PHA 2307
Hidrologia Aplicada

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

Água Subterrânea
Parte 1 de 2

Aula 24 - 2015

Prof. Dr. Arisvaldo Méllo
Prof. Dr. Joaquin Garcia
Prof. Dr. Marco Palermo

Objetivos da Aula

1. Conhecer as definições: Hidrogeologia, Porosidade, permeabilidade e hidráulica das águas subterrâneas.
2. Conhecer as reservas globais de água subterrânea
3. Conhecer a relação das águas subterrâneas com as águas superficiais e escoamento básico.
4. Conhecer a classificação dos aquíferos.
5. Conhecer os usos das águas subterrâneas.
6. Conhecer os principais províncias hidrogeológicas do Brasil e do Estado de São Paulo.
7. Conhecer a contaminação das águas subterrâneas.
8. Conhecer as consequências da super-exploração das águas subterrâneas.
9. Conhecer como proteger as águas subterrâneas.
10. Conhecer as vantagens e desvantagens do uso das águas subterrâneas.

Hidrogeologia

Estuda a ocorrência, a distribuição e a movimentação da água na parte subterrânea da terra

Abrange não só aspectos de produção de água mas também problemas de poluição e descontaminação de aquíferos

Reservas Globais de Água

	10^15 m^3	% do Total
Oceanos	1350	97.57
Geleiras	25	1.81
Água Subterrâne	8.4	0.61
Rios e Lagos	0.2	0.014
Atmosfera	0.013	9.40E-04
Biosfera	0.0006	4.30E-05

Brasil:

Estatísticas imprecisas

100 000 Km³ de reservas

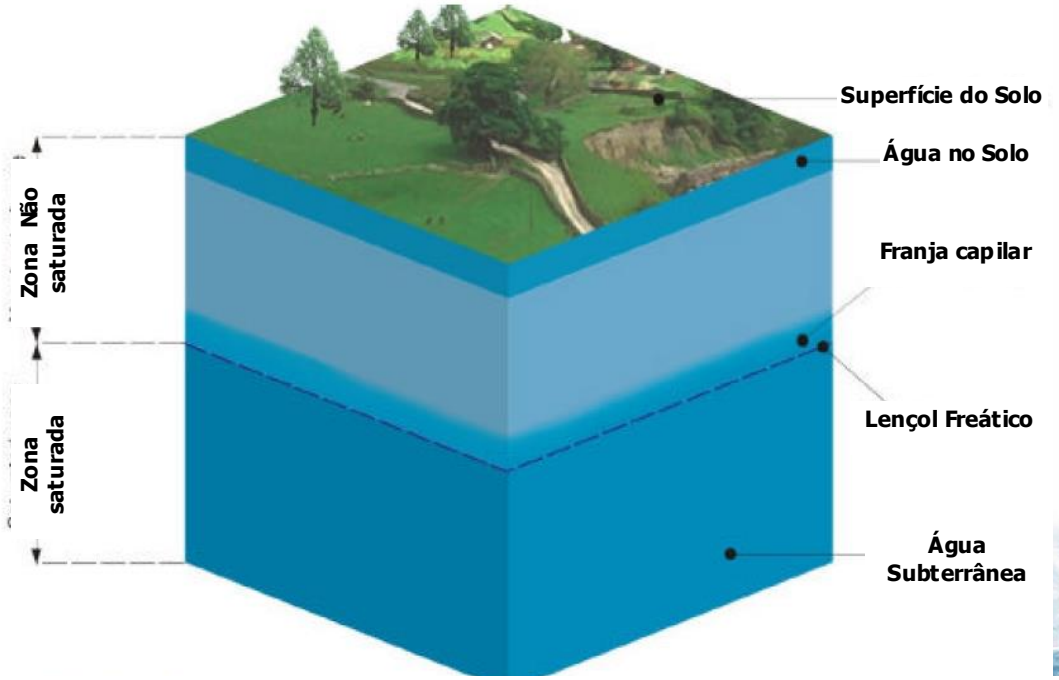


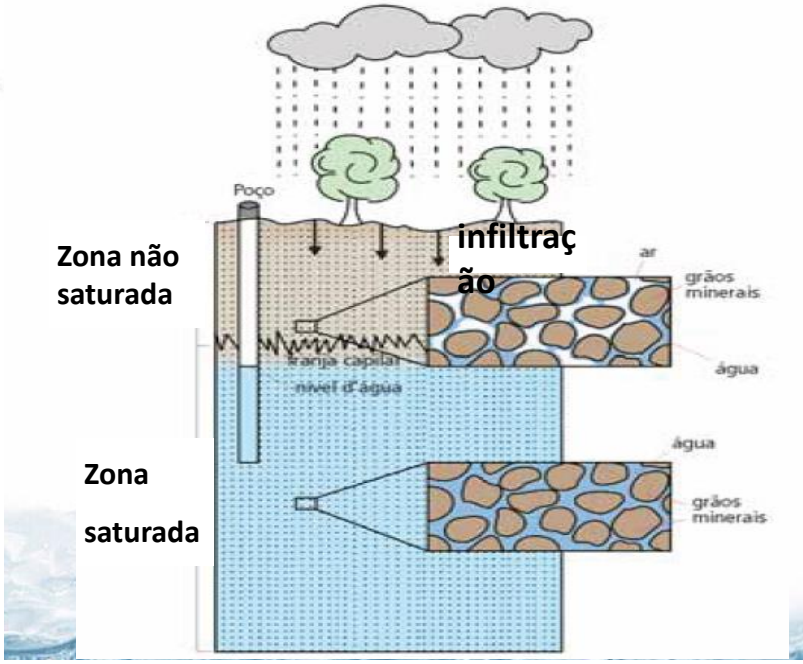
Fonte: Shiklomanov (1998) – Distribuição de ägua no Mundo (apud Kettelhut, Julio Thadeu Silva, Água Subterrânea e desenvolvimento. Semna de Geografia da UFSC.

Água Subterrânea

- Água subterrânea é a água que circula pelos poros entre os grãos que formam os solos e as rochas sedimentares ou nas fraturas das rochas.

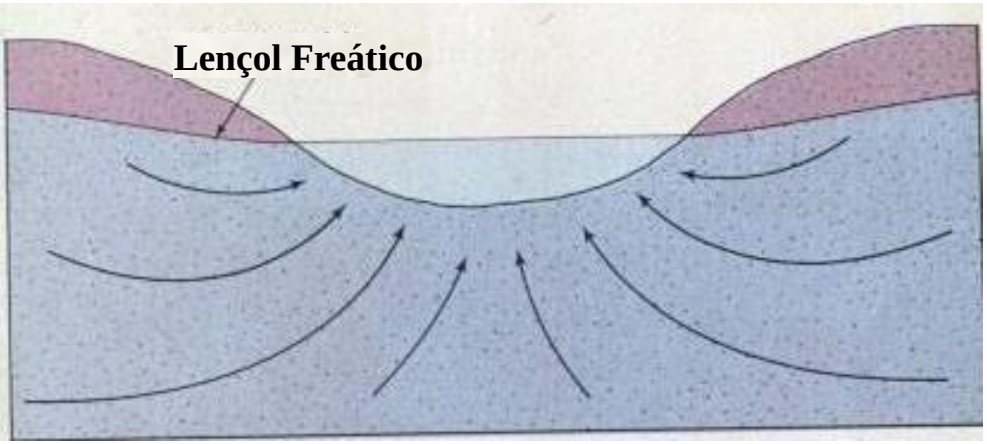
- No processo de infiltração, a água passa por uma camada de solo não saturado (zona aerada), onde os poros são preenchidos por água e ar. Atinge as camadas mais profundas do solo (percolação) atingindo uma zona saturada, onde todos os poros são preenchidos com água.





Barp, A. R. B. e Lisbôa, E. G. - Aquíferos – Aula 5 (Parte 1/2). Univ. Fed. do Pará - Instituto de Tecnologia - Fac. de Eng. Sanitária e Ambiental

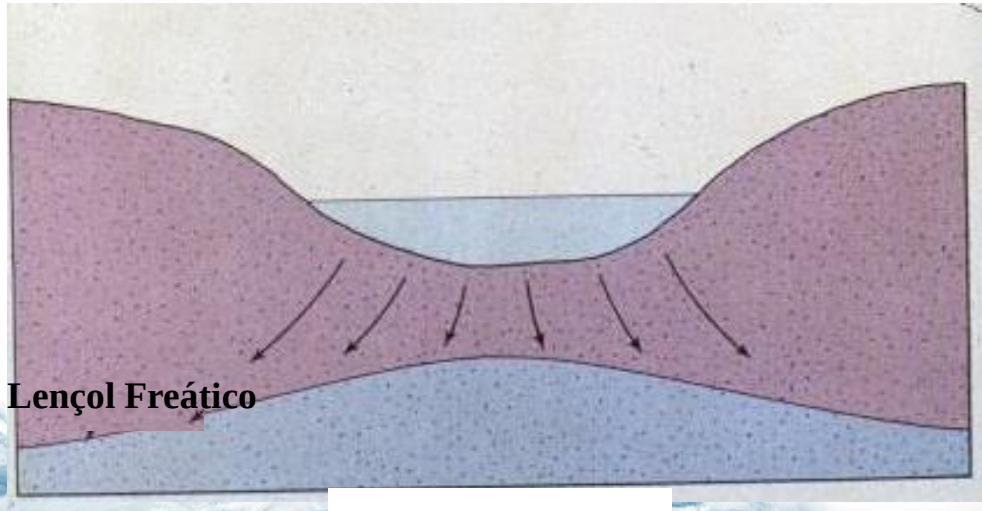
Relação entre Águas Subterrâneas e Superficiais



Rio Influente

- A água subterrânea é a responsável pela perenidade da maior parte dos rios que recebem a sua contribuição (rios influentes).

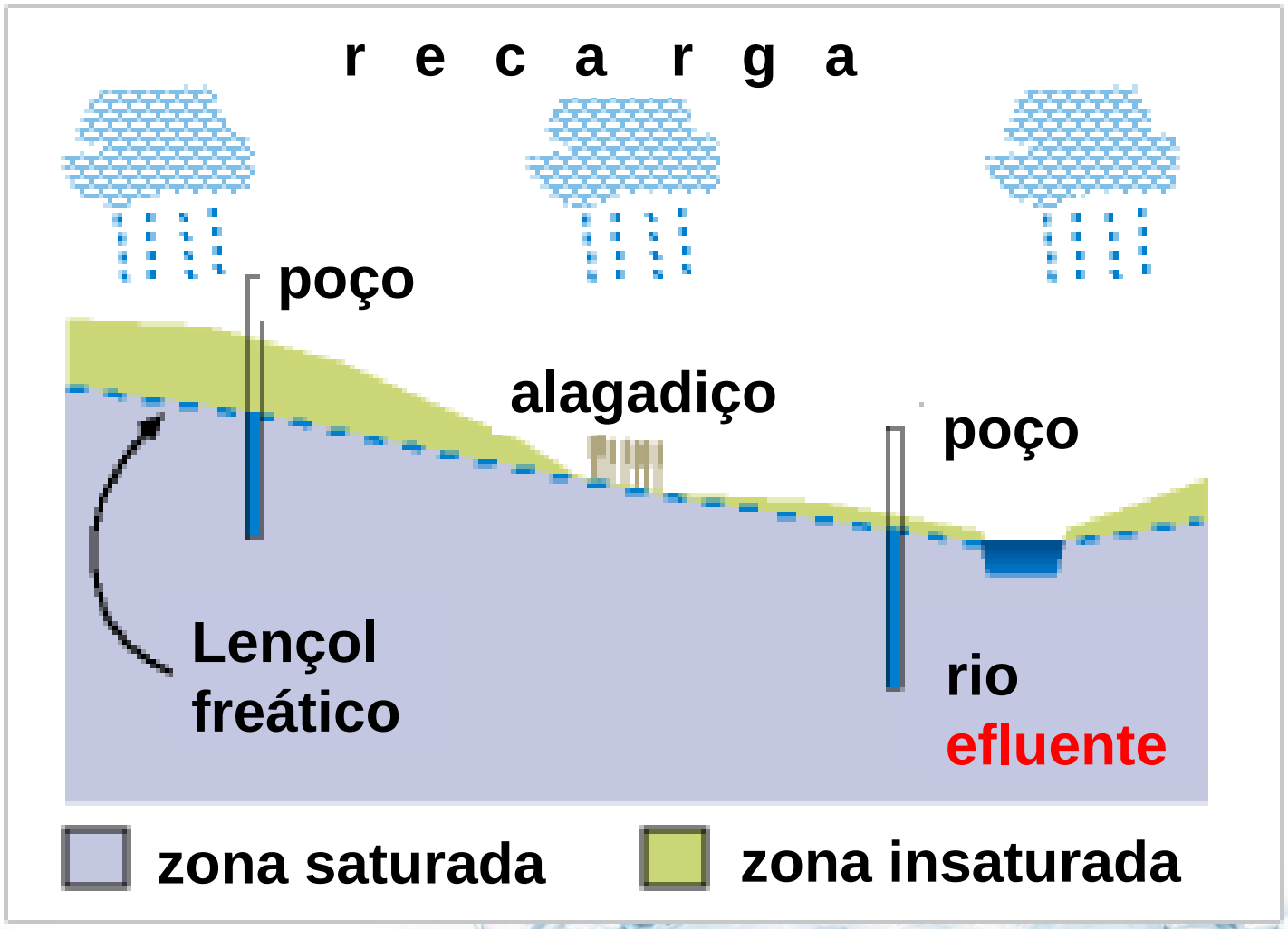
- Se o fundo do rio está acima da zona saturada do solo, a água que escoa pelo rio pode infiltrar e ajudar a alimentar a zona saturada do solo (rios efluentes)



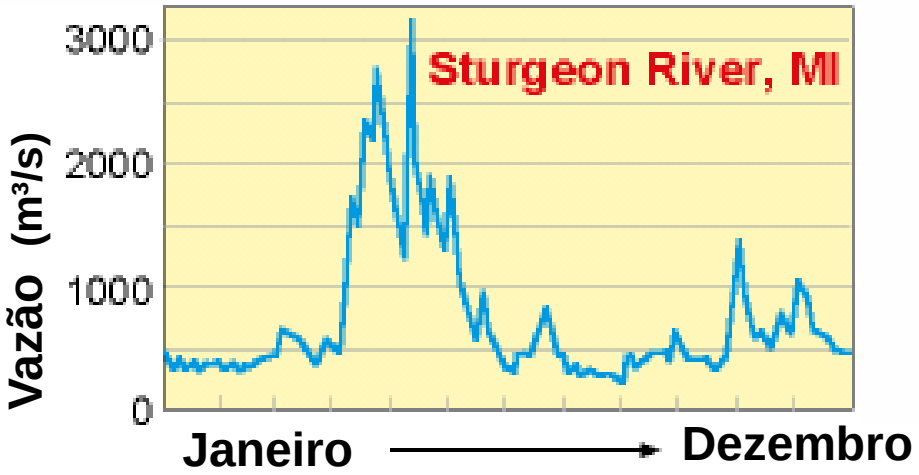
Rio Efluente

Fonte: http://www.mhhe.com/earthsci/geology/mcconnell/demo/gwsystem.htm

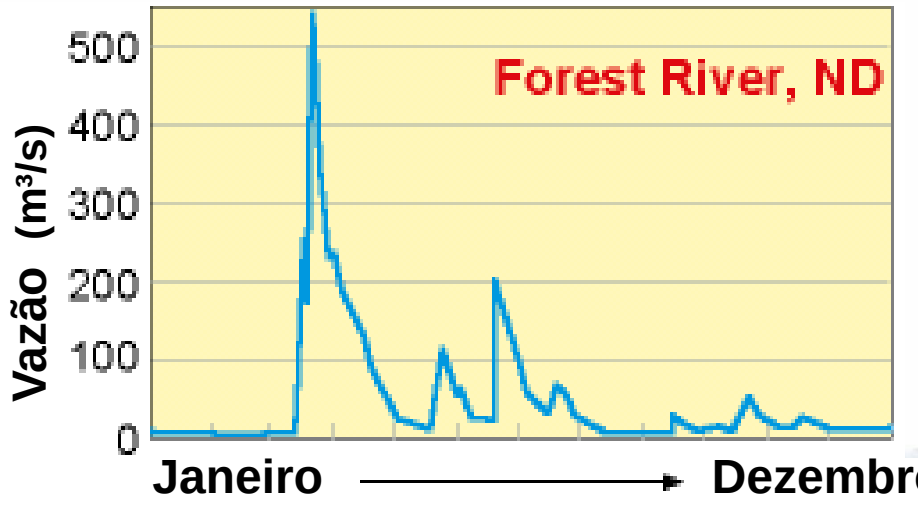
Variação do Lençol Freático



Águas Subterrâneas e Vazões Básicas



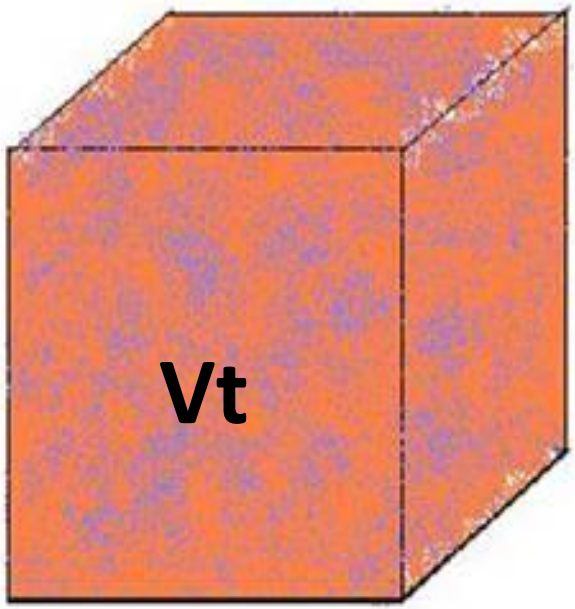
Hidrogramas do Rio Sturgeon, Michigan. A vazão básica não se aproxima de zero porque o rio recebe boa parte de sua vazão da água subterrânea.

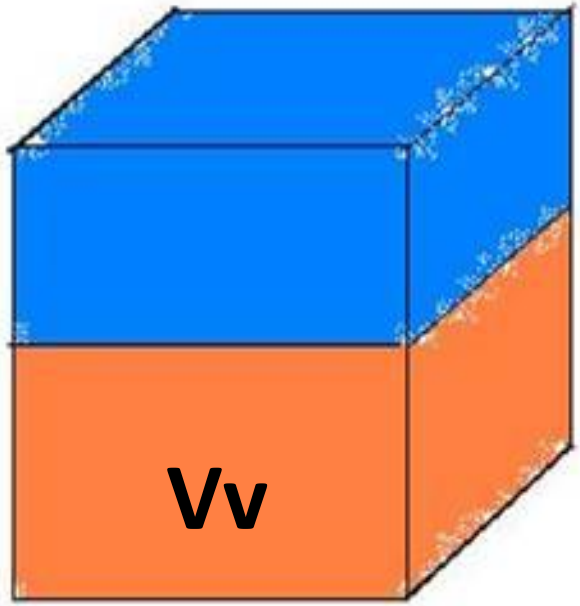


Hidrogramas do Rio Forest, North Dakota. Em contraste, as vazões do Rio Forest recebem pouca água do aquífero subterrâneo.

Fonte: http://www.mhhe.com/earthsci/geology/mcconnell/demo/gwsystem.htm

Água Subterrânea e Porosidade



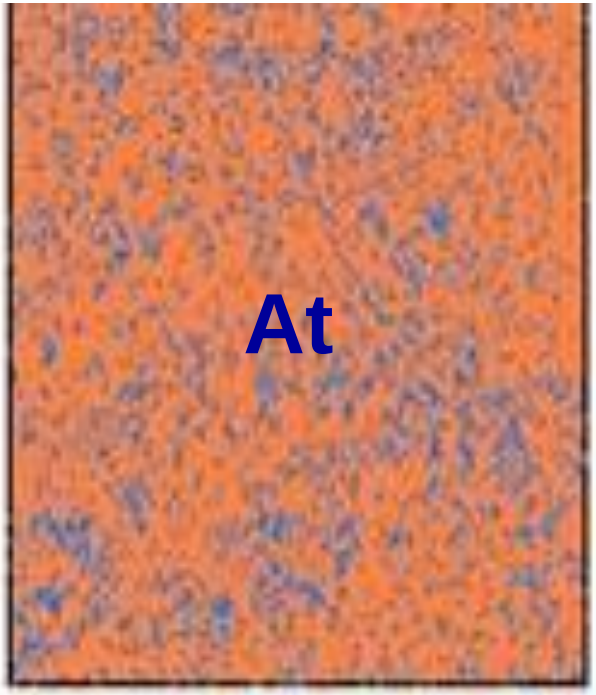


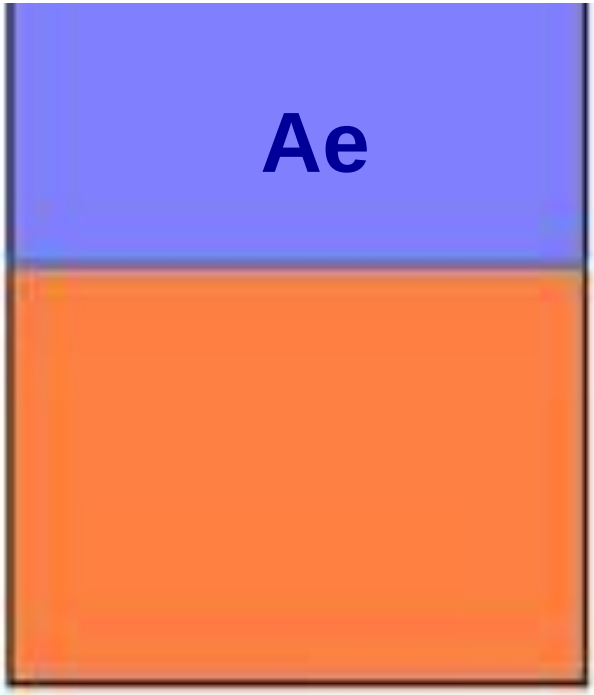
Porosidade : N= Vv/Vt

Porosidade Efetiva: Ne= Vg/Vt

Vt = Volume total de uma amostra de solo
Vv = Volume de poros (ou vazios) em uma amostra de solo
Vg = Volume de sólidos (ou grãos) de uma amostra de solo

Água Subterrânea e Porosidade





$Va = Q/At$

$Vr = Va/N$

At = Área total de escoamento
Ae = Área efetiva de escoamento
N = Porosidade

Va = Velocidade aparente
Vr = Velocidade real

Água Subterrânea e Porosidade

- A superfície limite entre as zonas aerada e saturada é chamada de lençol freático.

- O volume de água armazenado depende da porosidade (relação entre o volume de vazios e o volume total de rocha ou de solo).

Porosidade total nos sedimentos e rochas sedimentares

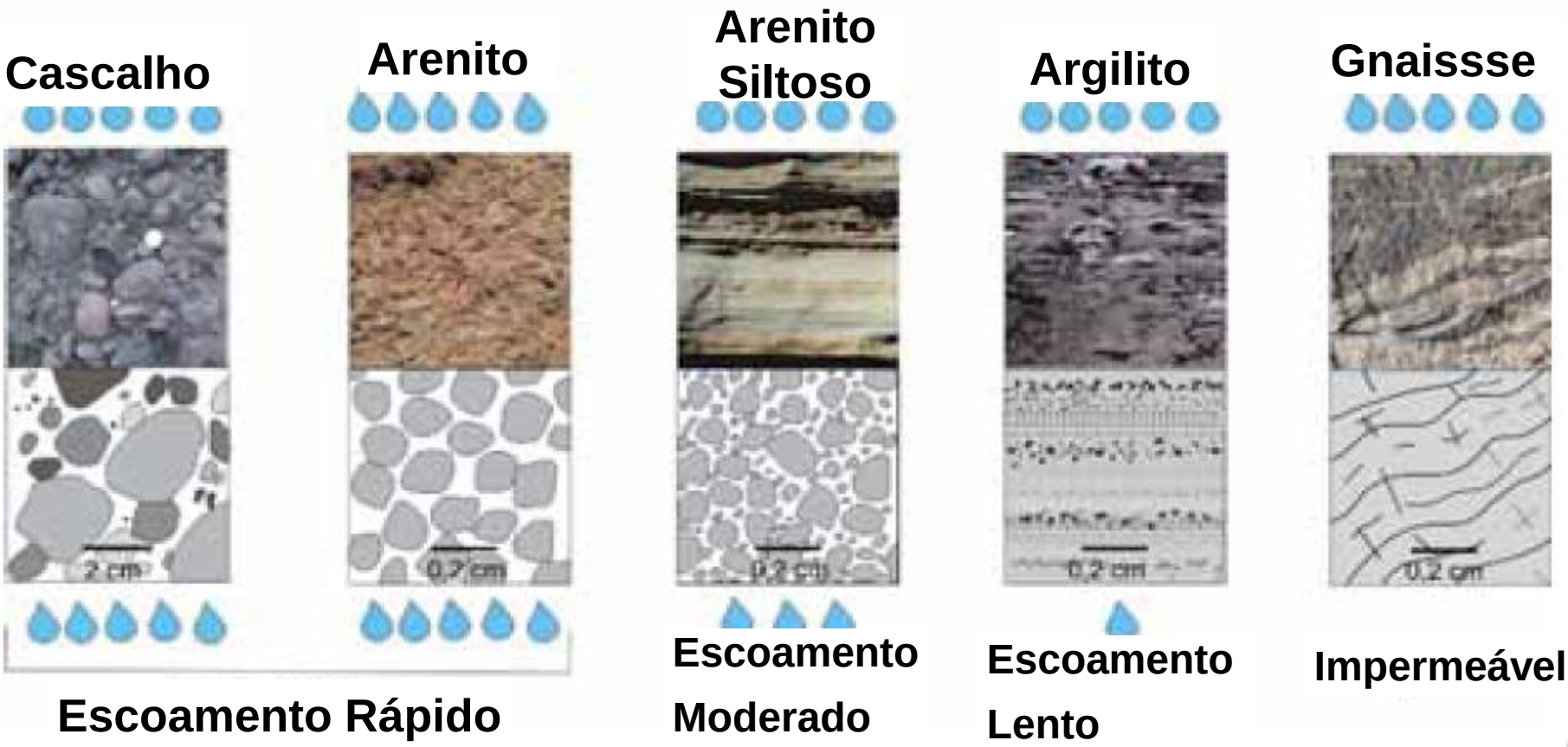
Sedimentos(*)	Diâmetro da partícula (mm)	Porosidade total dos sedimentos (%)	Rochas Sedimentares (**)	Porosidade total das rochas (%)
Cascalho	> 2,0	24 – 38	Arenito	5 – 30
Areia grossa	0,2 – 2,0	31 – 46	Siltito	21 – 41
Areia fina	0,02 – 0,2	26 – 53	Calcário/Dolomito	0 – 40
Silte	0,002 – 0,02	34 – 61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

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

Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Relação entre Litologia e Permeabilidade das Rochas

A permeabilidade é a propriedade que indica a facilidade com que a água flui através da rocha. Depende do tamanho e do volume de poros interconectados e da forma dos grãos, arranjo e granulometria do solo.



Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Hidráulica de Águas Subterrâneas - Lei de Darcy

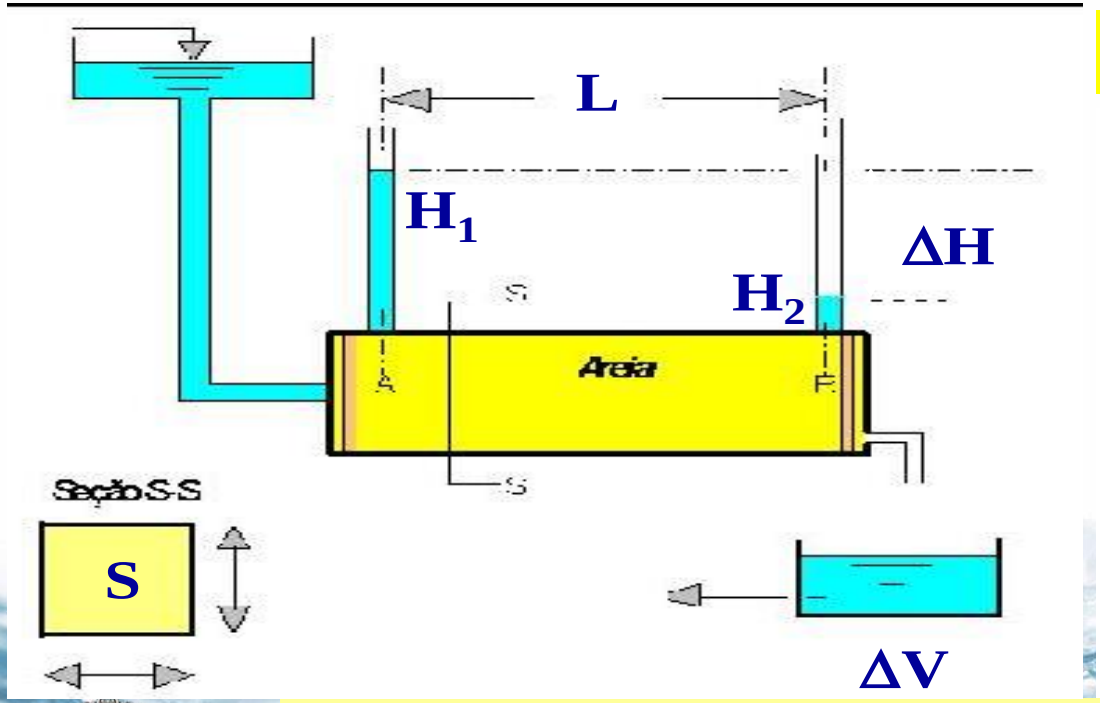
Movimento da água em meios porosos saturados:

$$Va = K \cdot i$$

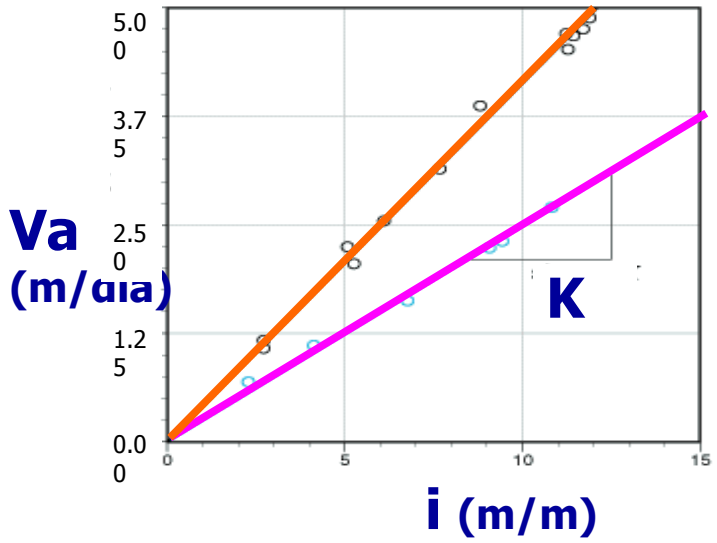
Va: velocidade aparente da água (m/dia)

I : gradiente hidráulico (m/m)

K : condutividade hidráulica ou permeabilidade(m/dia)



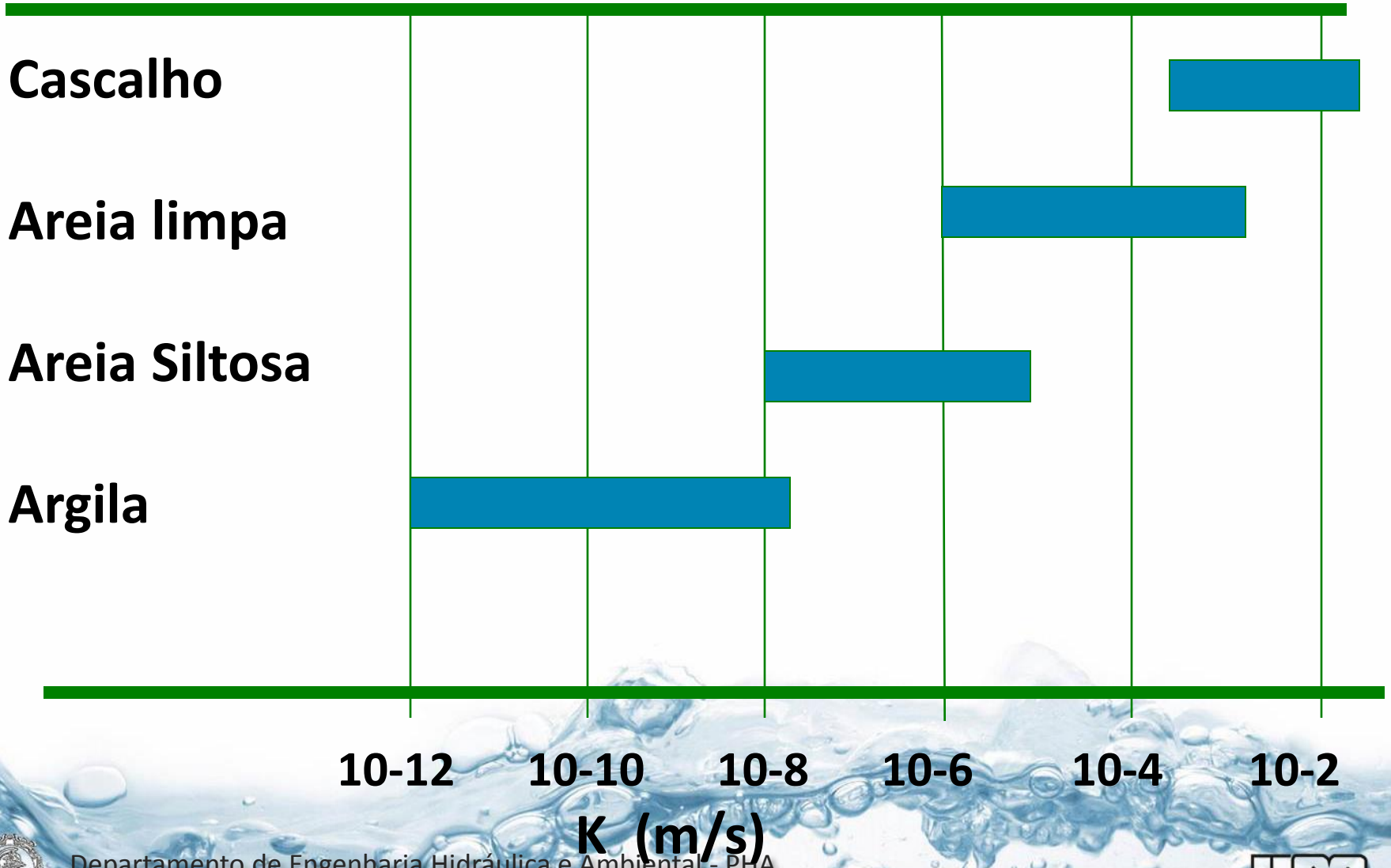
O experimento de Darcy



i=DH/L Q=DV/DT Va=Q/S

Hidráulica de Águas Subterrâneas - Lei de Darcy

Valores da Condutividade (K) para Diferentes Solos



Camadas Confinantes

- **Aquífugo**: São materiais impermeáveis, com baixíssimo grau de porosidade, que tanto não contêm como não transmitem água;

- Ex: rochas duras, cristalinas, metamórficas e vulcânicas, sem fraturamento ou alteração.

- **Aquitardo:** São materiais ou rochas porosas que, embora armazenem quantidades significativas de água no seu interior, permitem a circulação apenas de forma muito lenta.

- Ex: argilas siltosas ou arenosas

- **Aquiclude:** São materiais também porosos, que contêm água nos seus interstícios, muitas vezes atingindo até o grau de saturação, mas não permitem a sua circulação;

- Ex: rochas ou materiais essencialmente argilosos

Barp, A. R. B. e Lisbôa, E. G. Aquíferos – Parte 1/2. Universidade Federal do Pará. Instituto Dde Tecnologia. Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental

Aquíferos

- São camadas geológicas capazes de transmitir quantidades significativas de água (economicamente viáveis)

- Admitindo: 200 l/(hab.dia)
- 20 h/dia de bombeamento

- 1 m³/h > 100 habitantes
- 100 m³/h > 10000 habitantes
- 500 m³/h > 50000 habitantes

Características do Escoamento nos Aquíferos

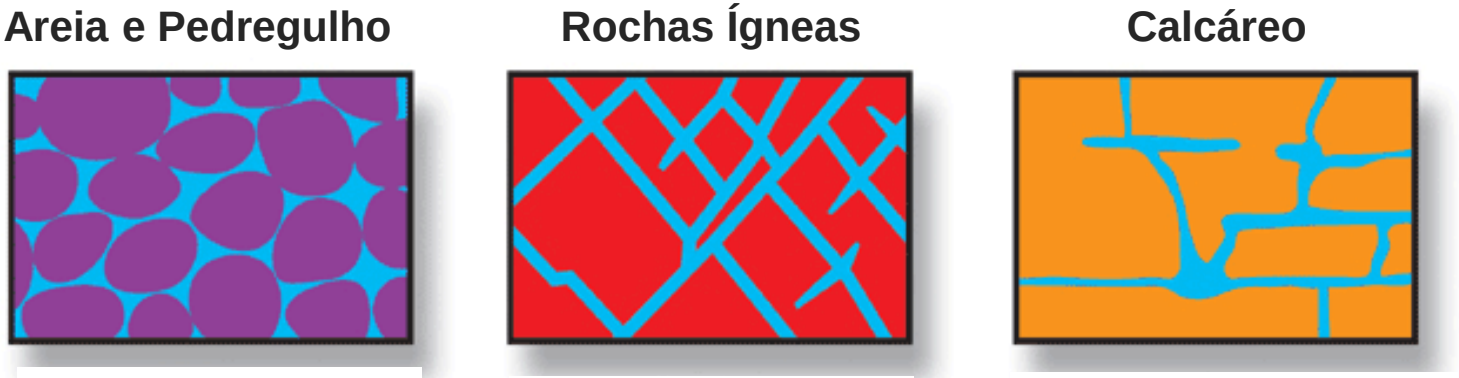
- Movimento lento:
- Vsup= 1 m/s Vsubt= 1 m/dia
- Fluxo laminar
- Tempo de residência médio: 280 anos
- Recarga anual muito pequena
- Enorme volume de poros

Consequências:

- Reservas grandes, confiáveis (pouco suscetíveis a variações climáticas) e naturalmente protegidas contra poluição
- Despoluição muito lenta e caríssima

Classificação de Aquífero em Relação ao Tipo de Porosidade das Rochas

Principais tipos de porosidade

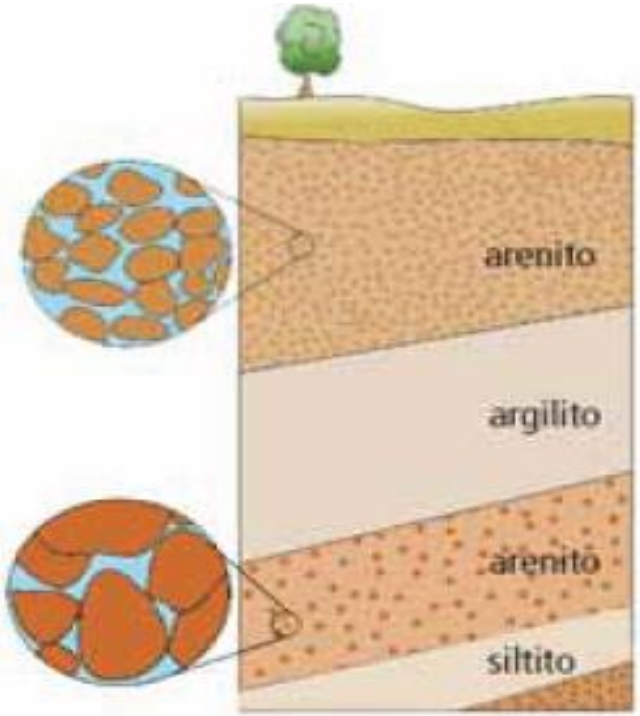


A água subterrânea preenche os espaços entre grão de areia, as fissuras das rochas e poros nas rochas calcáreas.

Fonte: http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/grdwtr/e_gdwtr.htm

Classificação dos Aquíferos de Acordo com o Tipo de Porosidade da Rocha

Aquífero Granular



Aquífero Fissural



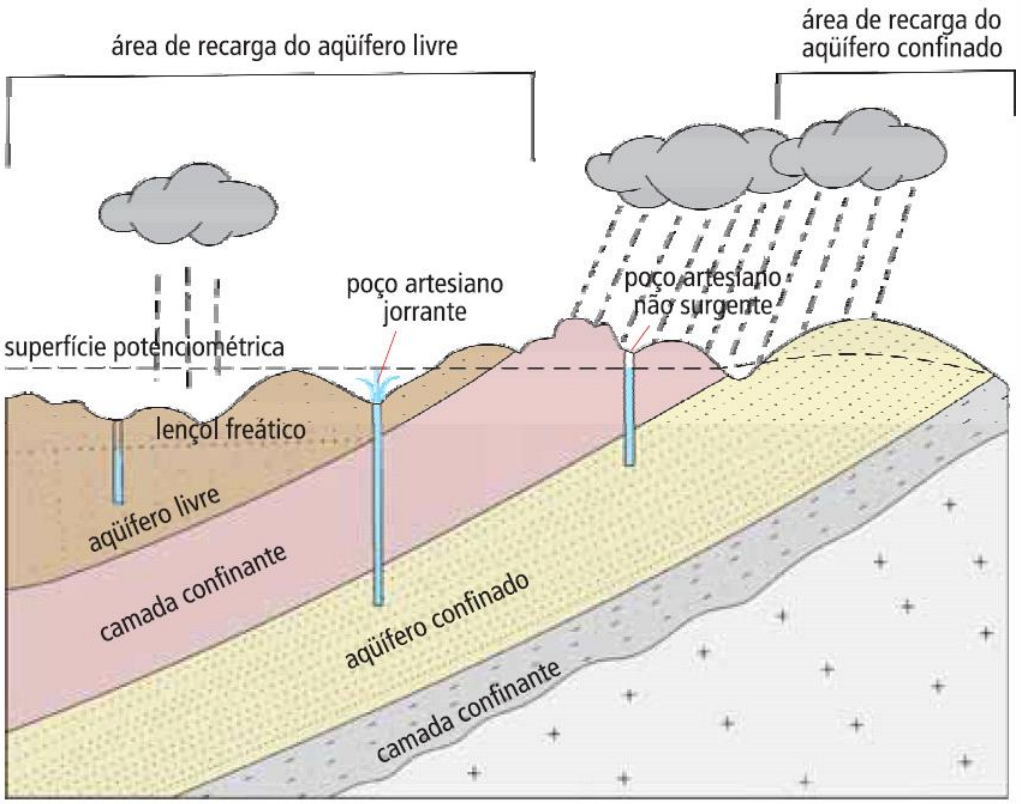
Aquífero Cárstico



Classificação dos Aquíferos quanto às Características Hidráulicas

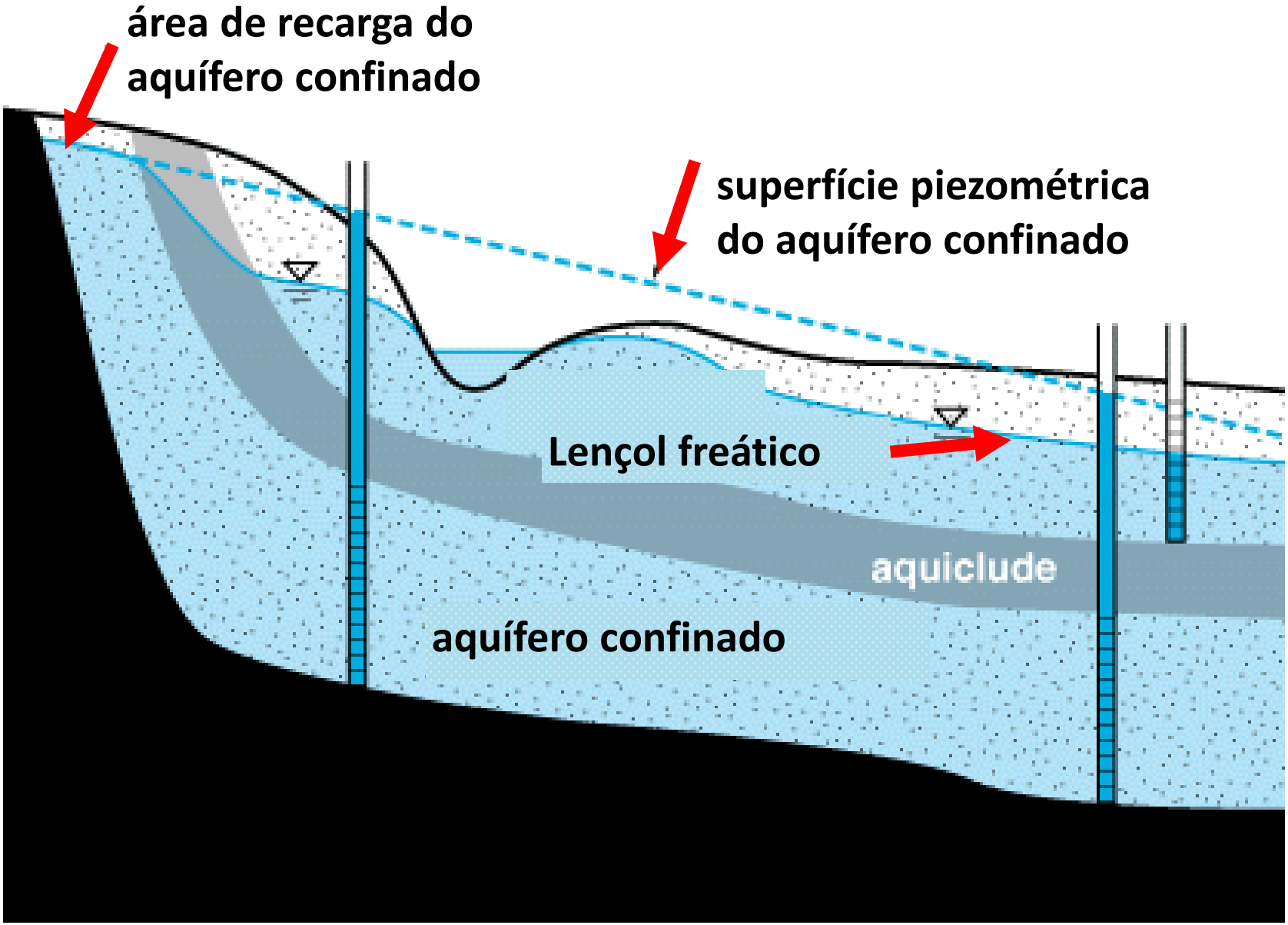
- **Aquífero livre (ou freático)** está mais próximo à superfície, ficando submetido à pressão atmosférica. A água que infiltra no solo atravessa a zona não saturada e recarrega diretamente o aquífero.

- **Aquífero confinado (ou artesiano)** é limitado no topo e na base por camadas de rocha de baixa permeabilidade (como argila, folhelho, rocha ígnea maciça etc.). Está submetido a uma pressão maior que a atmosférica, devido a uma camada confinante acima dele



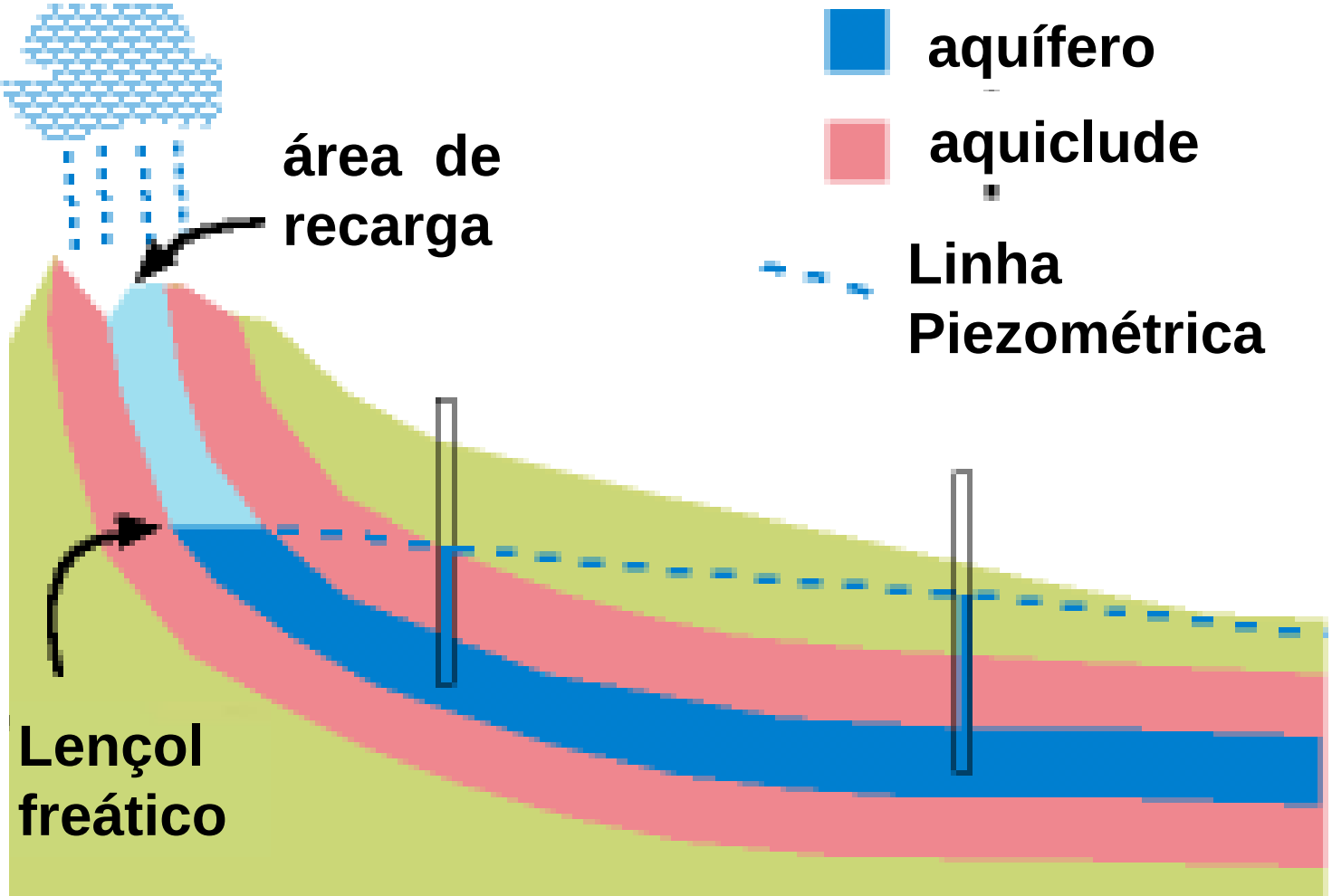
Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Aquíferos Livres e Aquíferos Confinados



Aquíferos Confinados

Poços Jorrantes e Não Jorrantes



Usos da Água Subterrânea

- **Abastecimento Urbano**
- **Irrigação**
- **Recreação (Águas termais)**
- **Balneoterapia**
- **Aquecimento Urbano**
- **Aquecimento de Estufas**
- **Geração de Energia Elétrica**

Uso para Consumo

- **No Canadá:** 30% da população (9 milhões de pessoas, dois terços em áreas rurais e os demais concentrados em pequenas cidades)

- **Nos EUA:** 50% do abastecimento urbano

- **Em Portugal:**

Tipo de Uso	Origem de Água Subterrânea
Abastecimento	44%
Indústria	50%
Agricultura	65%

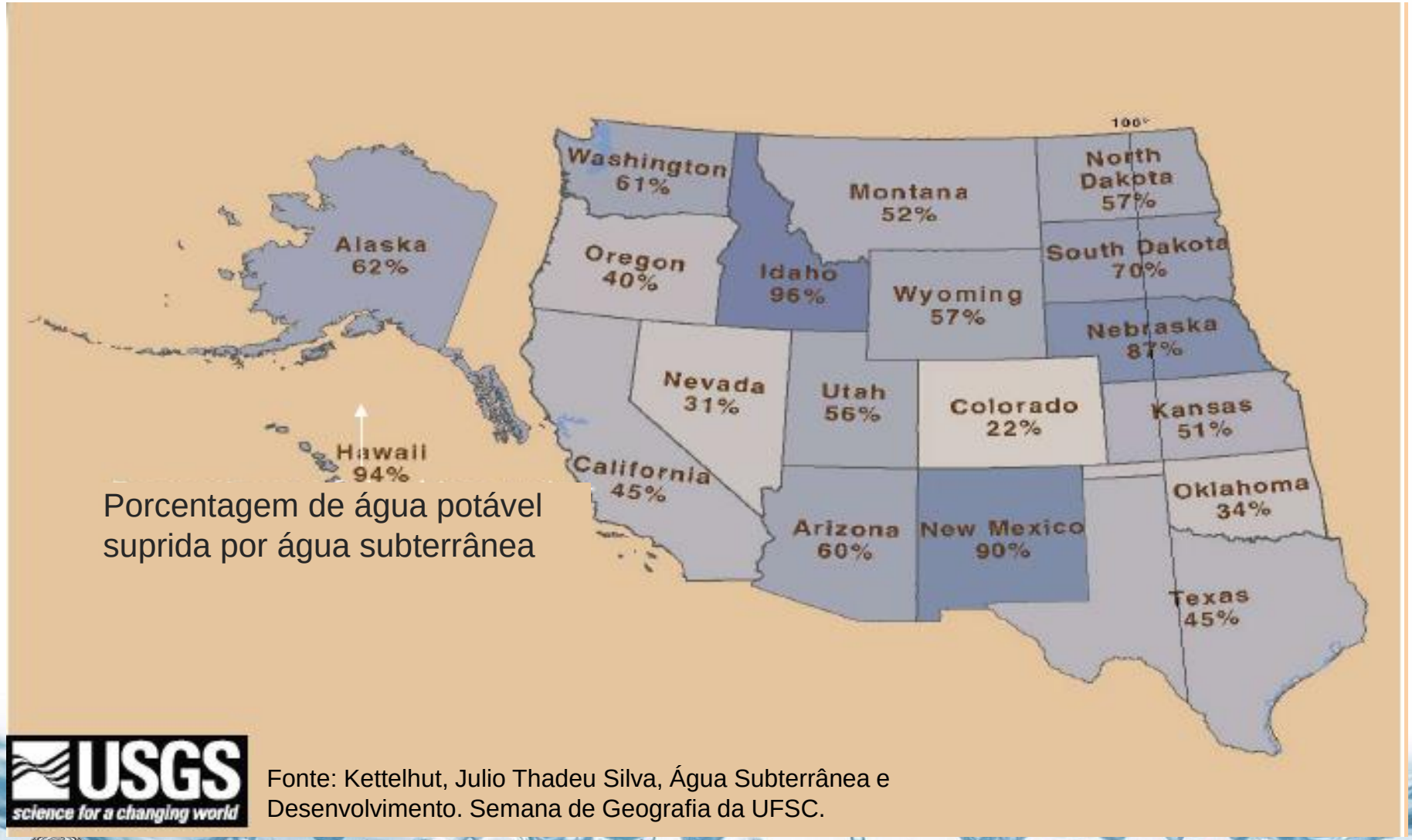
Fonte: aprh

- **Na Europa:** As águas subterrâneas fornecem cerca de 65% da água destinada ao consumo humano.

- **No Estado de São Paulo:** 80% dos municípios utilizam as águas subterrâneas para atendimento total ou parcial da população.

Uso de Água Subterrânea como Água Potável

no Oeste dos EUA

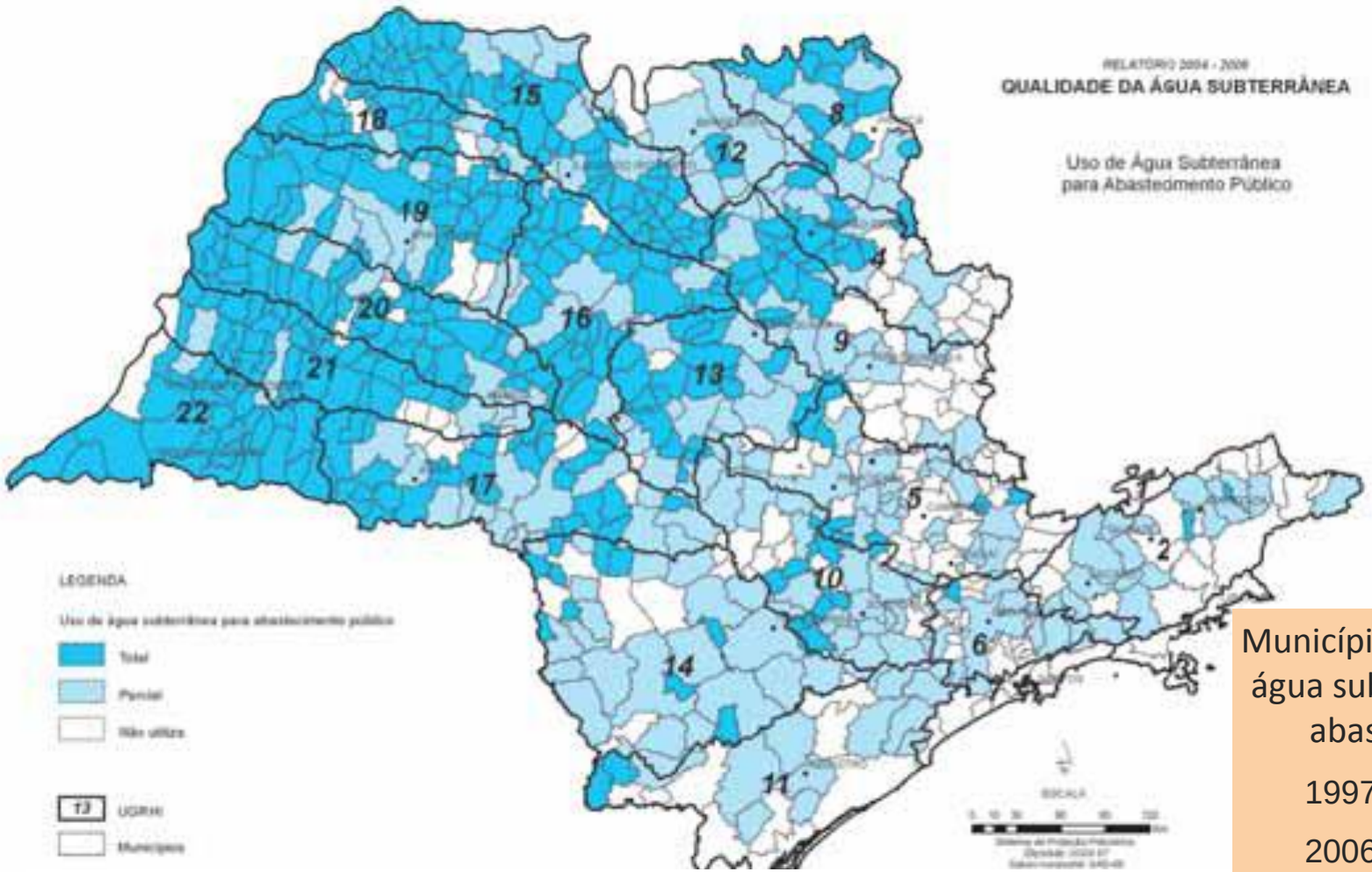


Porcentagem de água potável suprida por água subterrânea

Fonte: Kettelhut, Julio Thadeu Silva, Água Subterrânea e Desenvolvimento. Semana de Geografia da UFSC.

Uso de Água Subterrânea como Água Potável

no Estado de São Paulo. Fonte: CETESB, 2007.



Municípios que utilizam água subterrânea para abastecimento

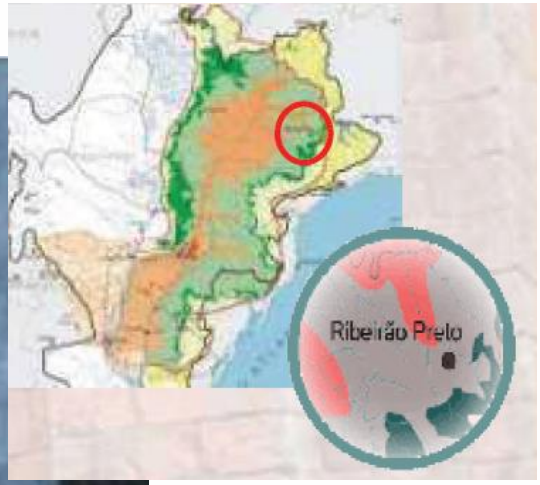
1997	72%
2006	80%

Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Uso de Água Subterrânea como Água Potável

Ribeirão Preto – São Paulo - Brasil





Ribeirão Preto – Área densamente povoada abastecida com água do Aquífero Guarani

Fonte: Kettelhut, Julio Thadeu Silva, Água Subterrânea e Desenvolvimento. Semana de Geografia da UFSC.

Uso para Irrigação

Itapuã - Paraguai





Fonte: Kettelhut, Julio Thadeu Silva, Água Subterrânea e Desenvolvimento. Semana de Geografia da UFSC.

Itapuã – Paraguai. Área de expansão agrícola – Uso da água do Aquífero Guarani

Uso Recreacional - Fontes Termais

Concórdia





Fonte: Kettelhut, Julio Thadeu Silva, Água Subterrânea e Desenvolvimento. Semana de Geografia da UFSC.

Concórdia/Salto – Uso termal com água do Aquífero Guarani

Balneoterapia, Aquecimento Urbano e de Estufas



Balneoterapia

A temperatura de emergência que a grande maioria destas águas termais apresenta (entre os 20ºC e os 76ºC) permite uma variedade de utilizações, como a balneoterapia.



Aquecimento urbano



Aquecimento de estufas

Fonte: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

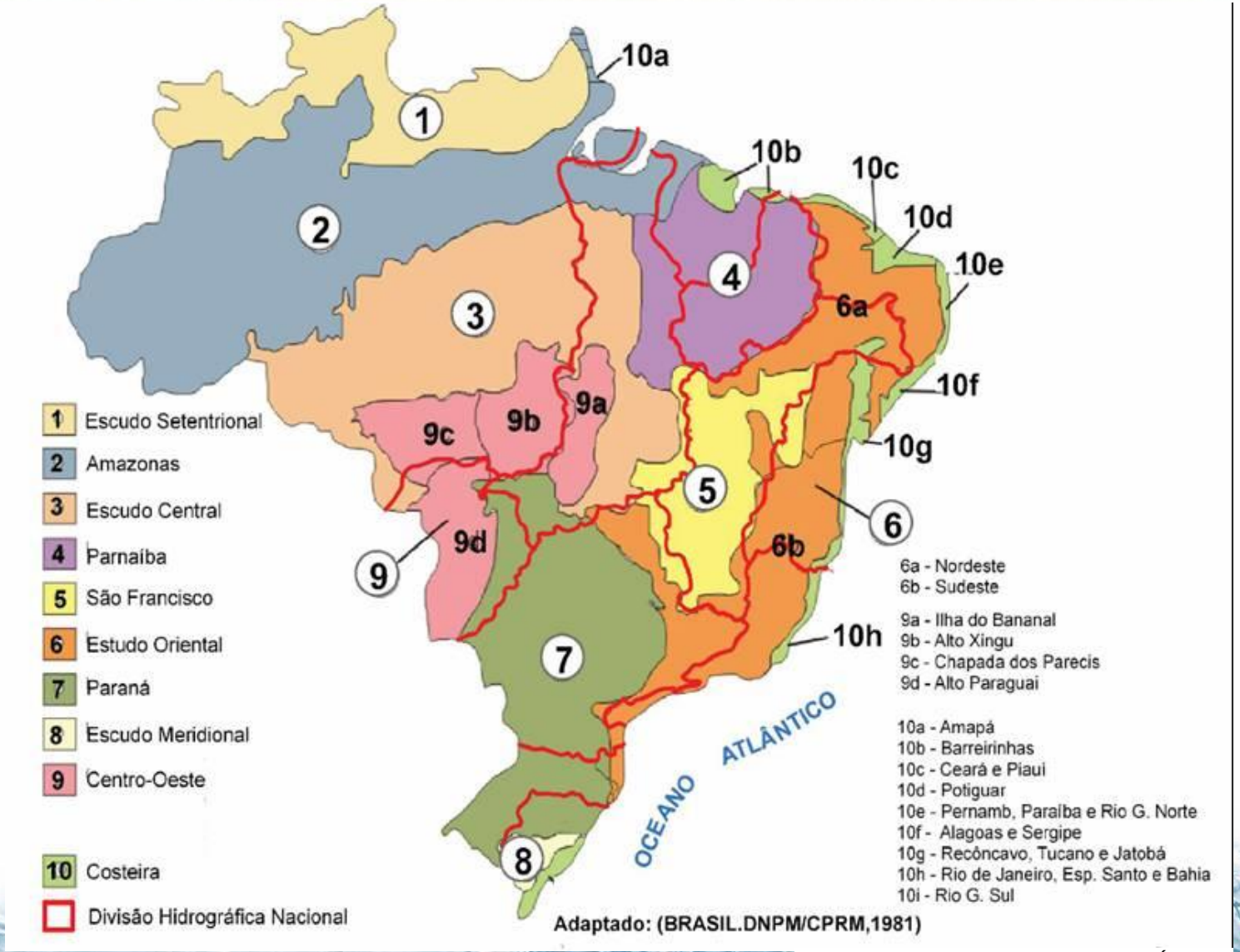
Uso para Geração de Energia Elétrica

A temperatura de emergência das águas termais fazem com que elas se tornem um recurso geotérmico com grandes potencialidades futuras.



Fonte: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

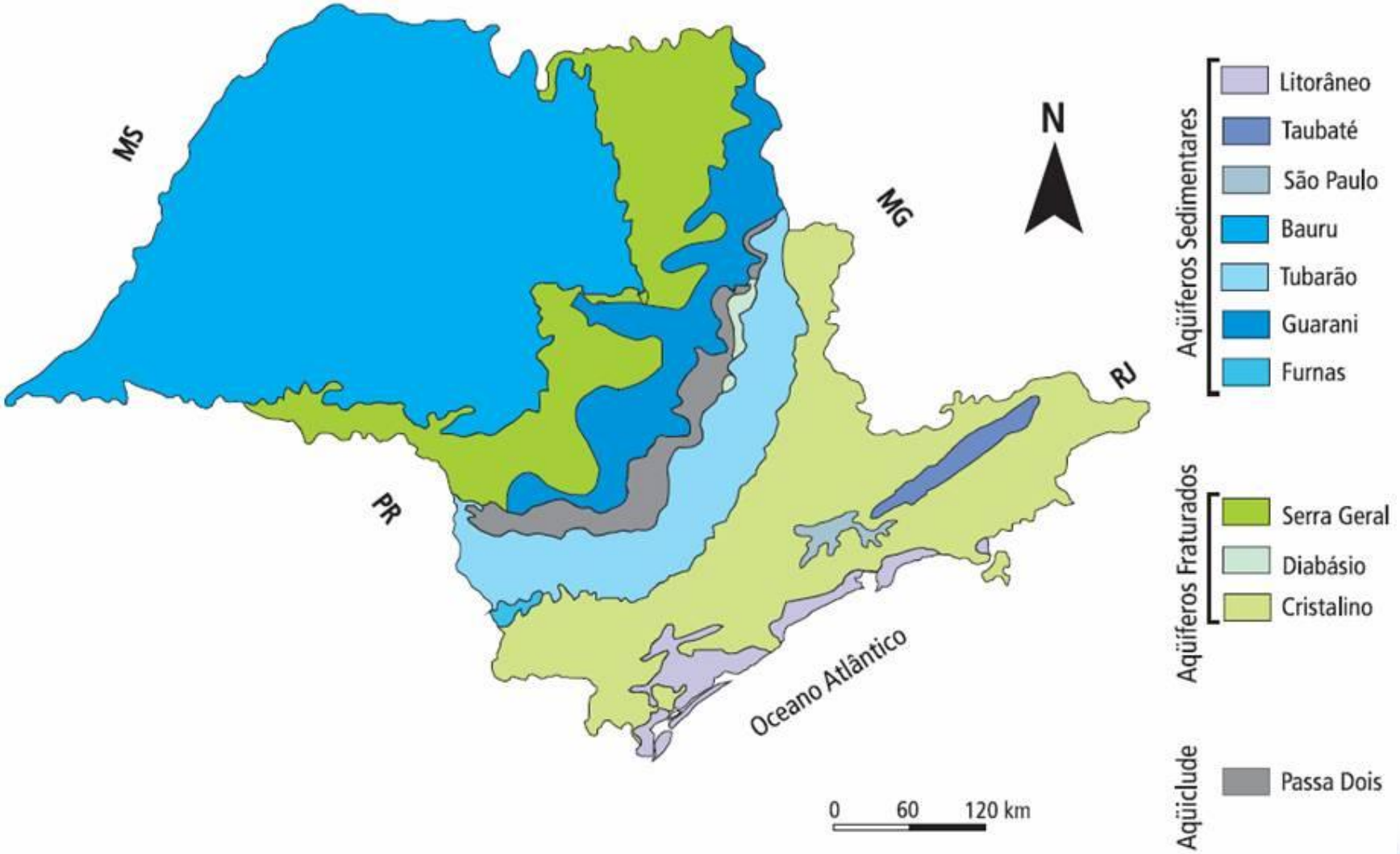
Províncias e Subprovíncias Hidrogeológicas do Brasil



Fonte: Kettelhut, Julio Thadeu Silva, Água Subterrânea e Desenvolvimento. Semana de Geografia da UFSC.

Principais Unidades Aquíferas do Estado de São Paulo.

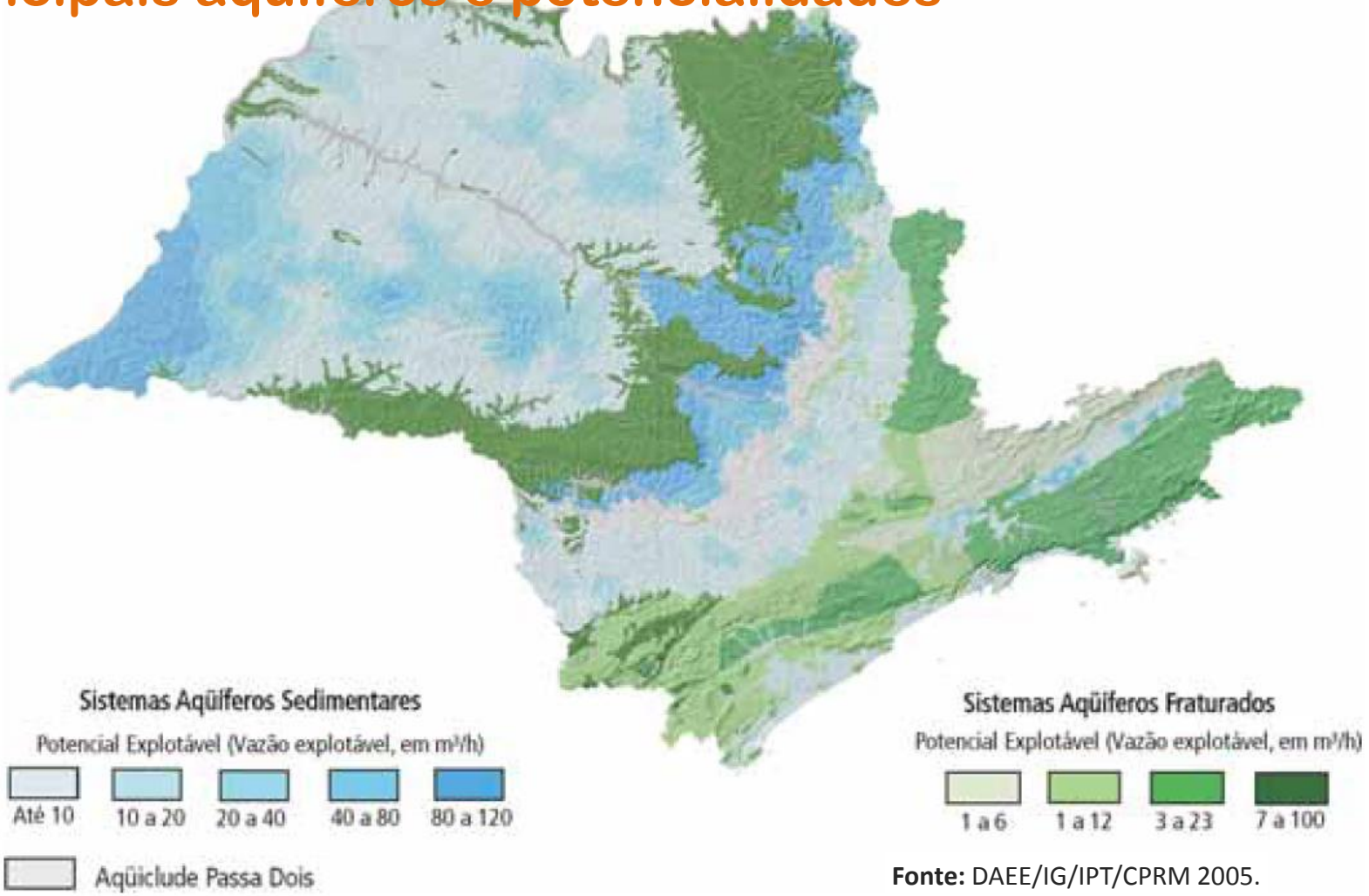
Baseado em IGG, 1974.



Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo

Principais aquíferos e potencialidades

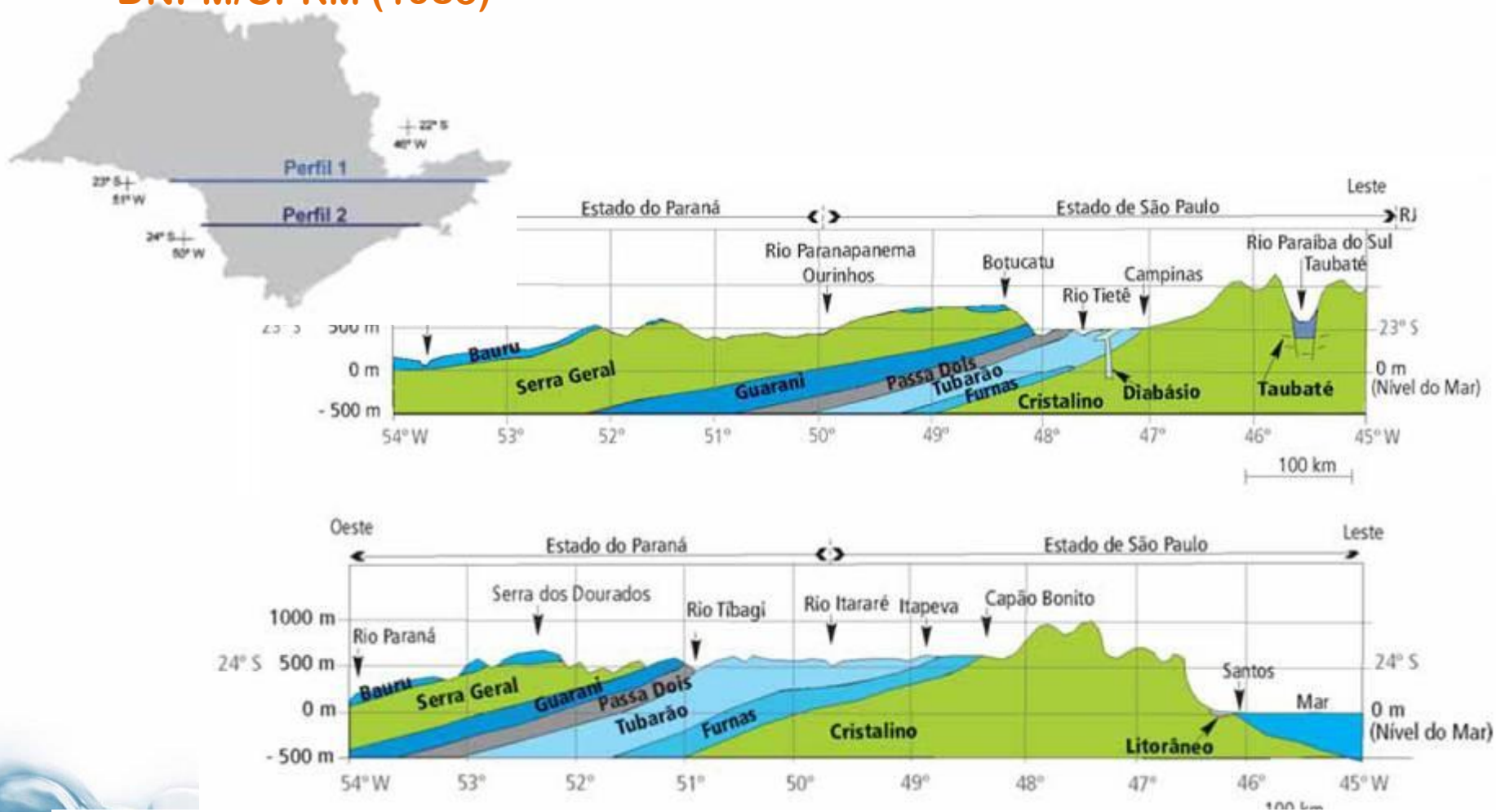


Fonte: DAEE/IG/IPT/CPRM 2005.

Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008. 104p.

Perfis hidrogeológicos esquemáticos do Estado de São Paulo

Elaborados por Oda, G. H. com base em IGG (1974), IPT (1981), DNPM/CPRM (1983)



Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Aquífero Guarani

O Aquífero Guarani é a maior reserva subterrânea de água doce do mundo, sendo também um dos maiores em todas as categorias (Figura 12). Este ocupa sua maior parte no Brasil, e parte da Argentina, Paraguai e Uruguai.



Silva, Y.S.G. e Galvão, C. O.-Água Subterrânea. Universidade Federal de Campina Grande - Centro de Ciências em Recursos Naturais –Unidade Acadêmica De Engenharia Civil - d Engenharia de Recursos Hídricos -Laboratório de Hidráulica II Manoel Gilberto de Barros

Algumas Características dos Aquíferos do Estado de SP

Cristalino



Águas de Lindóia – SP
Nascente em quartzitos

Furnas

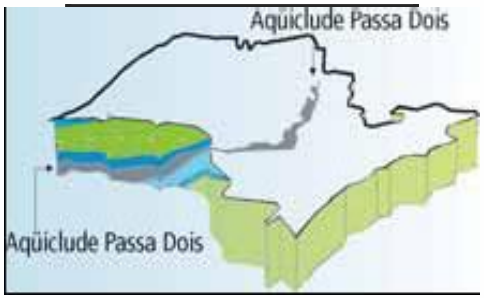


Tubarão



Campinas (SP) – Arenitos.

Aquiclude Passa Dois



Rod dos Bandeirantes, Limeira (SP) – Argilitos da formação Corumbataí

Guarani



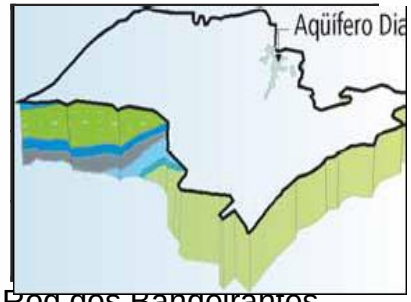
Rod Castelo Branco, Arenitos da Formação Pirambóia,

Serra Geral



Ribeirão Preto (SP) – Detalhe de fraturas no basalto.

Diabásio



Rod dos Bandeirantes Limeira (SP) –Detalhes das fraturas no diabásio.

Bauru



Rodovia Castelo Branco (SP) – Arenito argiloso.

Taubaté



Taubaté (SP) –Intercalação de

São Paulo



Itaquaquecetuba (SP) –

Litorâneo

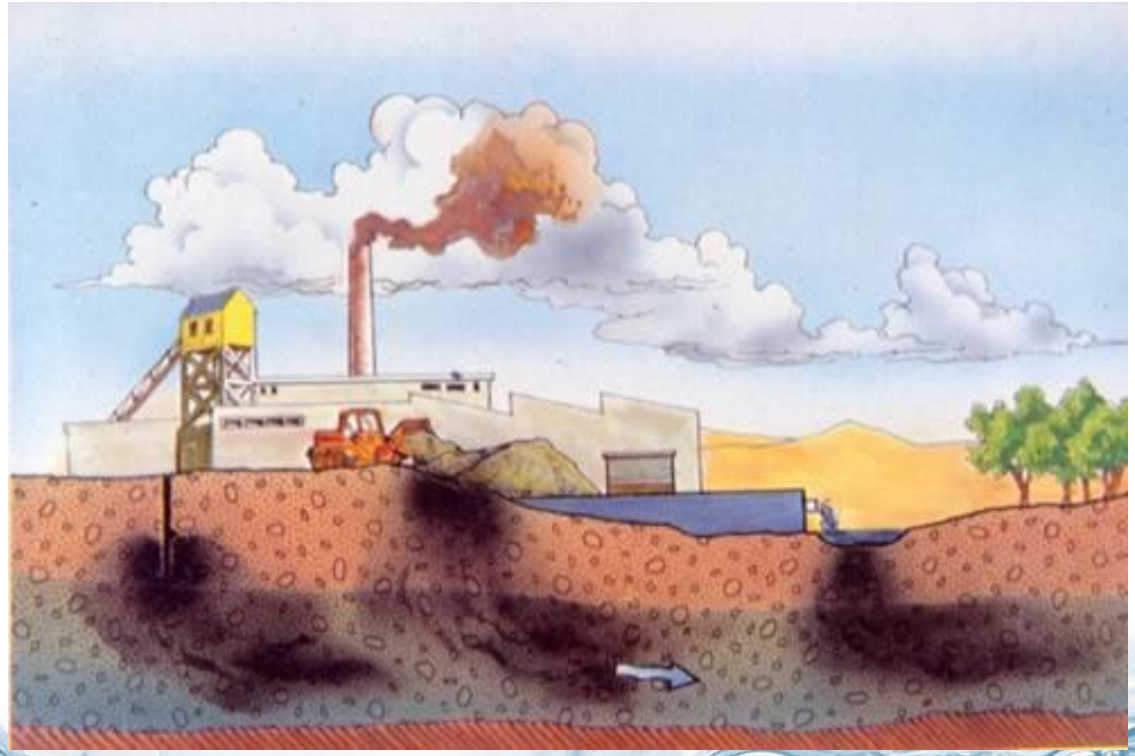


Ubatuba (SP).

Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Contaminação das Águas Subterrâneas

É cada vez mais frequente a descoberta de áreas contaminadas de aquíferos no país, mas a maior parte dele ainda apresenta boa qualidade de suas águas.



O controle de fontes tem sido um dos meios mais eficazes de reduzir este risco de contaminação de aquíferos.

Contaminação da Água Subterrânea

Fontes pontuais

- Vazamentos de tanques de combustível,
- Fossas sépticas
- Vazamentos de oleodutos
- Vazamentos de redes de esgotos
- Infiltração de resíduos industriais
- Dejetos de animais

Poluição Difusa

- Infiltração de fertilizantes e pesticidas em áreas rurais.

Fonte: http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/grdwtr/e_gdwtr.htm

Fontes de Contaminação Mais Comuns em Solos e Água Subterrânea nos Países Baixos

Fontes de contaminação	Frequência (%)
Posto de serviço	28
Lixão e aterros sanitários	21
Contaminação por óleo	8
Manejo de produtos químicos	7
Indústria de galvanoplastia	6
Indústria de metais	6
Pintura	5
Garagens	3
Outros (limpeza de embarcações; indústria madeireira; limpeza a seco; têxteis)	< 1

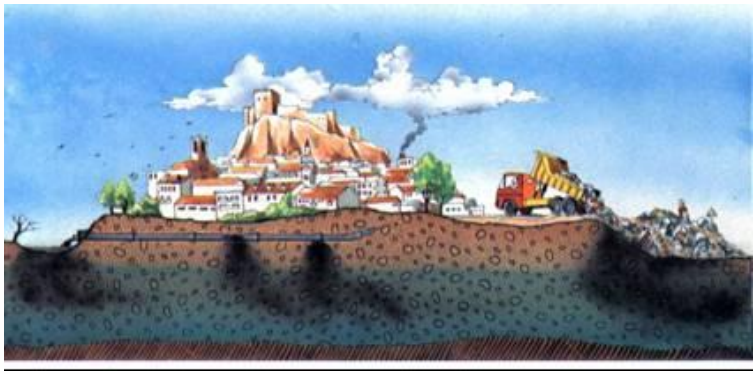
(Duijvernboaden 1985)

Fontes de poluição

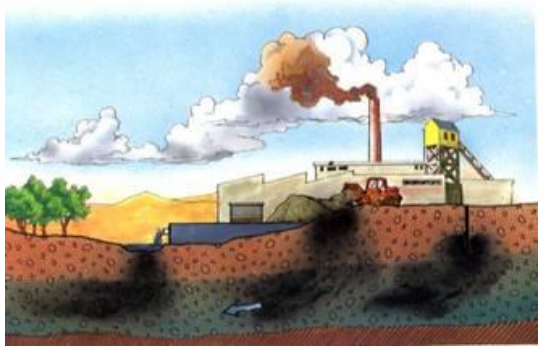


Uso intensivo de **adubos e pesticidas** em atividades agrícolas

Deposição de lixos urbanos em **aterros**



Deposição de **resíduos industriais sólidos e líquidos** ou de produtos que podem ser dissolvidos e arrastados por águas de infiltração em terrenos muito vulneráveis



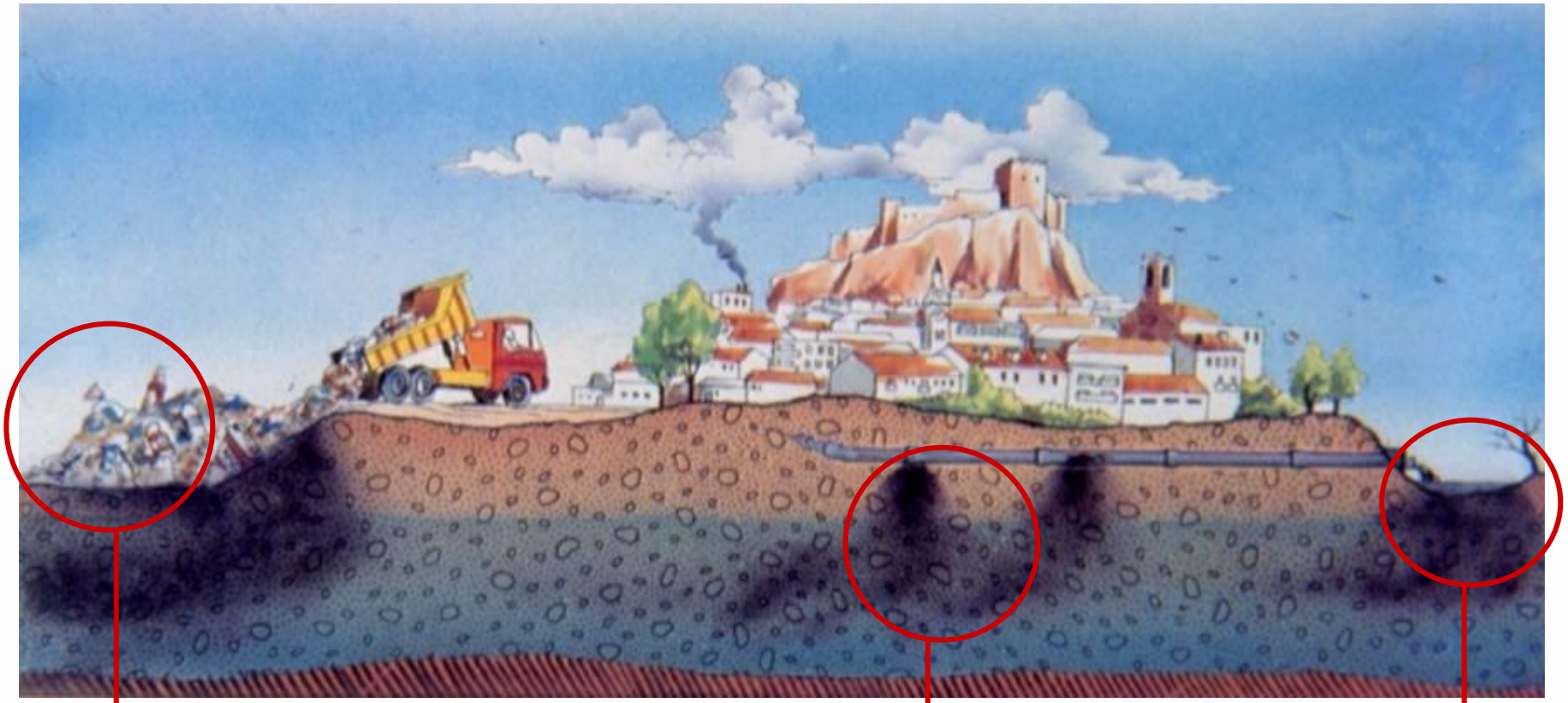


Construção incorreta de **fossas sépticas**

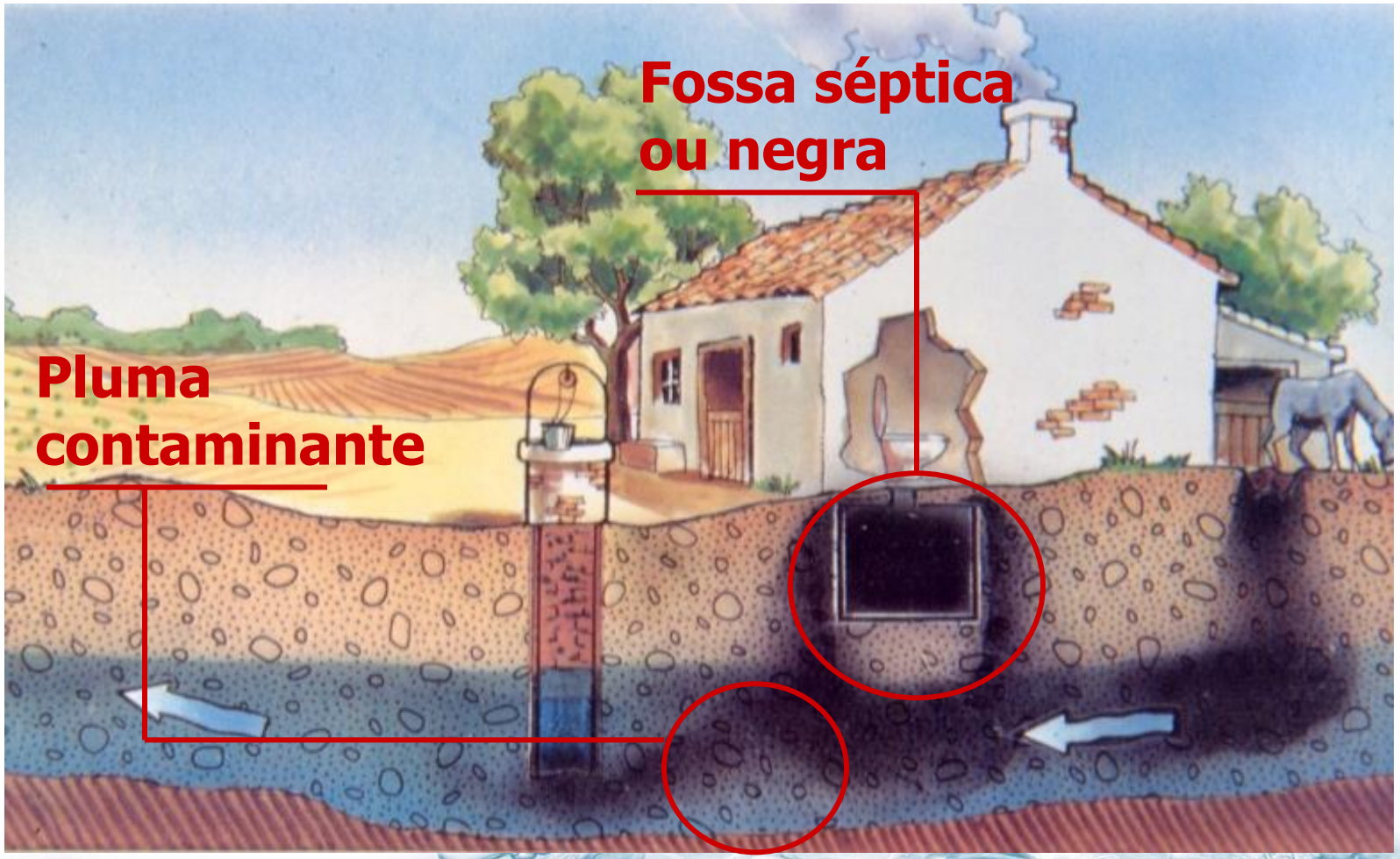
Deposição de **dejetos animais** resultantes de atividades agro-pecuárias



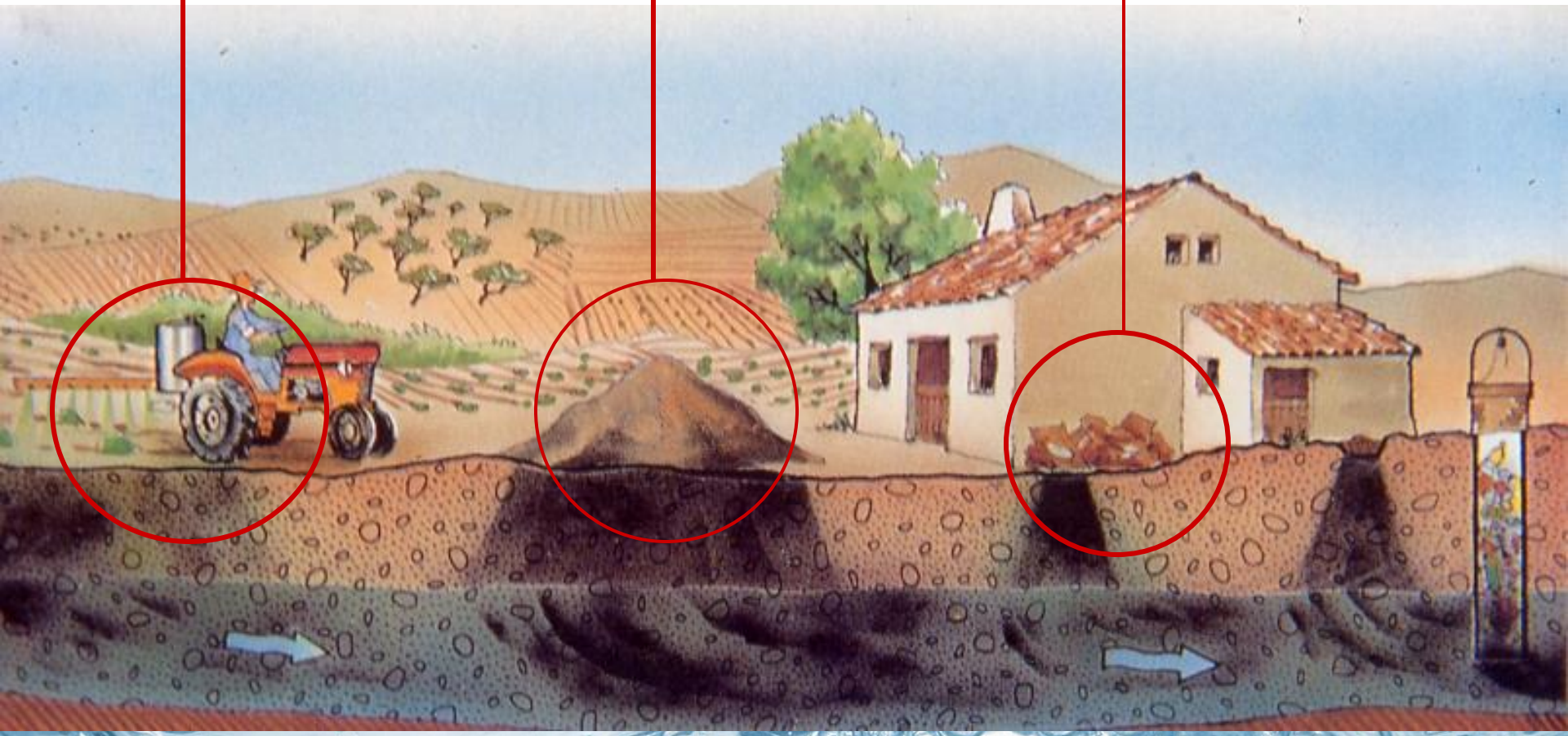
Fontes Potenciais de Contaminação Urbana



Contaminação por Sistema de Saneamento in situ



Fontes Potenciais de Contaminação Rural

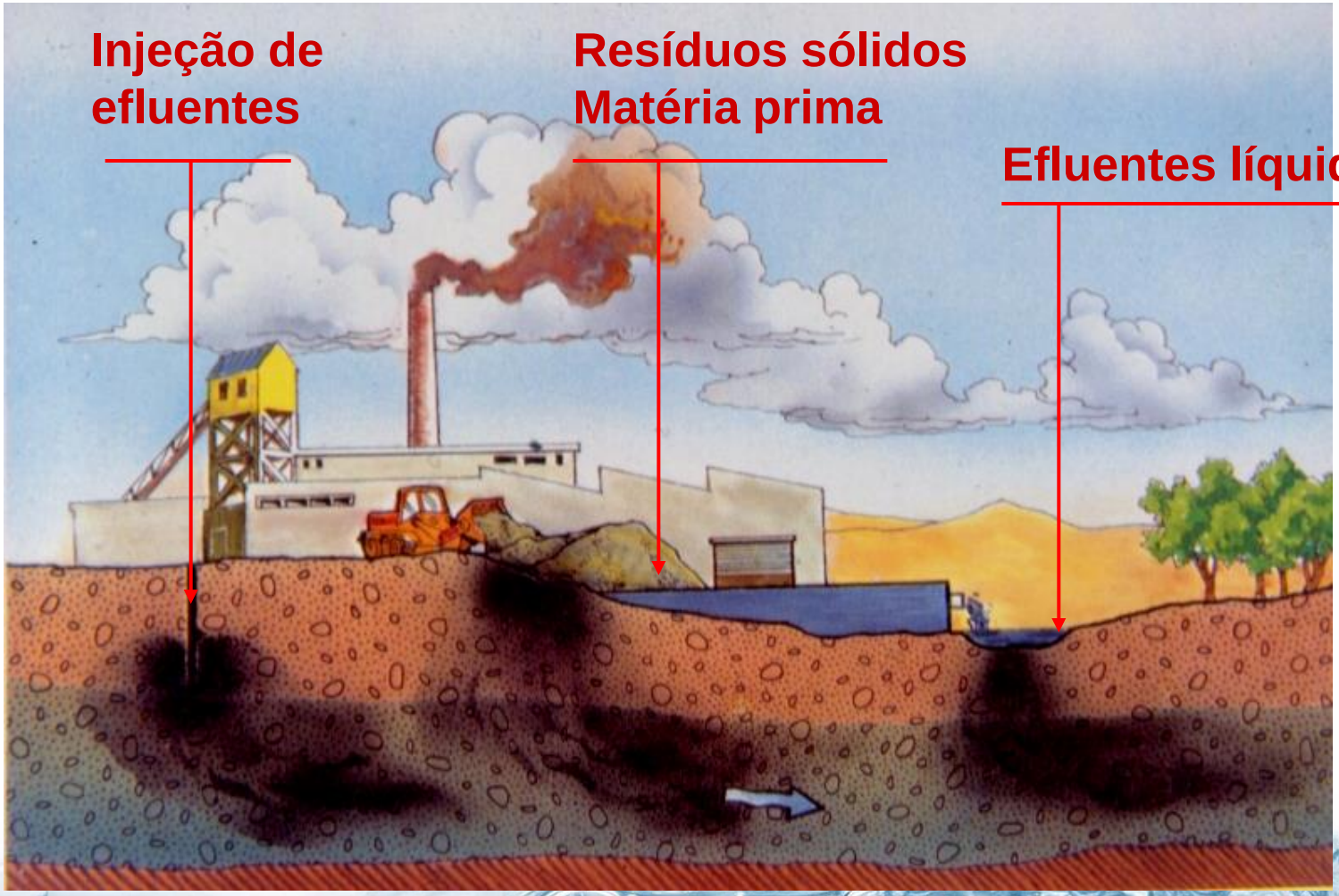


Fontes Potenciais de Contaminação Rural

Dejetos de Animais



Fontes Potenciais de Origem Industrial



Fontes Potenciais de Origem Industrial

Resíduos Industriais Tóxicos

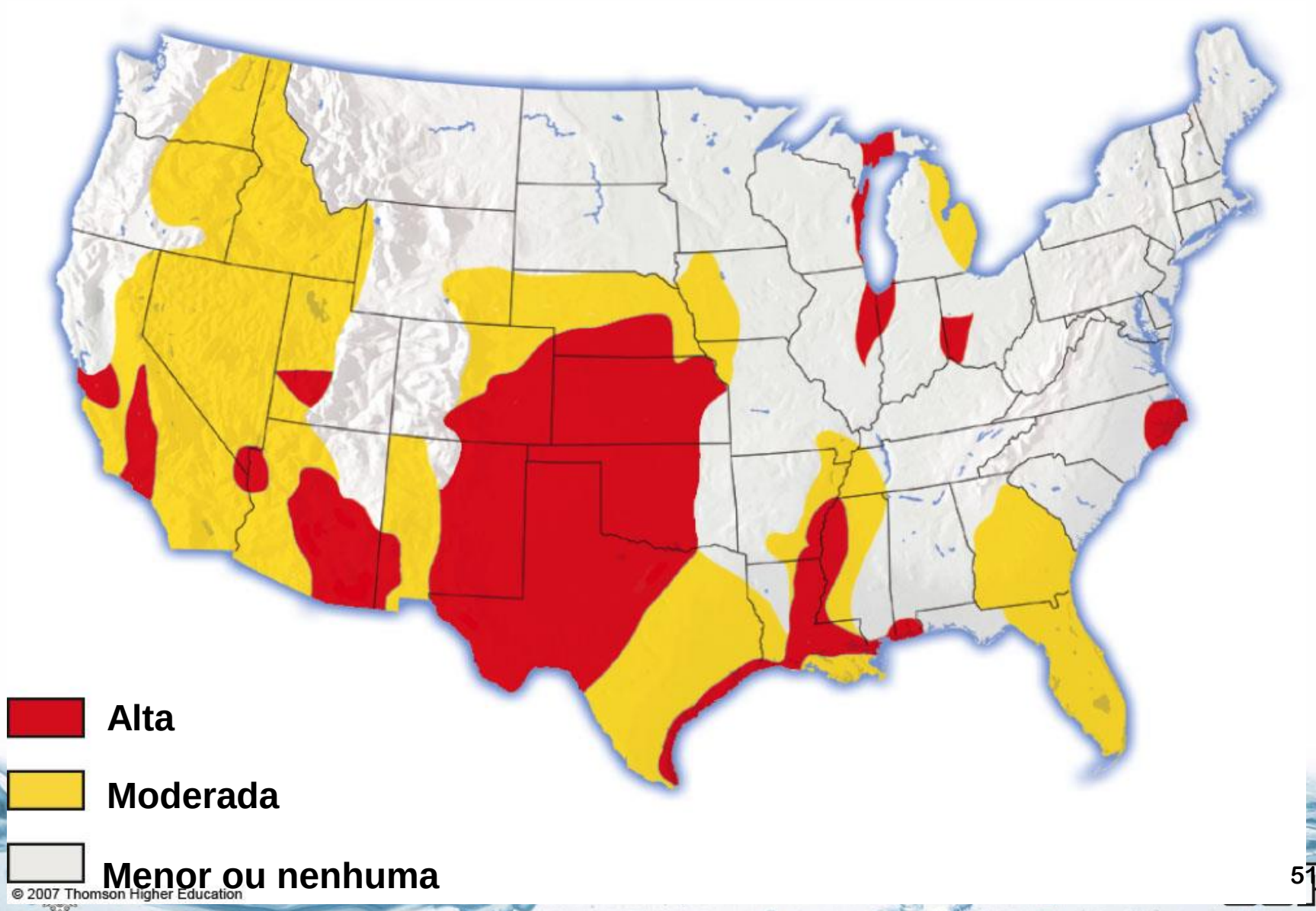


Consequências da Superexploração de Aquíferos

- Agravamento da contaminação do aquífero
- Subsidência
- Interferência no regime de poços vizinhos
- Queda do Nível do lençol freático ou da Superfície piezométrica, exigindo maiores bombeamentos
- Intrusão da cunha Salina

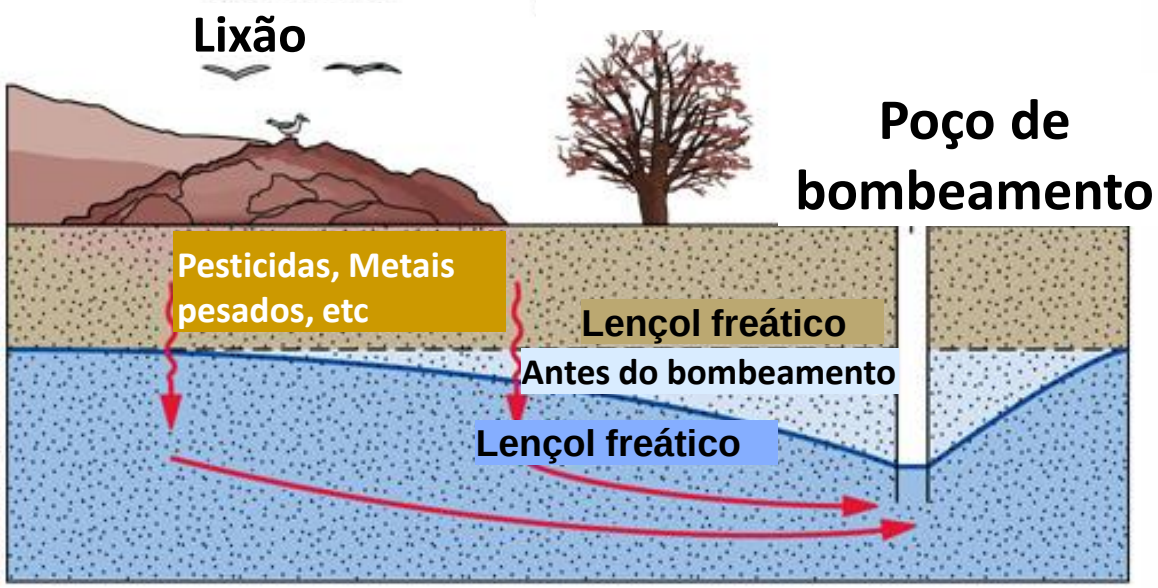
60% das cidades europeias exploram de forma excessiva as suas águas subterrâneas. Fonte: aprh

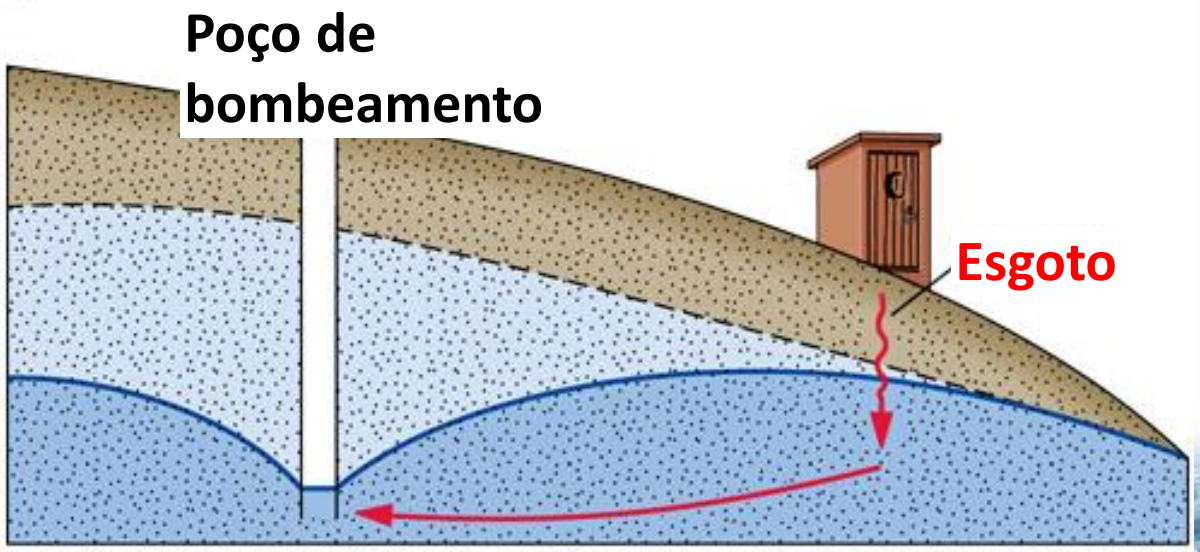
Excesso de Retirada de Água Subterrânea nos EUA



© 2007 Thomson Higher Education

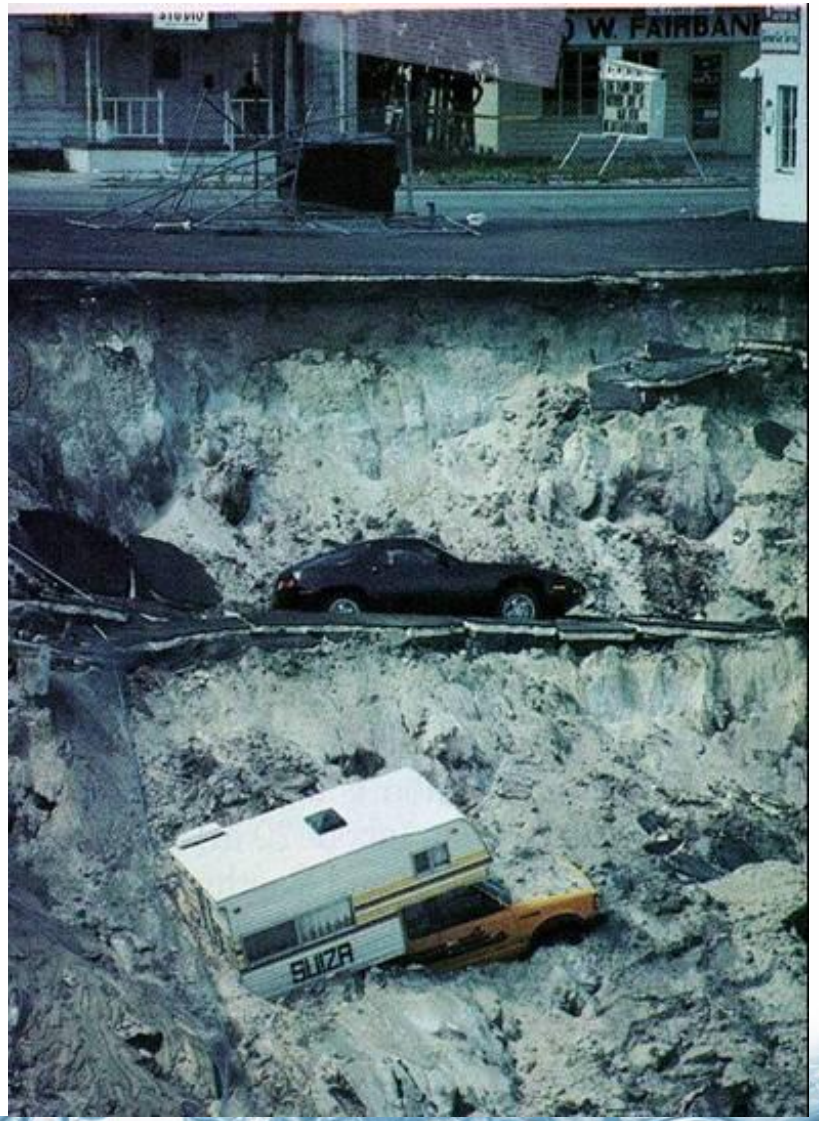
Agravamento da contaminação do aquífero por Bombeamento de poços





Adensamento de Camadas Subterrâneas: Subsidência





Partes da Cidade do México tiveram subsidência de mais de 10 metros nos últimos 70 anos, resultando em um grande problema nos sistemas de abastecimento de água e de coleta de esgotos.

Fonte: http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/grdwtr/e_gdwtr.htm

Adensamento de Camadas Subterrâneas

Subsidência

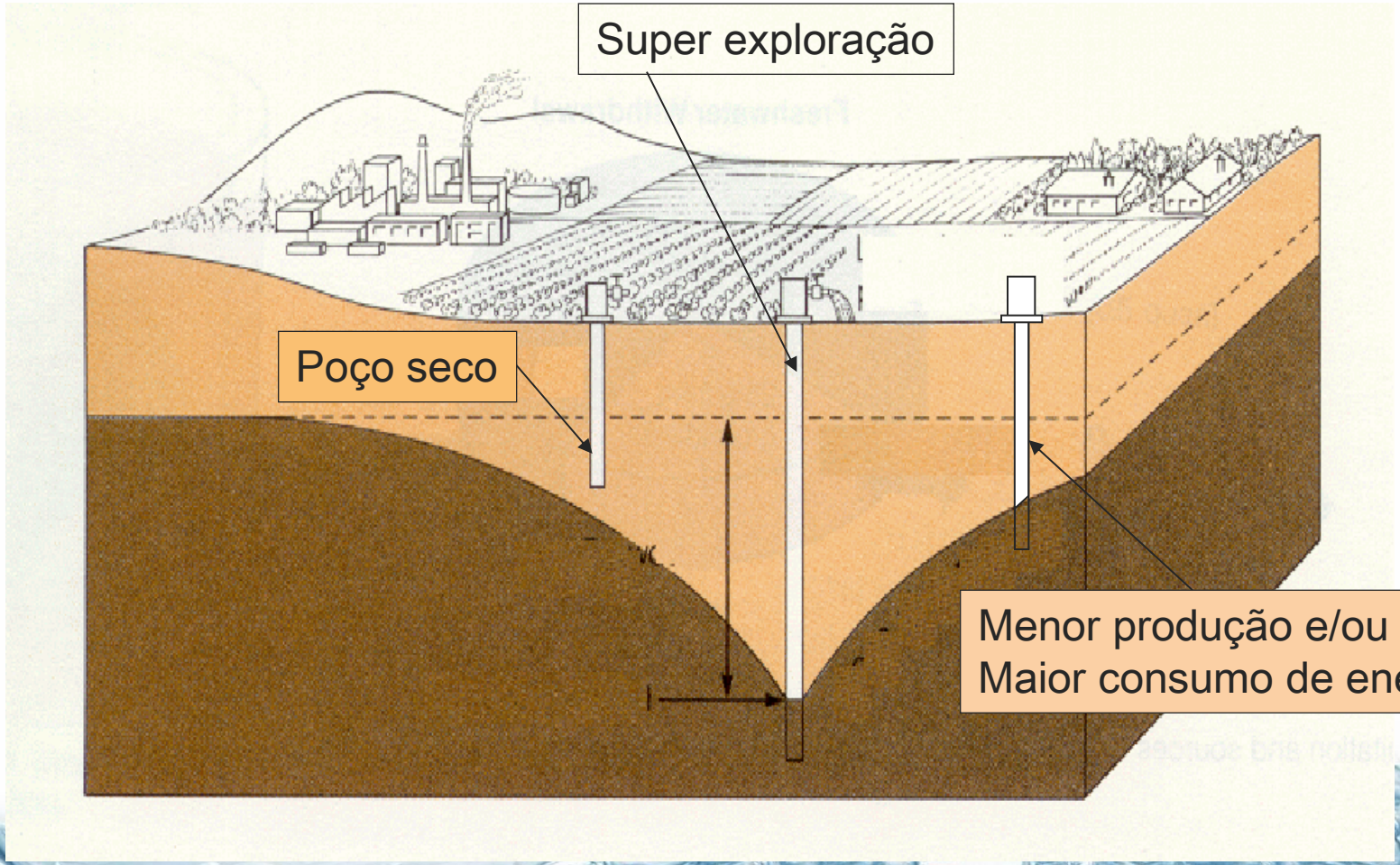


Adensamento de Camadas Subterrâneas

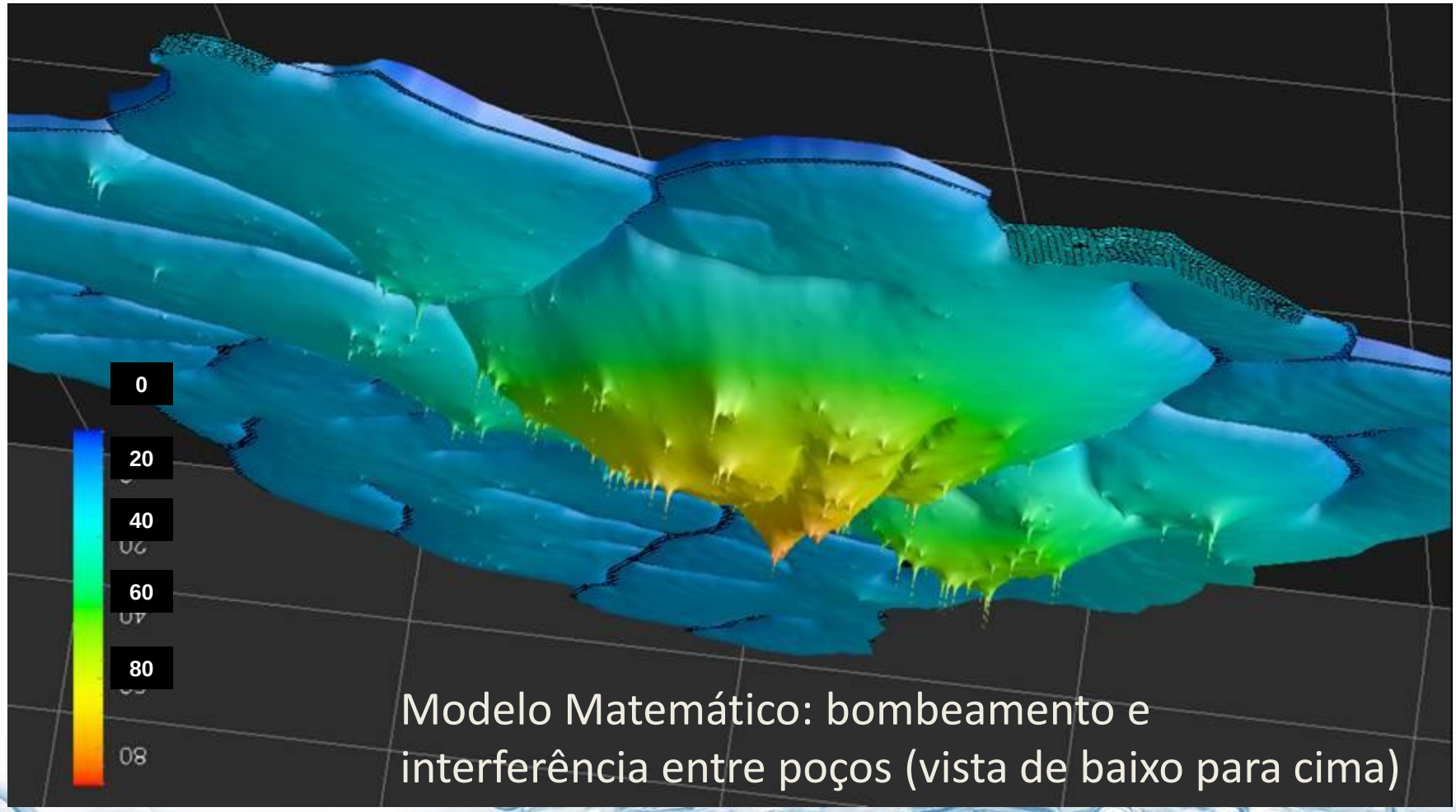
Subsidência



Interferência no Regime de Poços Vizinhos



Interferência no Regime de Poços Vizinhos



Modelo Matemático: bombeamento e interferência entre poços (vista de baixo para cima)

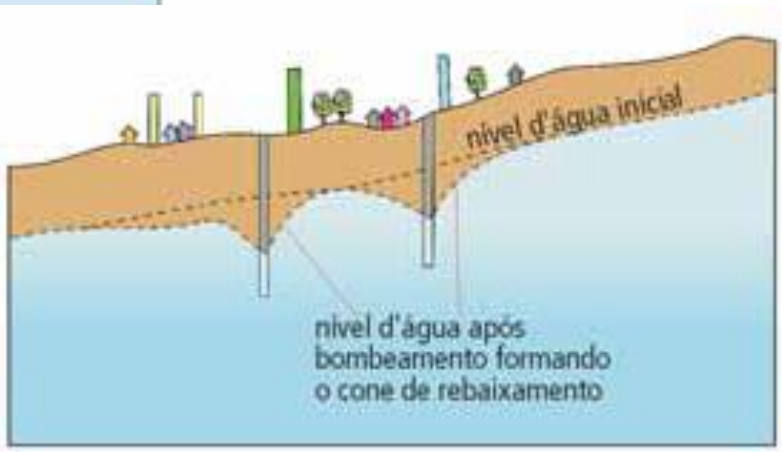
Queda do Lençol Freático e da Reserva de Água

Sem bombeamento

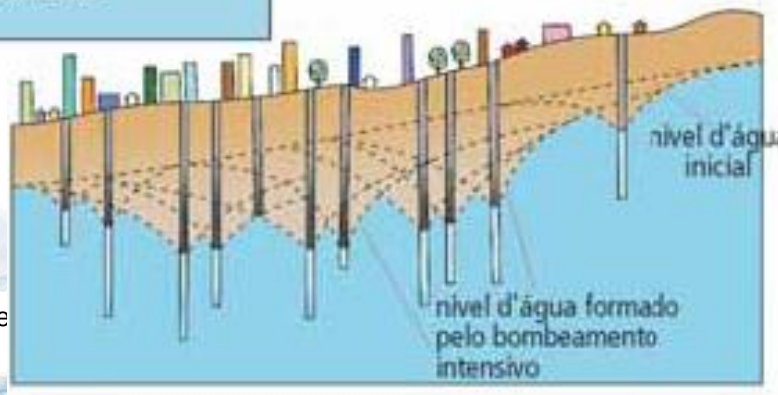


Interferência dos cones de rebaixamento e evolução da profundidade do nível da água em função do bombeamento contínuo e simultâneo de muitos poços

Bombeamento controlado



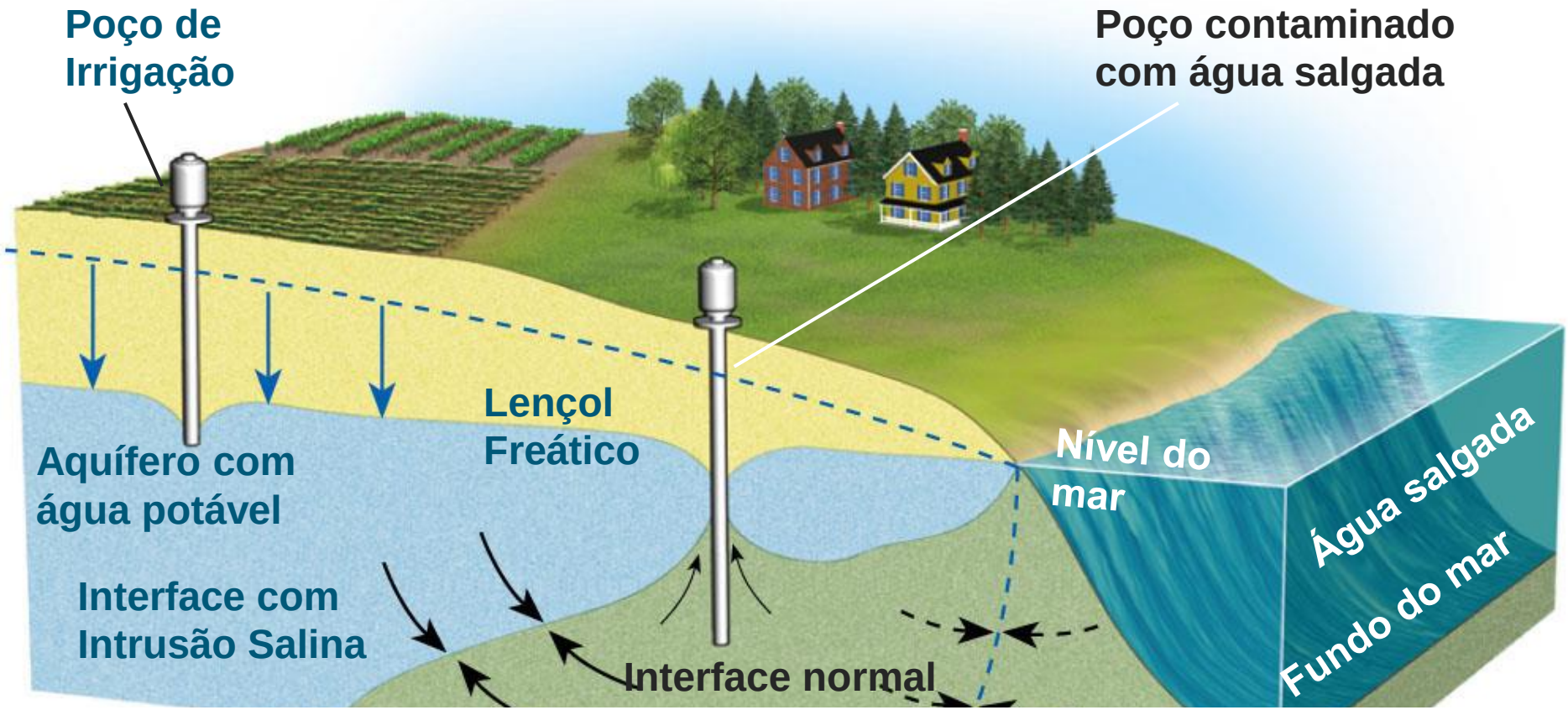
Bombeamento intensivo



Fonte: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Intrusão da Cunha Salina

Poço contaminado com água salgada



A exploração intensiva de água subterrânea dos AQUÍFEROS COSTEIROS causa um rebaixamento do lençol freático que pode gerar uma invasão progressiva da água do mar, resultante do avanço da interface água doce-água salgada, que resulta em uma contaminação salina da água subterrânea captada nos poços.

Proteção das Águas Subterrâneas

- **Mesmo quando seu uso não é para abastecimento humano, deve ser protegida, pois leva os contaminantes para os lagos e rios, que poderão abastecer muitas pessoas.**



Ribeirão Preto (SP) – Poço tubular corretamente construído e protegido.



Salto (SP) – Poço cacimba bem construído e protegido.

Fonte: http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/grdwtr/e_gdwtr.htm

Fotos: Iritani, M. A. e Ezaki, S. - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Cadernos de Educação Ambiental. São Paulo : Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2008.104p.

Desvantagens da Utilização da Água Subterrânea

- Quando contem excesso de minerais pode ter tratamento difícil (ex: excesso de flúor)
- Quando o aquífero está contaminado, sua descontaminação é cara e demorada (décadas ou séculos)
- Se houver superexploração pode causar: subsidência do solo, intrusão da cunha salina, agravar a contaminação do aquífero e aumentar o custo de bombeamento
- Pode reduzir a contribuição de vazão básica aos cursos dágua.
- Em alguns aquíferos as vazões exploráveis podem não atender a grandes demandas.

Vantagens da Utilização da Água Subterrânea

- Geralmente dispensa tratamento
- Geralmente dispensa adutoras
- Escalonamento mais favorável das obras
- Os mananciais subterrâneos são naturalmente mais bem protegidos dos agentes poluidores
- Reserva confiável se não for super explorada
- Nas pequenas e médias cidades, o abastecimento é facilmente atendido por poços tubulares
- Prazos de execução são mais curtos e de menor custo

Definições

- **Aquiclude** – formação ou corpo geológico que, embora contendo água no seu interior, por vezes até à saturação, não permite a sua circulação, tornando impossível a sua exploração.
- **Aquífero** – formação geológica que contém água e a pode ceder em quantidades economicamente aproveitáveis.
- **Aquífero confinado** – aquífero cujo teto e muro são constituídos por aquicludes. A superfície piezométrica situa-se acima do respectivo teto e a pressão da água é sempre superior à pressão atmosférica.
- **Aquífero livre** – aquífero que não é limitado superiormente por uma camada impermeável. O limite superior é o constituído por uma superfície de saturação onde a água está à pressão atmosférica.
- **Aquitarde** – formação geológica que contém apreciável quantidade de água mas a transmite muito lentamente, tornando impossível a sua exploração direta.
- **Coeficiente de armazenamento** – razão entre o volume de água cedido por uma coluna de aquífero de seção unitária, sob a ação de uma queda do nível piezométrico e o valor dessa queda.
- **Condutividade hidráulica** – parâmetro que expressa a permeabilidade de um meio.
- **Cone de depressão -** Rebaixamento do nível de água causada pelo movimento convergente da água no aquífero quando bombeada, resultando em um cone de depressão em torno do poço. A sua forma e dimensão dependem das características hidráulicas do aquífero e pode ser determinado a partir dos dados obtidos no teste de vazão.
- **Nível piezométrico** – é o nível a que a água de um aquífero se encontra à pressão atmosférica. Coincide com a superfície freática de um aquífero livre.
- **Lei de Darcy** – lei empírica que descreve o movimento da água subterrânea à escala macroscópica. Estabelece a relação entre o escoamento, a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico.
- **Permeabilidade** – Num sentido qualitativo expressa a maior ou menor facilidade com que um meio se deixa atravessar por um dado fluído.
- **Poço artesiano** – poço que intercepta um aquífero artesiano (confinado).
- **Poço artesiano jorrante** – é o poço em que a água sai espontaneamente sem necessidade de bombeamento.
- **Porosidade** – razão entre o volume de vazios, ocupados por água ou ar, de um material e o seu volume total.
- **Transmissividade** – é o produto da condutividade hidráulica horizontal pela espessura do aquífero.

Fonte: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos

Aula 25

Fim