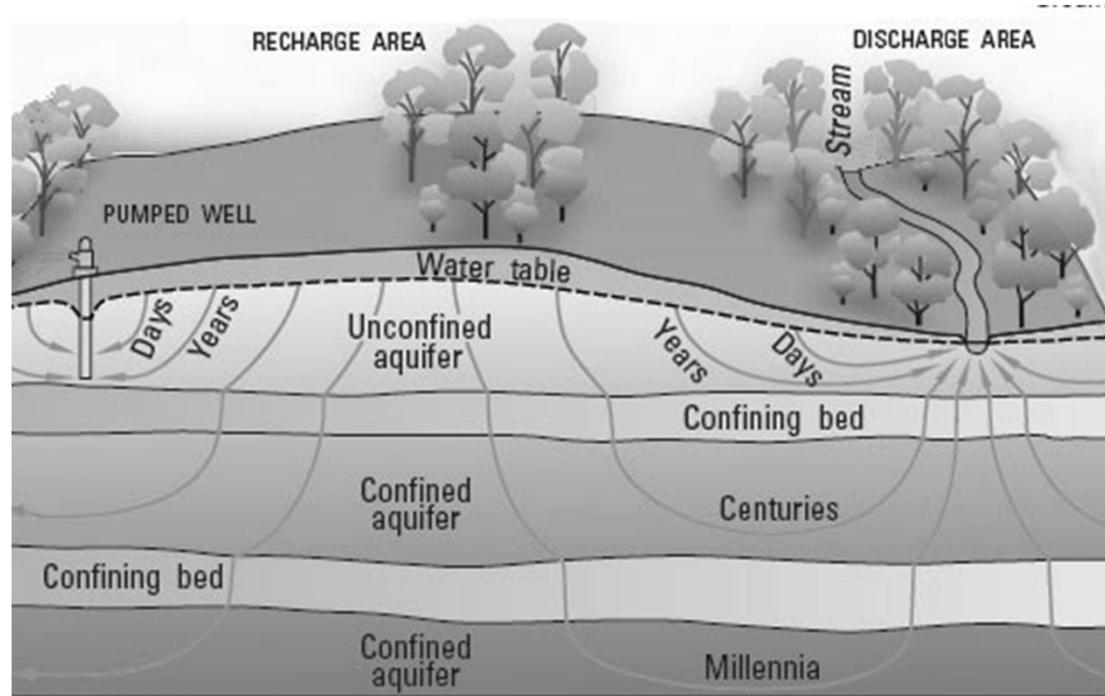
## Dispersão em escala macroscópica



Aquifero homogêneo

Aquifero heterogêneo

Fonte: Freeze and Cherry (1979)



# Conceitos importantes

**Porosidade** consiste nos espaços ou poros vazios no interior de solos e rochas. A porosidade, então, é uma propriedade física cuja expressão matemática é definida pela razão entre o volume de poros e o volume total de rocha ou solo.

**Permeabilidade:** nada mais é do que sua capacidade em permitir o fluxo de água por meio dos poros. A permeabilidade depende então do tamanho dos poros e sua interligação.

**Transmissividade:** Quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero.

**Coefficiente de armazenamento:** A capacidade de um aquífero armazenar e transmitir água depende das propriedades da água (densidade, viscosidade e compressibilidade) e das propriedades do meio poroso (porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade).

Tabela 2 – Valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para sedimentos inconsolidados (Fonte: Fetter, 2001).

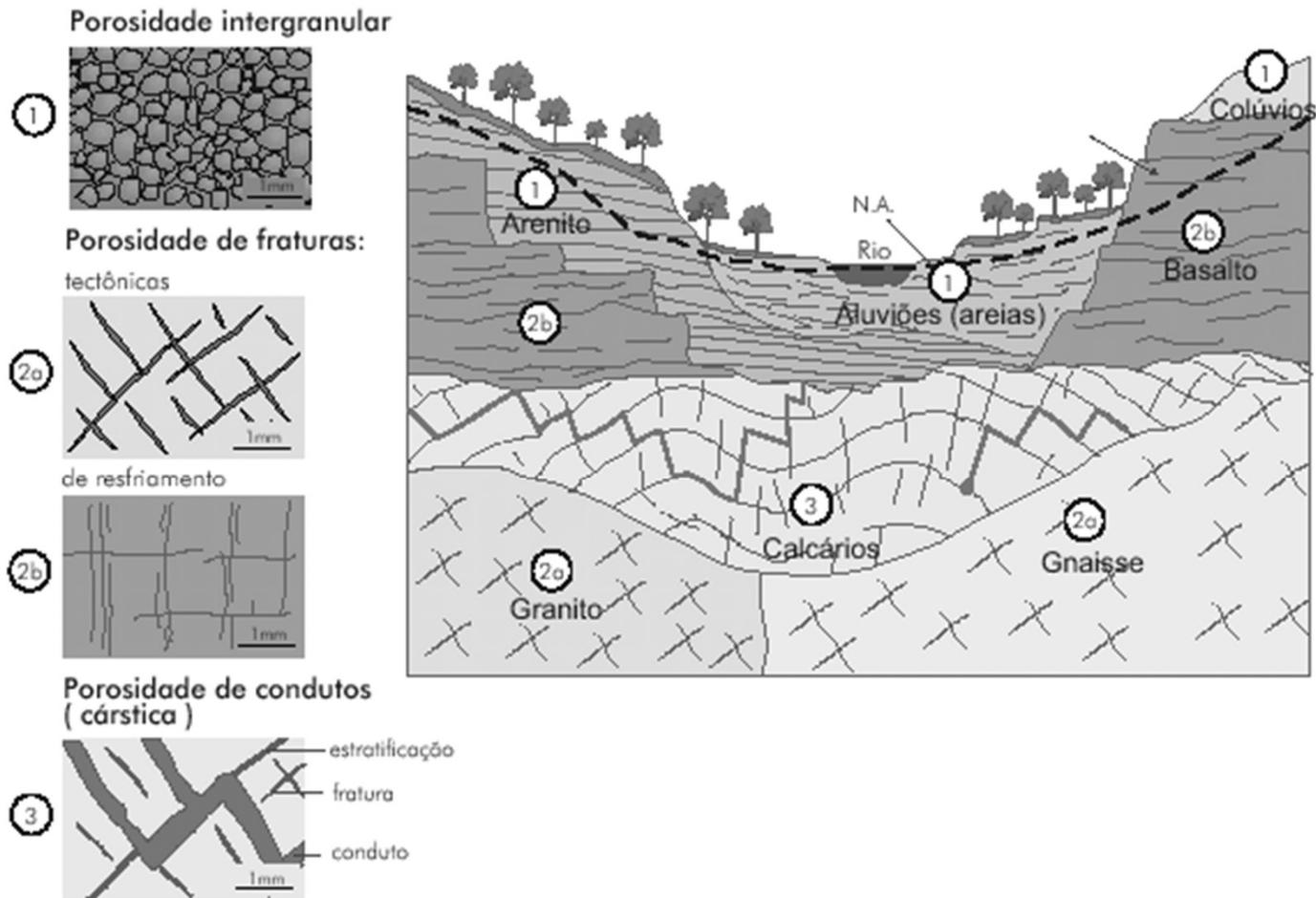
<b>Sedimentos*</b>	<b>Condutividade hidráulica (cm/s)</b>	<b>Permeabilidade intrínseca (<u>darcys</u>)</b>
cascalho bem selecionado	$10^{-2} - 1$	$10 - 10^3$
areia bem selecionada	$10^{-3} - 10^{-1}$	$1 - 10^2$
areia siltosa e areia fina	$10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 1$
<u>silte</u> , <u>silte</u> arenoso, areia argilosa	$10^{-6} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
argila	$10^{-9} - 10^{-6}$	$10^{-6} - 10^{-3}$

# **Tipos de Porosidade**

**Porosidade primária - intergranular**

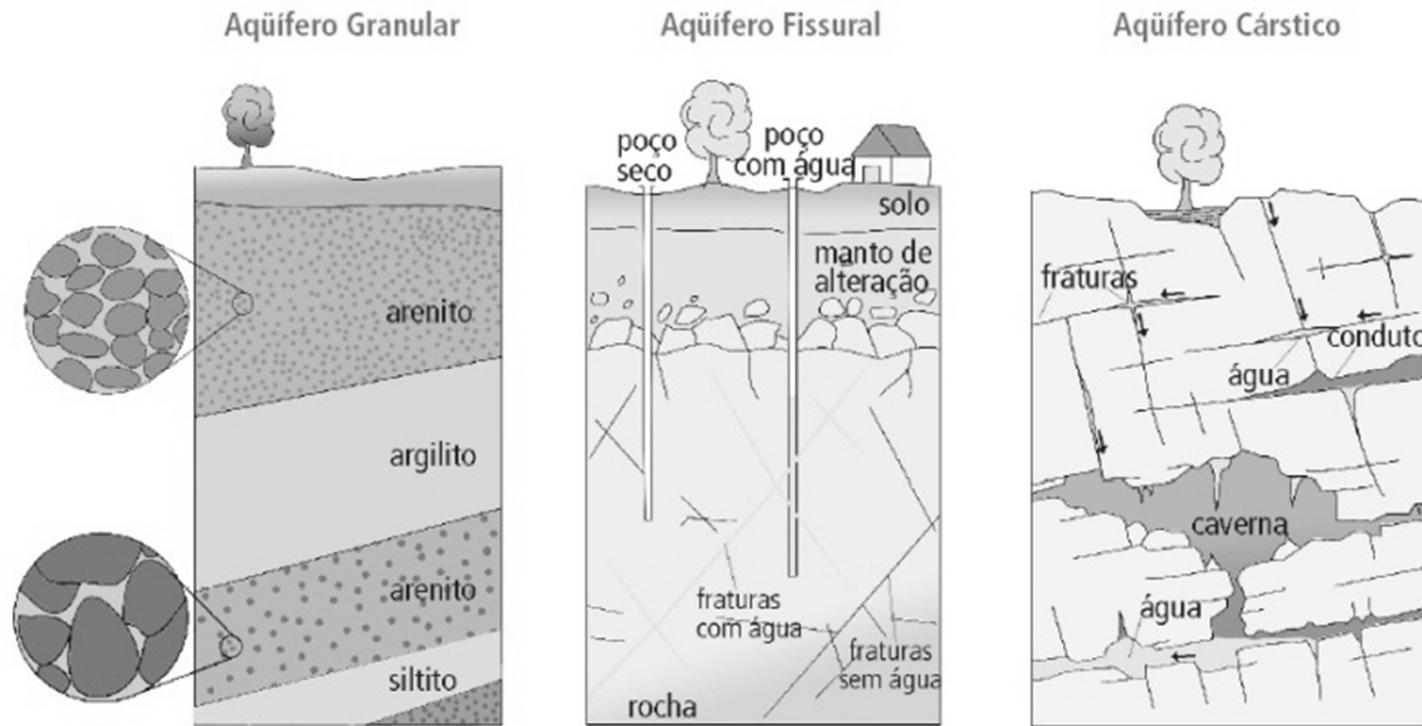
**Porosidade secundária – fraturas  
resfriamento  
condutos**

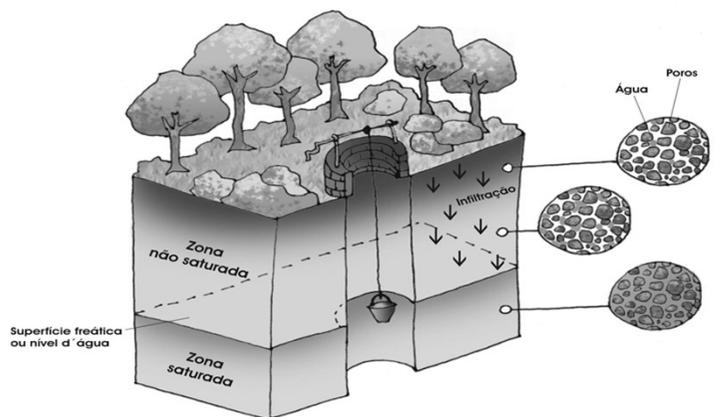
# Tipos de Porosidade



Fonte: Decifrando a Terra / TEIXEIRA, TOLEDO, FAIRCHILD e TAIOLI - São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

## Classificação segundo o tipo de Porosidade





## • Zona de aeração ou não saturada

	Diâmetro efetivo (cm)	Altura de	ascensão capilar (cm)
		(1)	(2)
Cascalho fino	1	1	0,3
Areia grossa	0,2	5	1,5
Areia média	0,05	21	6
Areia fina	0,025	42	12
Areia muito fina	0,010	105	31
Silte	0,005	210	31

- Forças de retenção de água no solo: atração elétrica, capilar e gravitacional;

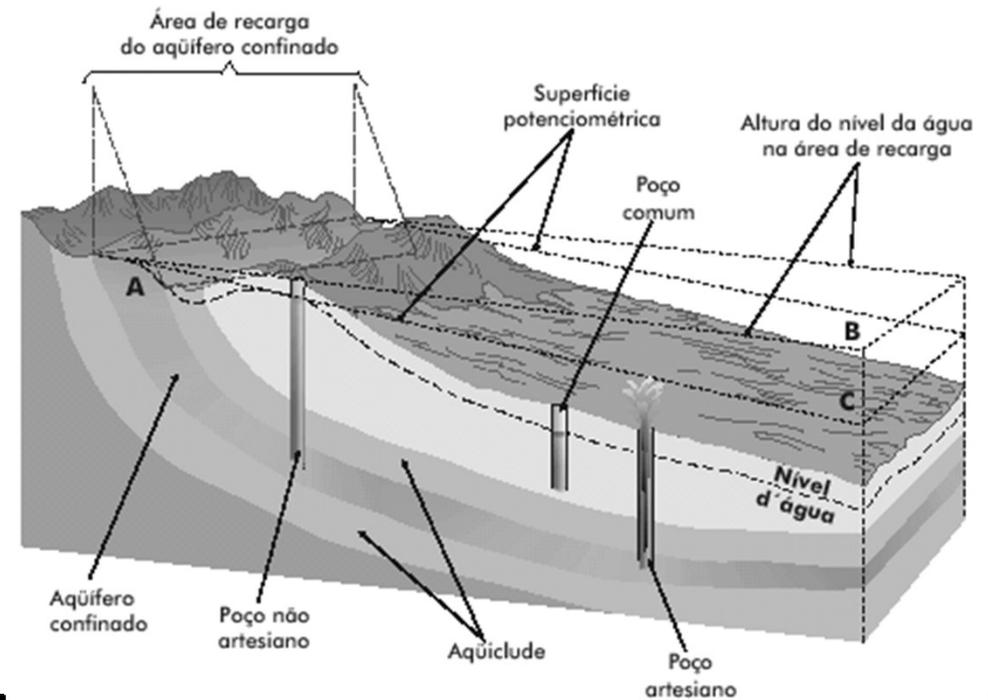
- **Zona saturada**

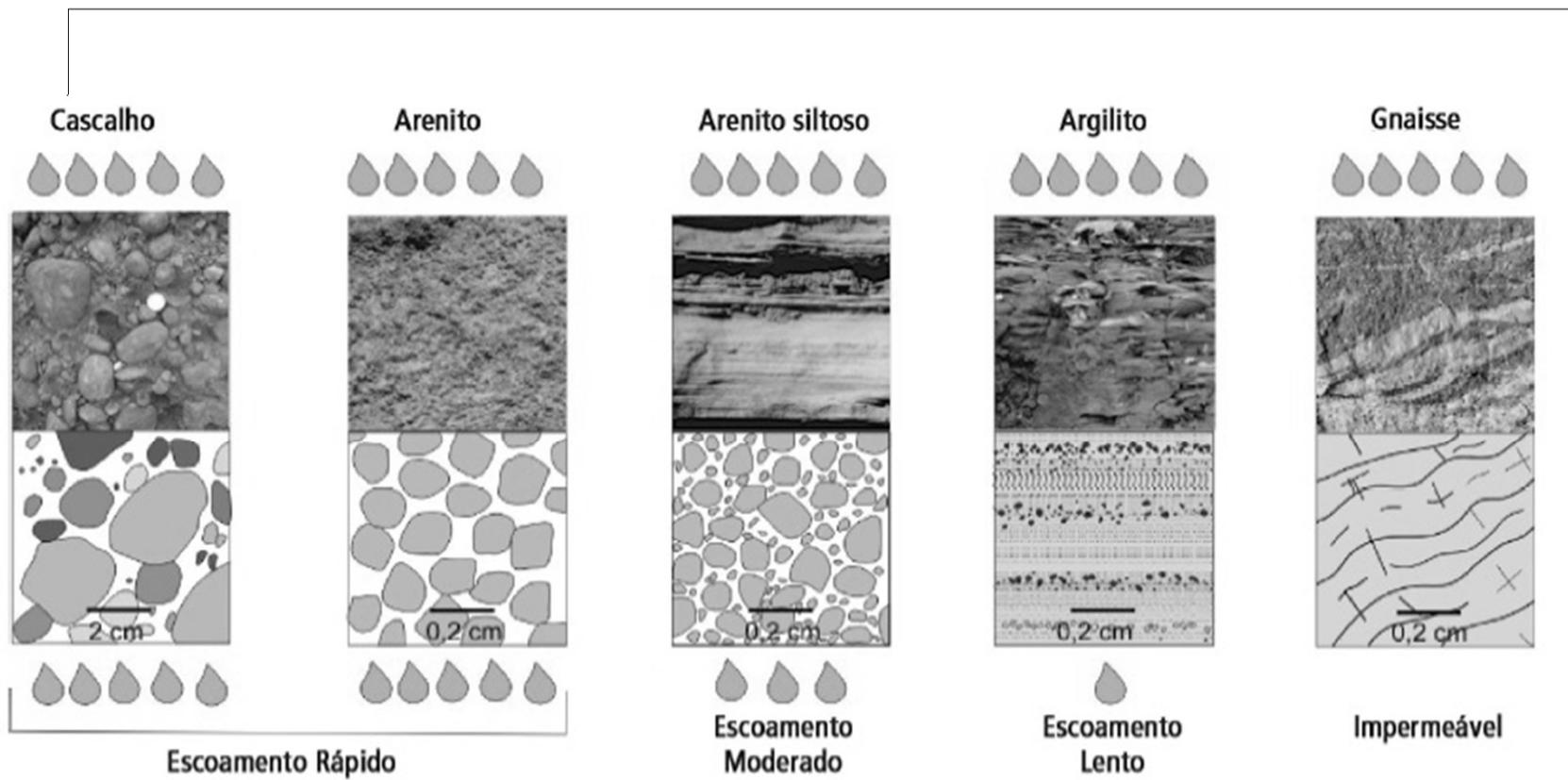
- **AQÜÍFERO** – formação geológica que contém água e que permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais

- **AQÜICLUDE** – formação que pode conter água, mas não transmite em condições naturais;

- **AQÜITARDO** – formação semi-permeável, delimitada no topo e na base por camadas de permeabilidade muito maior. Ocorre filtração vertical ou drenança.

- **AQÜÍFUGO** – formação impermeável que não armazena e não transmite água.





Fontes: (\*) Domenico & Schwartz (1998); (\*\*) Fetter (1994).

- **Classificação de aquíferos**

- **Classificação de acordo com a pressão nas superfícies limítrofes:**

- superior (topo) e inferior (base) e pela capacidade de transmissão de água nas respectivas camadas de topo e base.

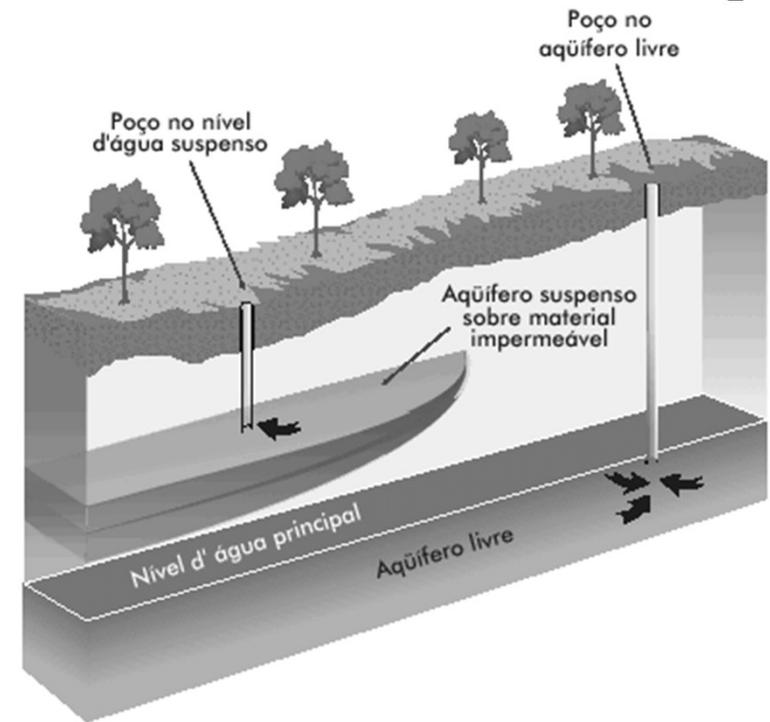
- **LIVRE (freático ou não confinado)** – é aquele cujo limite superior é uma superfície freática, todos os pontos se encontram sob a pressão atmosférica. Também podem ser *drenante* e *não drenante*.

- **CONFINADO** – a pressão da água no topo é maior do que a pressão atmosférica. Pode ser *confinado drenante* e *confinado não drenante*.

- ✓ *Confinado não drenante* – aquífero cujas camadas de topo e base são impermeáveis.

- ✓ *Confinado drenante* – aquífero em que pelo menos uma das camadas é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos pelo topo e/ou base, por *drenança ascendente* ou *descendente*.

- **SUSPENSO** – caso especial de aquífero livre, formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável, de extensão limitada e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno.



## Porosidade de sedimentos e rochas

Sedimentos(*)	Diâmetro da partícula (mm)	Porosidade total dos sedimentos (%)	Rochas Sedimentares (**)	Porosidade total das rochas (%)
Cascalho	> 2,0	24 – 38	Arenito	5 – 30
Areia grossa	0,2 – 2,0	31 – 46	Siltito	21 – 41
Areia fina	0,02 – 0,2	26 – 53	Calcário/Dolomito	0 – 40
Silte	0,002 – 0,02	34 – 61	Calcário cárstico	0 – 40
Argila	< 0,002	34 – 60	Folhelho	0 – 10

Fontes: (\*) Domenico & Schwartz (1998); (\*\*) Fetter (1994).

### Porosidade total

#### Porosidade efetiva + retenção específica

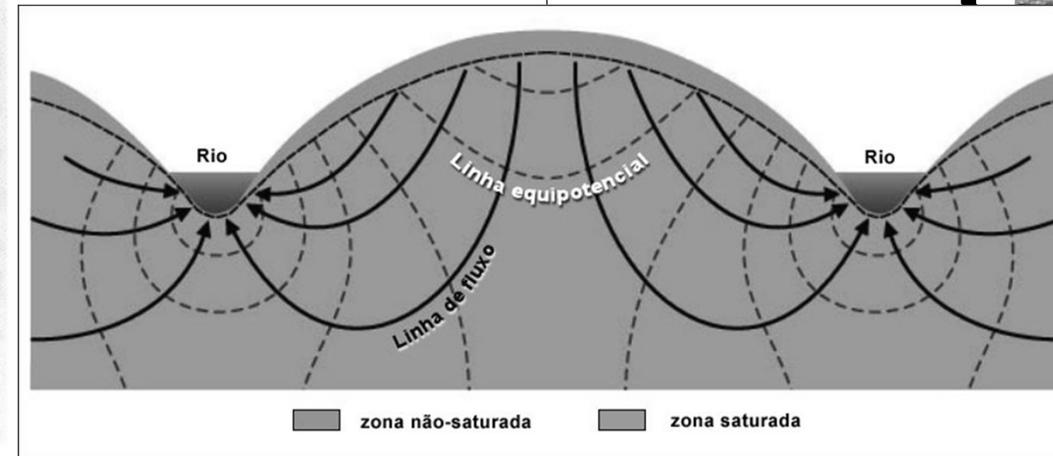
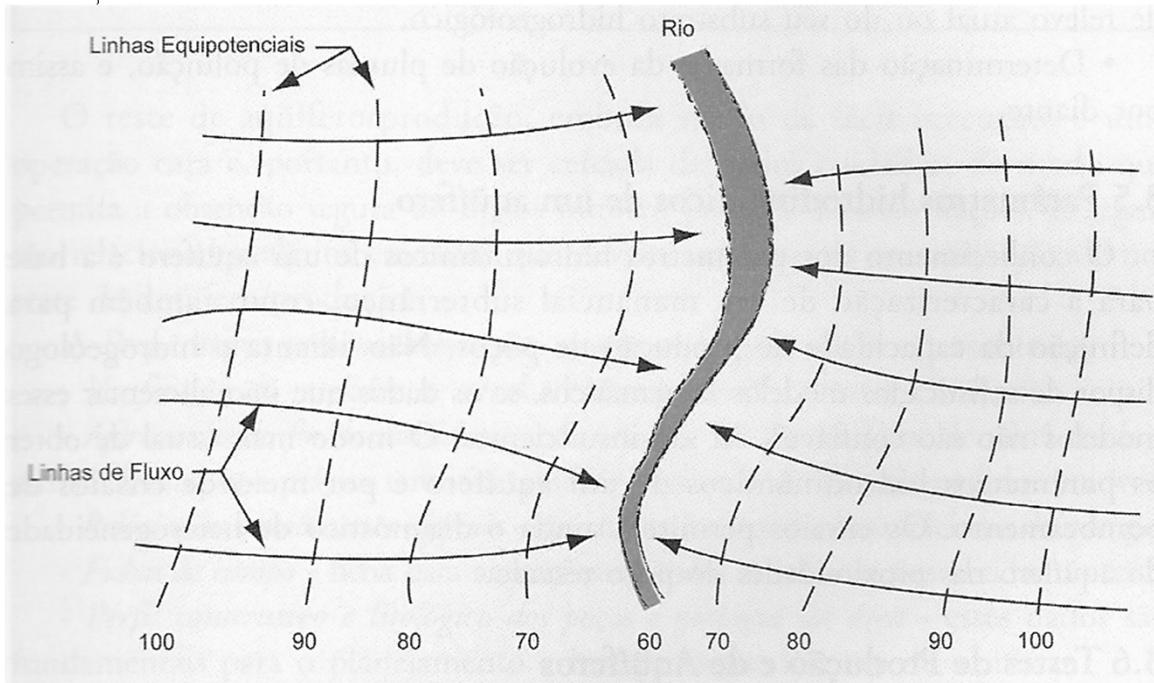
Retenção específica – quantidade de água retida por unidade de volume do material

## Movimentação da água subterrânea

<b>Material</b>	<b>Porosidade (%)</b>	<b>Permeabilidade (cm/s)</b>
<b>Solos</b>	<b>50-60</b>	
<b>Argila</b>	<b>45-55</b>	<b><math>10^{-9}</math> - <math>10^{-6}</math></b>
<b>Silte</b>	<b>40-50</b>	<b><math>10^{-6}</math> - <math>10^{-4}</math></b>
<b>Mistura de areia média e grossa</b>	<b>35-40</b>	
<b>Areia uniforme</b>	<b>30-40</b>	
<b>Mistura de areia fina e média</b>	<b>30-35</b>	<b><math>10^{-5}</math> - <math>10^{-3}</math></b>
<b>Pedregulho</b>	<b>30-40</b>	<b><math>10^{-3}</math> - <math>10^{-1}</math></b>
<b>Pedregulho e areia</b>	<b>20-35</b>	<b><math>10^{-2}</math> - 1</b>
<b>Arenito</b>	<b>10-20</b>	
<b>Folhelho</b>	<b>1-10</b>	
<b>Calcário</b>	<b>1-10</b>	

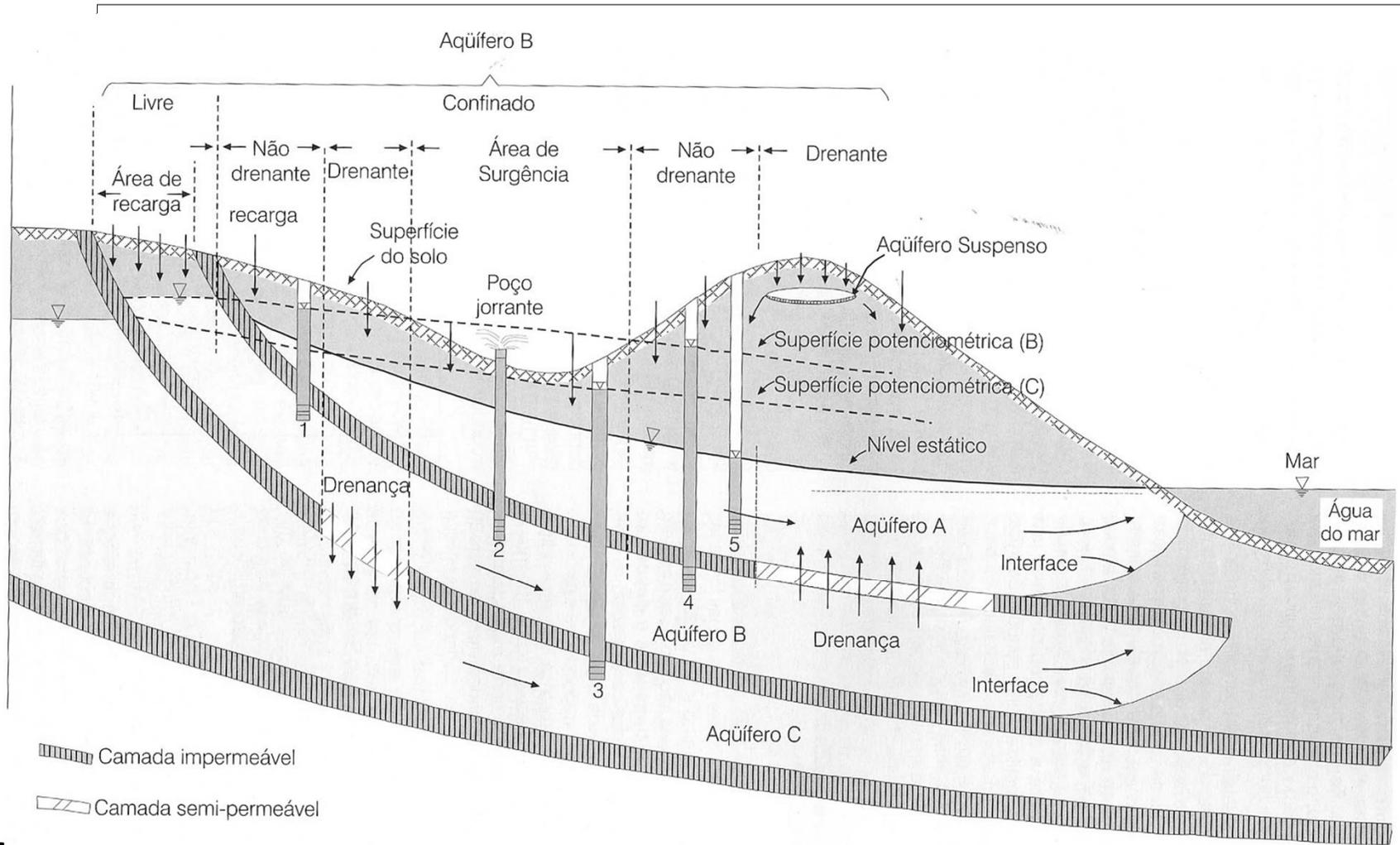
<b>Material</b>	<b>Permeabilidade intrínseca (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Condutividade hidráulica (cm/s)</b>
<b>Argila</b>	<b>10<sup>-14</sup> – 10<sup>-11</sup></b>	<b>10<sup>-9</sup> – 10<sup>-6</sup></b>
<b>Silte</b>	<b>10<sup>-11</sup> – 10<sup>-9</sup></b>	<b>10<sup>-6</sup> – 10<sup>-4</sup></b>
<b>Areia argilosa</b>	<b>10<sup>-11</sup> – 10<sup>-9</sup></b>	<b>10<sup>-6</sup> – 10<sup>-4</sup></b>
<b>Areia siltosa; areia fina</b>	<b>10<sup>-10</sup> – 10<sup>-8</sup></b>	<b>10<sup>-5</sup> – 10<sup>-3</sup></b>
<b>Areia bem distribuída</b>	<b>10<sup>-8</sup> – 10<sup>-6</sup></b>	<b>10<sup>-3</sup> – 10<sup>-1</sup></b>
<b>Cascalho bem distribuído</b>	<b>10<sup>-7</sup> – 10<sup>-5</sup></b>	<b>10<sup>-2</sup> – 10<sup>0</sup></b>

## Movimentação da água subterrânea



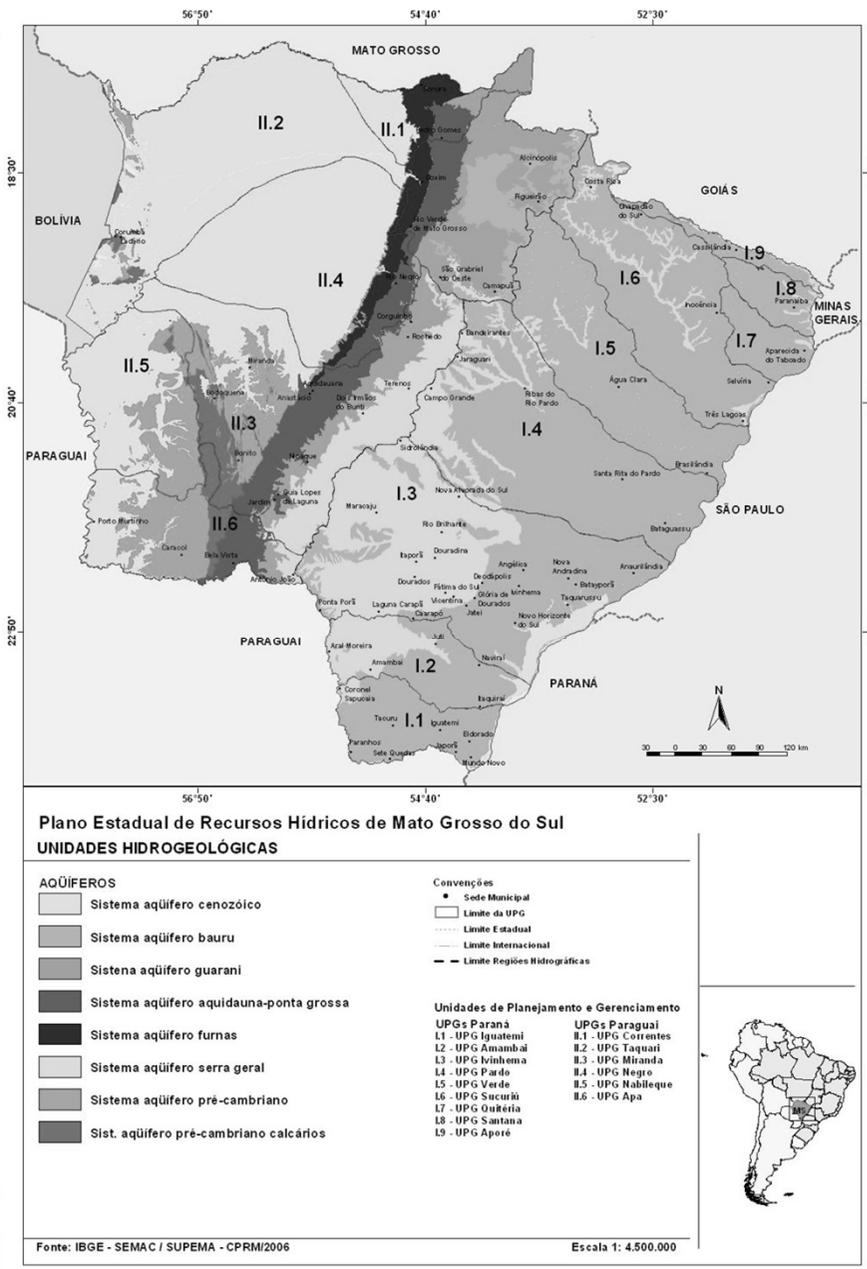
a direção e o sentido do fluxo de água: o fluxo de água, partindo de um potencial maior para outro menor, determina uma **linha de fluxo**, que segue o caminho mais curto entre dois potenciais diferentes, em um traçado perpendicular às **linhas equipotenciais**.

Fonte: Karmann (2009)



Fonte: Feitosa et al.(2008)

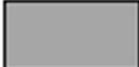
# Mapa hidrogeológico



Fonte: SEMAC, 2010

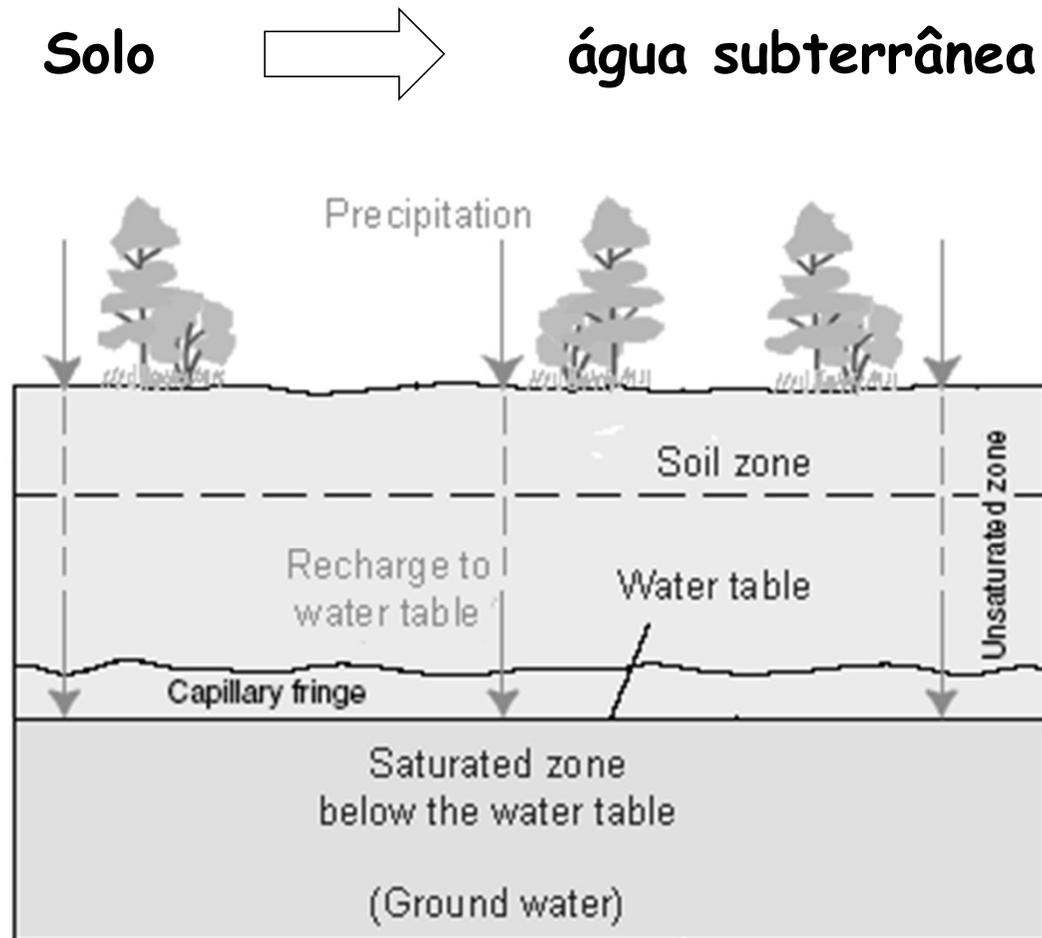
## Aquíferos de MS

### AQUÍFEROS

-  Sistema aquífero cenozóico
-  Sistema aquífero bauru
-  Sistema aquífero guarani
-  Sistema aquífero aquidauna-ponta grossa
-  Sistema aquífero furnas
-  Sistema aquífero serra geral
-  Sistema aquífero pré-cambriano
-  Sist. aquífero pré-cambriano calcários

Fonte: SEMAC, 2010

# Contaminação do solo e da água subterrânea



Fonte: USGS (2012)

## Como o conhecimento acerca do comportamento das águas subterrâneas pode ser empregado para avaliar a degradação ambiental?

O entendimento integrado do comportamento das águas subterrâneas e do solo, discutido no capítulo 2, é fundamental para o estudo de ambientes degradados, sobretudo por contaminação. No estudo de remediação de solos e aquíferos contaminados consideram-se como propriedades relevantes:

- tipo de aquífero (livre, suspenso ou confinado) – vai determinar a intensidade da contaminação;
- distribuição espacial do aquífero e suas relações com os materiais circundantes e outras unidades geológicas (aquíclude, aquítarde e aquífügos) – condiciona como podem se propagar os contaminantes;
- composição química das águas subterrâneas – auxilia na determinação do tipo de contaminante;
- constituição dos materiais na zona não-saturada – condiciona os processos que podem contribuir para a atenuação da contaminação;
- nível do lençol freático e direção do fluxo de água subterrânea – contribuem para o planejamento das atividades de remediação;
- áreas de recarga – a determinação dessas áreas contribui a esse estudo, pois nas mesmas os efeitos da contaminação pelo processo de infiltração são mais intensos;
- condutividade hidráulica – permite deduzir a velocidade com que o fluxo contaminado permeia por um aquífero;
- constituição dos diferentes materiais do perfil de alteração e suas propriedades intrínsecas – condiciona os processos no solo e na zona não-saturada.



<https://www.linkedin.com/pulse/freewat-modelagem-hidrogeol%C3%B3gica-em-software-livre-colombo-pimenta/>

## **Contaminação do solo e da água subterrânea**

**Para reflexão: como as características dos aquíferos interferem na contaminação do solo e água subterrânea?**

**Vejam o que discutimos na aula passada!  
Vamos falar mais na palestra!**



**amarilisgallardo@usp.br**

**Agradeço à amiga Professora Sandra Gabas que compartilhou boa parte do conteúdo  
dessa aula**