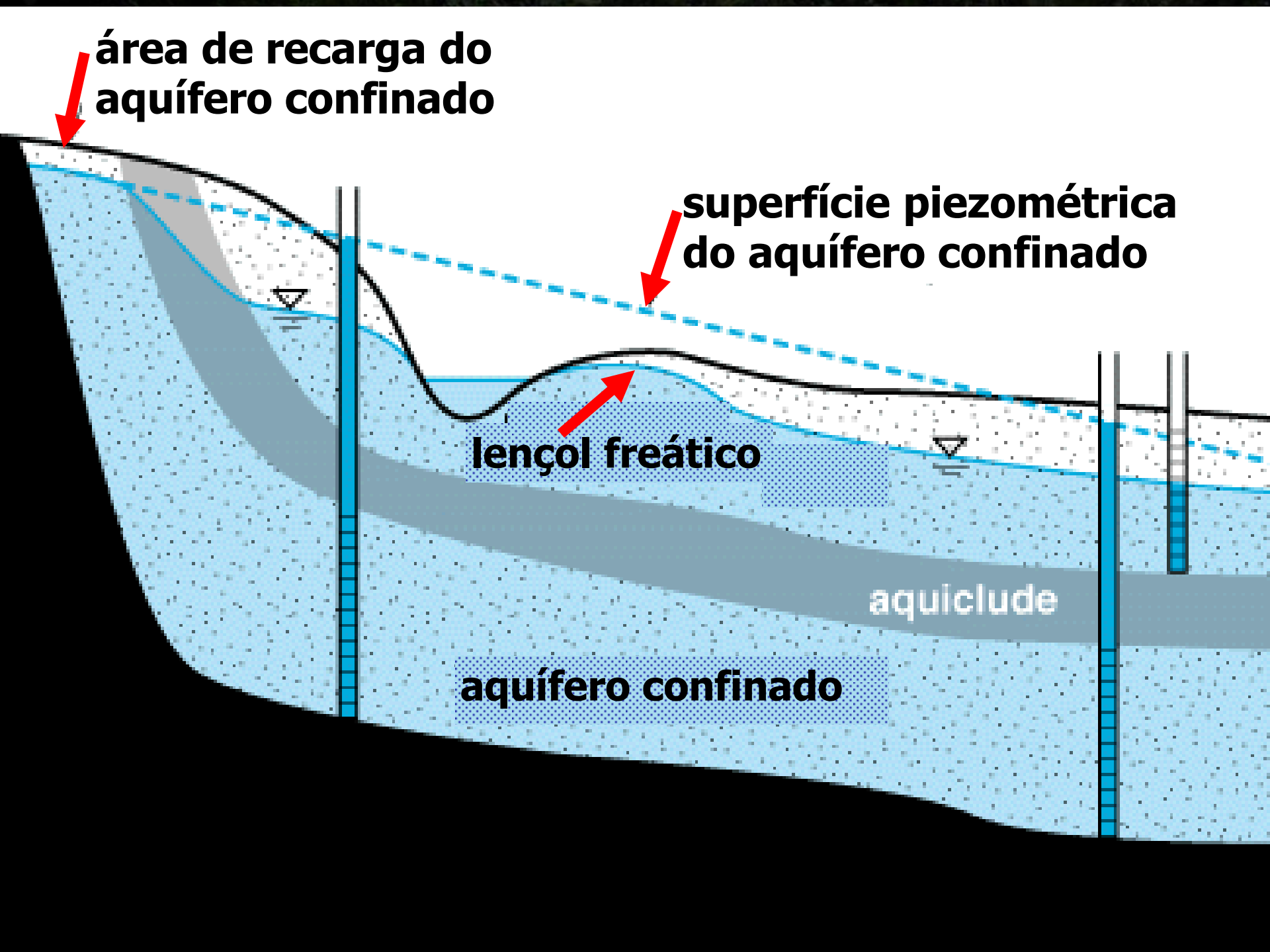
Escola Politécnica da USP
Depto. de Engenharia Hidráulica e Sanitária

PHD2307 - Hidrologia Aplicada

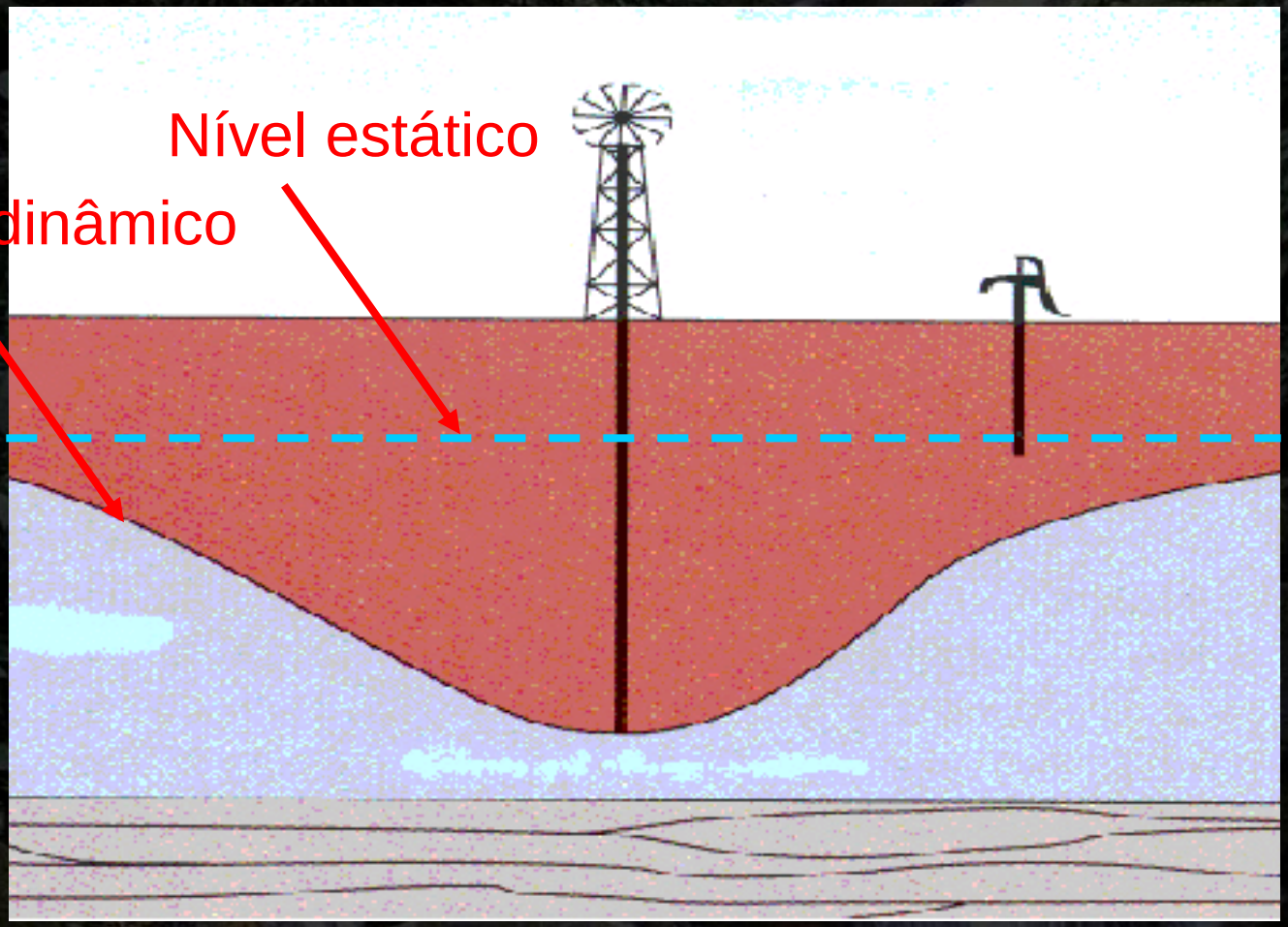
Águas Subterrâneas (2)

Prof. Dr. Kamel Zahed Filho

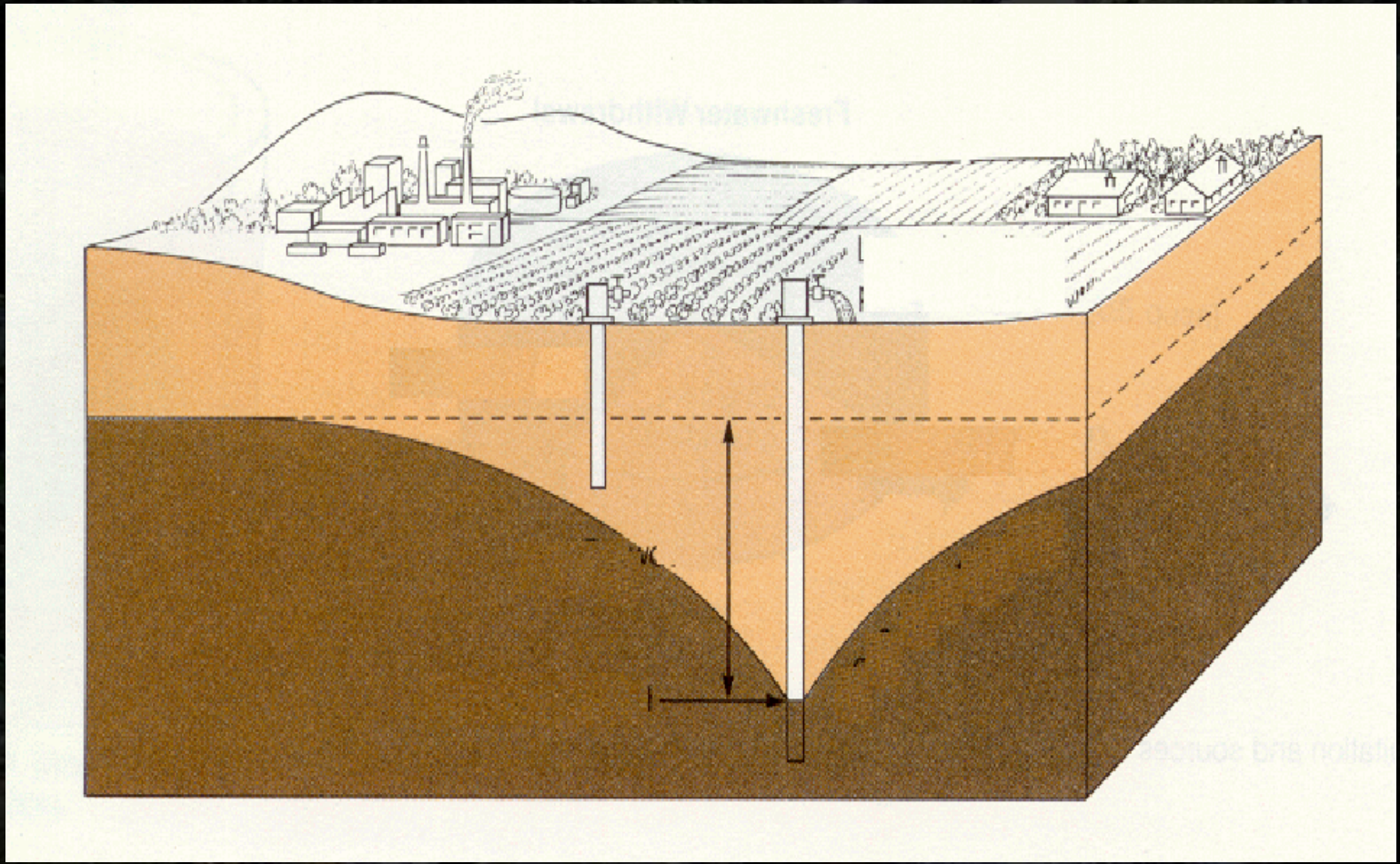
Prof. Dr. Renato Carlos Zambon


área de recarga do aquífero confinado
superfície piezométrica do aquífero confinado
lençol freático
aquiclude
aquífero confinado

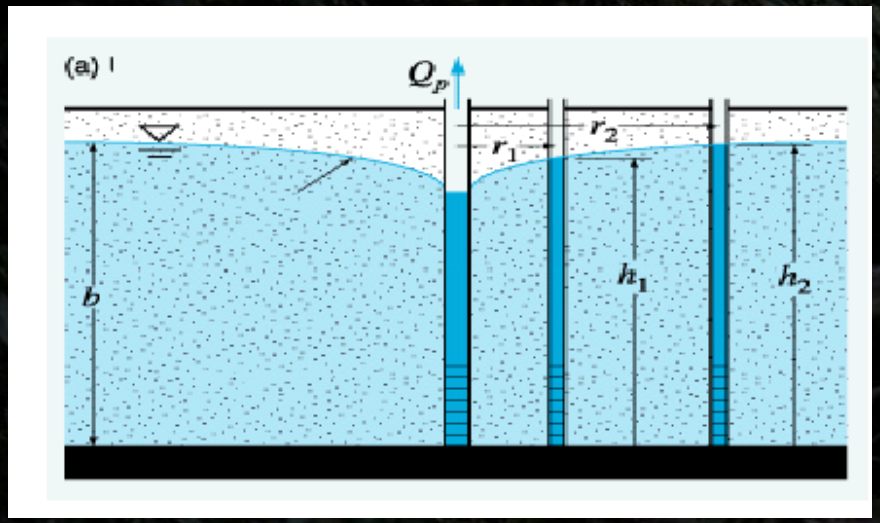
Exploração de Águas Subterrâneas
Poços Tubulares



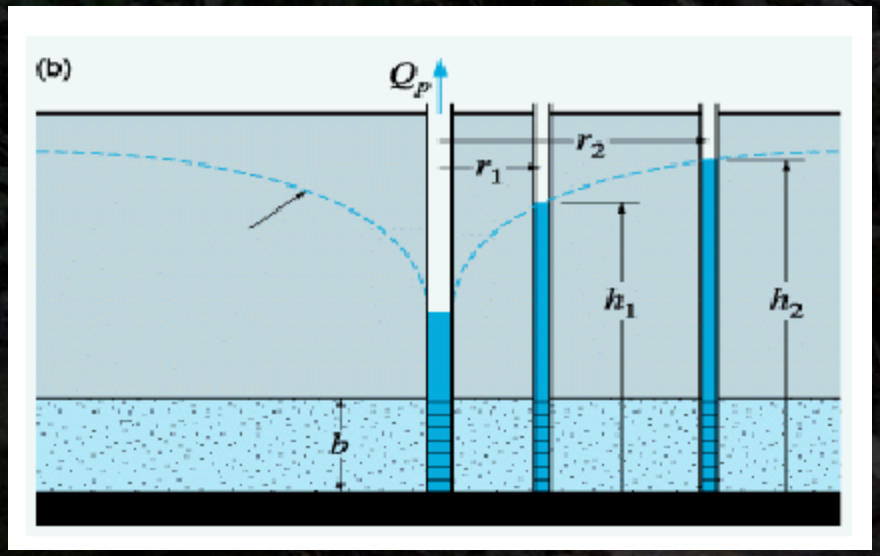
Cone de Depressão



Cone de Depressão

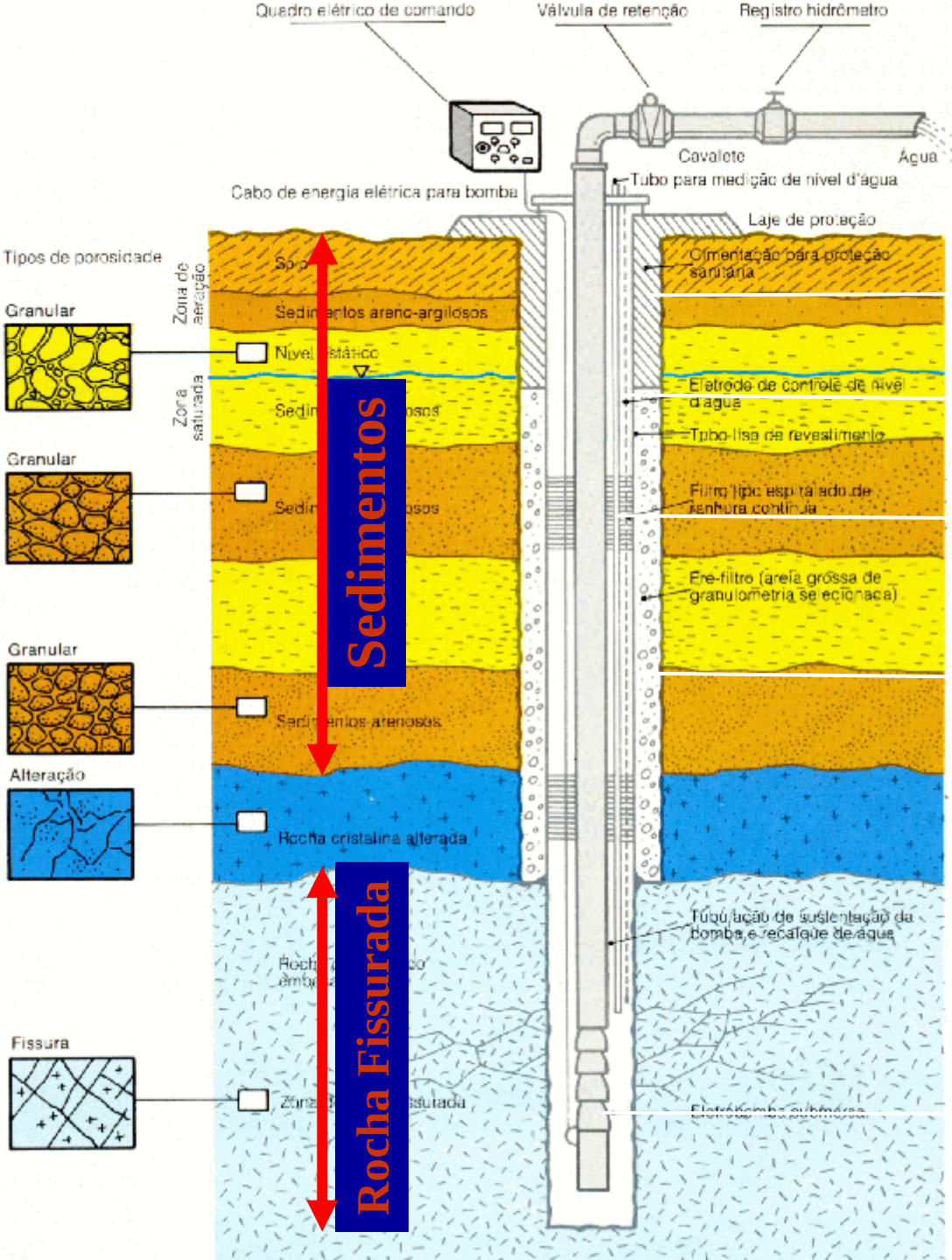


Aquífero freático: a linha piezométrica coincide com a superfície de saturação (lençol freático)



Aquífero confinado: está sempre saturado, a linha piezométrica está sempre acima do limite do aquífero

Poço Profundo Exemplo



Proteção

Revestimento

Filtro

Pré filtro

Bomba

Exploração de Poços Profundos em Regime não Permanente

Charles Vernon Theis (1900-1987)

United States Geological Service (1935)

Produção de um poço: Fórmula de Theis

- Regime não permanente
- Aquífero confinado
- Vazão Q usualmente em m^3/h
- Quanto maior a vazão Q maior a depressão do cone
- Quanto mais tempo bombeia maior a depressão do cone

$$Q = f(z, t)$$

A função é definida quando se conhecem dois parâmetros básicos:

- T: transmissividade do aqüífero e
- S: coeficiente de armazenamento do aquífero

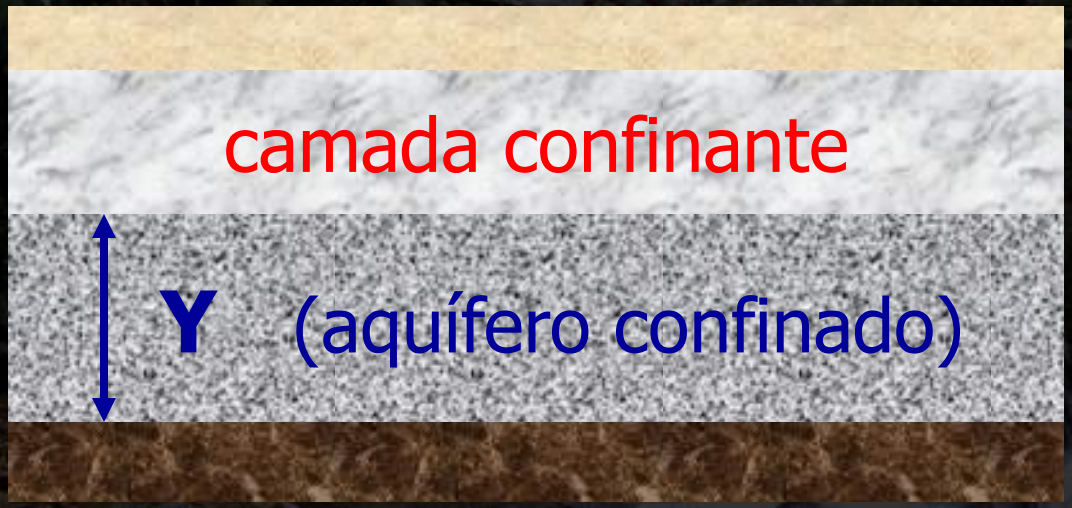
Transmissividade

$$T = K \cdot Y$$

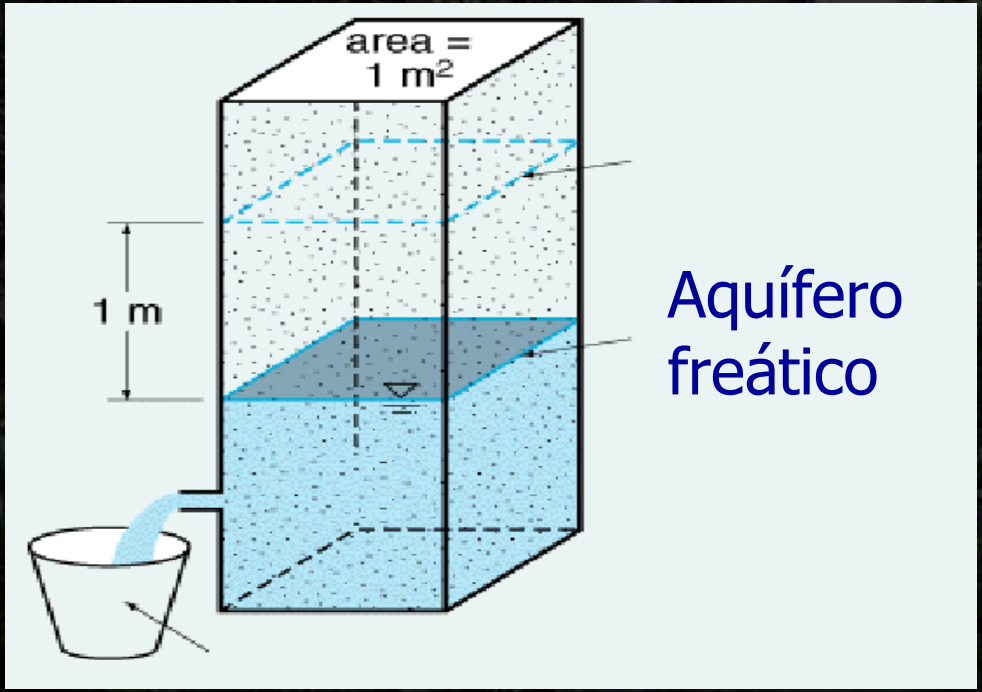
T: transmissividade do aqüífero (m^2/dia)

Y: espessura do aquífero (m)

K: condutividade hidráulica (m/dia)

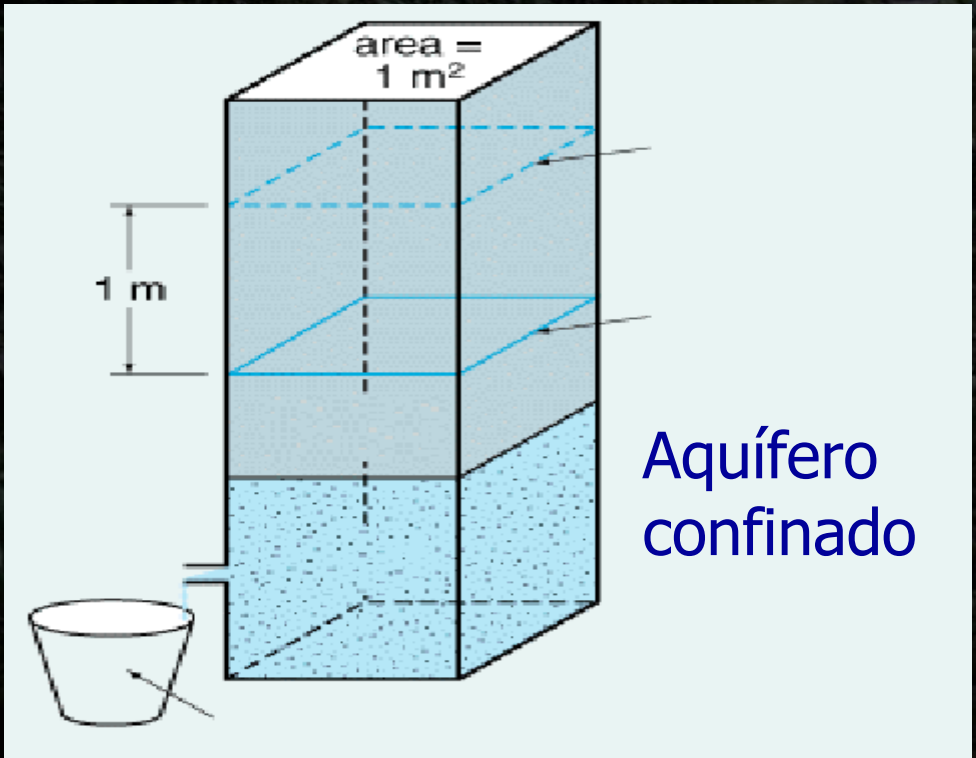


Coeficiente de Armazenamento



coeficiente de armazenamento S é o volume de água liberado por unidade de área do aquífero quando a linha piezométrica abaixa 1 m

Coeficiente de Armazenamento



coeficiente de armazenamento S é o volume de água liberado por unidade de área do aquífero quando a linha piezométrica abaixa 1 m

Equação do Poço de Theis

$$z = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} W(u)$$

$$Q = f(z,t)$$

W(u) não pode ser integrada explicitamente...

O desenvolvimento em série resulta:

$$W(u) = -0{,}5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} \ldots$$

onde: $$u = \frac{r^2 S}{4 \cdot T \cdot t}$$

Equação Simplificada

Quando "u" é pequeno (u<0,1):

$$z = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left[-0{,}5772 - \ln(u)\right]$$

$$z = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left[-0{,}5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4 \cdot T \cdot t}\right)\right]$$

Fórmula de Theis Simplificada

$$z = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left[-0{,}5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4 \cdot T \cdot t}\right)\right]$$

- z: rebaixamento em um poço de observação (m)
- T: transmissividade (m²/dia)
- S: coeficiente de armazenamento (-)
- r: distância ao poço de observação (m)
- t: tempo contínuo de bombeamento (dia)

Aplicações Práticas da Fórmula de Theis

- Cálculo da produção e do rebaixamento de poços (problema direto)
- Ensaio de bombeamento para determinação dos parâmetros T e S (problema inverso)

Exemplo: Cálculo da produção e do rebaixamento de poços (problema direto)

Um poço está localizado em um aquífero cuja conditividade hidráulica é de 15 m/dia e o coeficiente de armazenamento 0,005. O aquífero tem 20 m de espessura e está sendo bombeado com uma vazão constante de 2500 m³/dia. Qual é o rebaixamento a uma distância de 7 m do poço após um dia de bombeamento?

$$z = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \underbrace{\left[-0{,}5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4 \cdot T \cdot t} \right) \right]}_{7{,}94}$$

T = 20 m x 15 m/dia
= 300 m²/dia

2500 m³/dia =
104 m³/h = 29 l/s

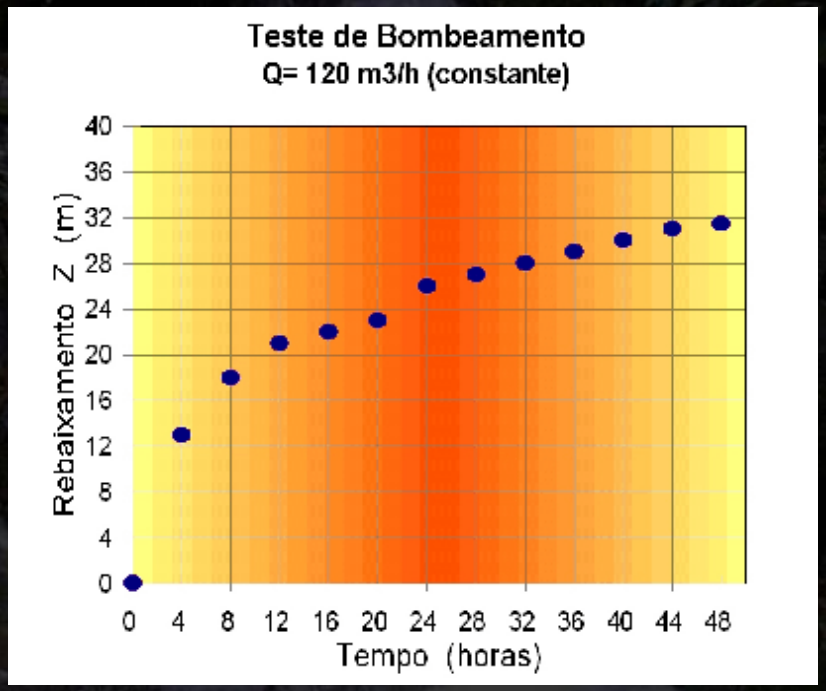
$$Z = \frac{2500 \text{ m}^3/\text{dia} \times 7{,}94}{4 \times \pi \times 300 \text{ m}^2/\text{dia}} = 5{,}2 \text{ m}$$

Ensaio de bombeamento para determinação dos parâmetros T e S (problema inverso)

$$z = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left[-0{,}5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4 \cdot T \cdot t}\right)\right]$$

Determinar T e S a partir de um conjunto de observações de Z ao longo do tempo t, para uma vazão constante Q

VALORES OBSERVADOS		
t(h)	t (dias)	Zobs
1	0.0417	0.60
2	0.0833	1.40
3	0.1250	2.40
4	0.1667	2.90
5	0.2083	3.30
6	0.2500	4.00
8	0.3333	5.20
10	0.4167	6.20
12	0.5000	7.50
18	0.7500	9.10
24	1.0000	10.50
48	2.0000	##########



Solução

Adotar valores iniciais de T e S na equação:

$$z = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T}\left[-0{,}5772 - \ln\left(\frac{r^2 S}{4 \cdot T \cdot t}\right)\right]$$

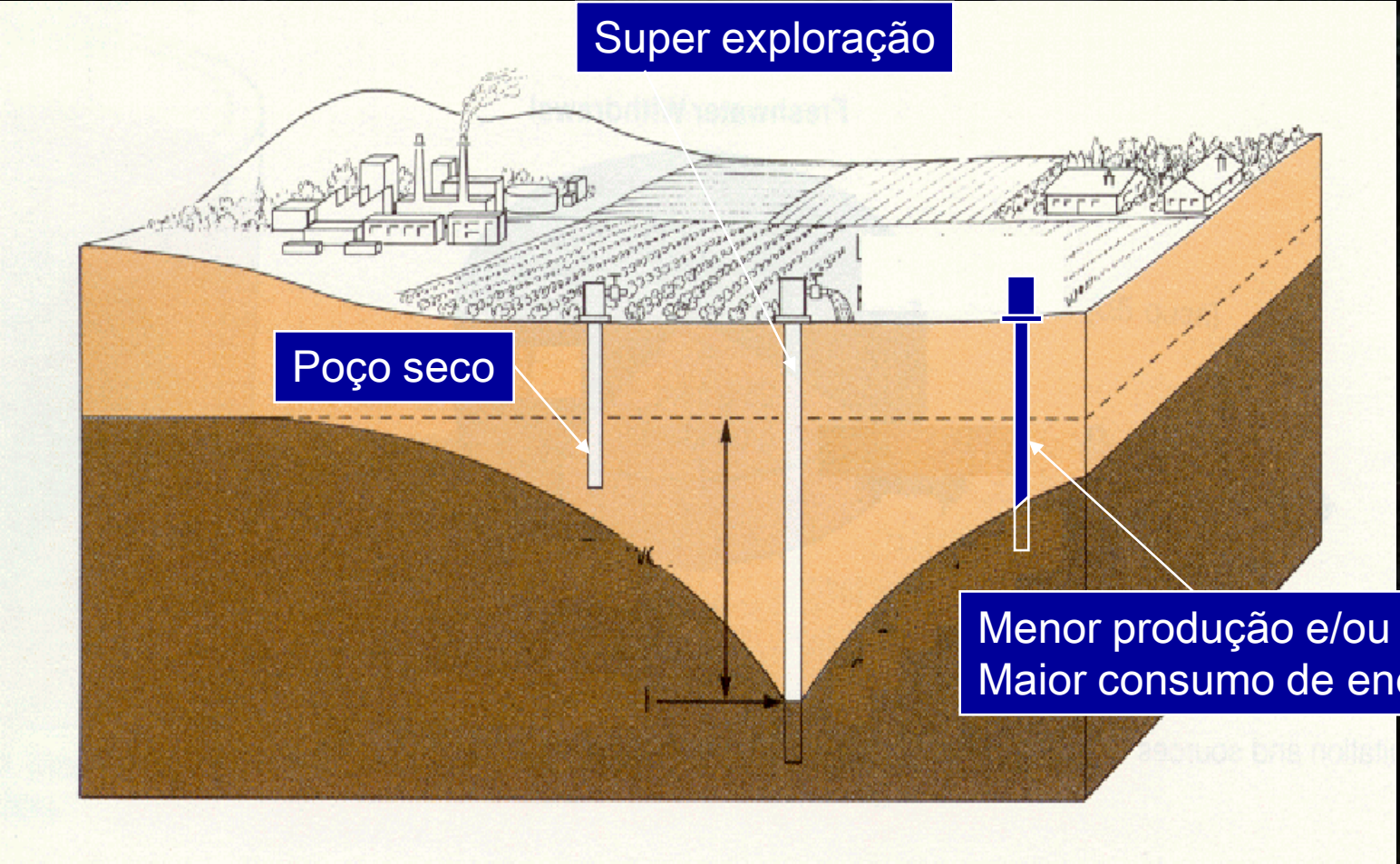
VALORES OBSERVADOS			VALORES CALCULADOS				
t(h)	t (dias)	Zobs	Zcalc	Desv^2	u	ln(u)	W(u)
1	0.0417	0.60	-0.72	1.752	0.8315	-0.18457	-0.39263
2	0.0833	1.40	0.55	0.716	0.4157	-0.87772	0.30052
3	0.1250	2.40	1.30	1.208	0.2772	-1.28319	0.70599
4	0.1667	2.90	1.83	1.143	0.2079	-1.57087	0.99367
5	0.2083	3.30	2.24	1.119	0.1663	-1.79401	1.21681
6	0.2500	4.00	2.58	2.021	0.1386	-1.97633	1.39913
8	0.3333	5.20	3.11	4.375	0.1039	-2.26402	1.68682
10	0.4167	6.20	3.52	7.185	0.0831	-2.48716	1.90996
12	0.5000	7.50	3.86	13.282	0.0693	-2.66948	2.09228
18	0.7500	9.10	4.60	20.225	0.0462	-3.07495	2.49775
24	1.0000	10.50	5.13	28.806	0.0346	-3.36263	2.78543
48	2.0000	##########	6.41	41.091	0.0173	-4.05578	3.47858

Utilizar o “solver” para determinar T e S

Problemas oriundos da superexploração de aquíferos

- Interferência no regime de poços vizinhos
- Adensamento de camadas subterrâneas
- Intrusão salina
- Agravamento de problemas de poluição

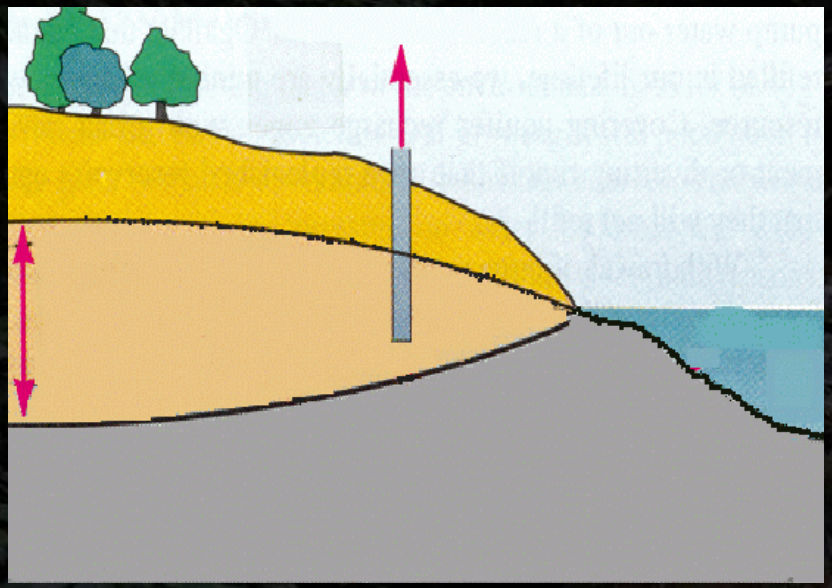
Interferência no regime de poços vizinhos

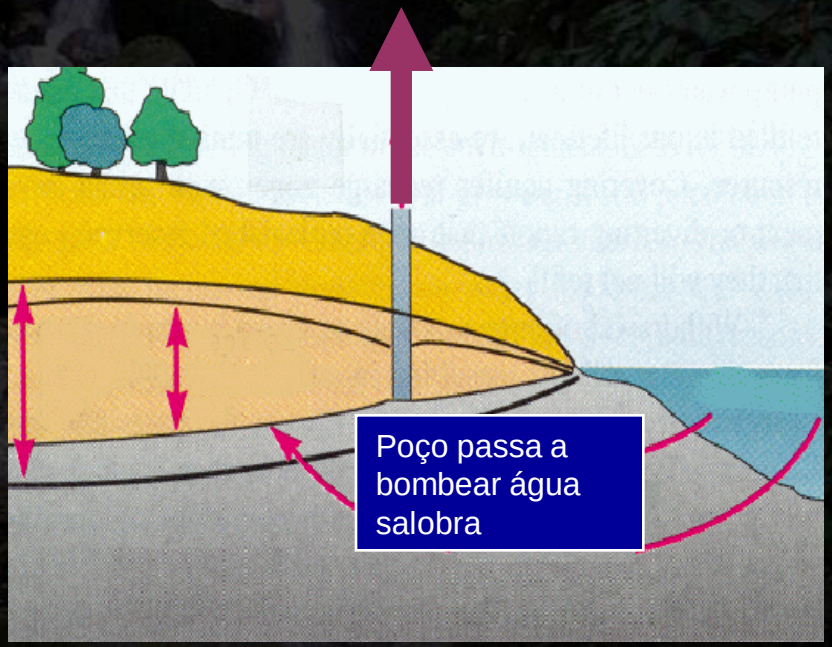


Adensamento de camadas subterrâneas

Adensamento de camadas subterrâneas

Intrusão salina





Problemas oriundos da superexploração de aquíferos

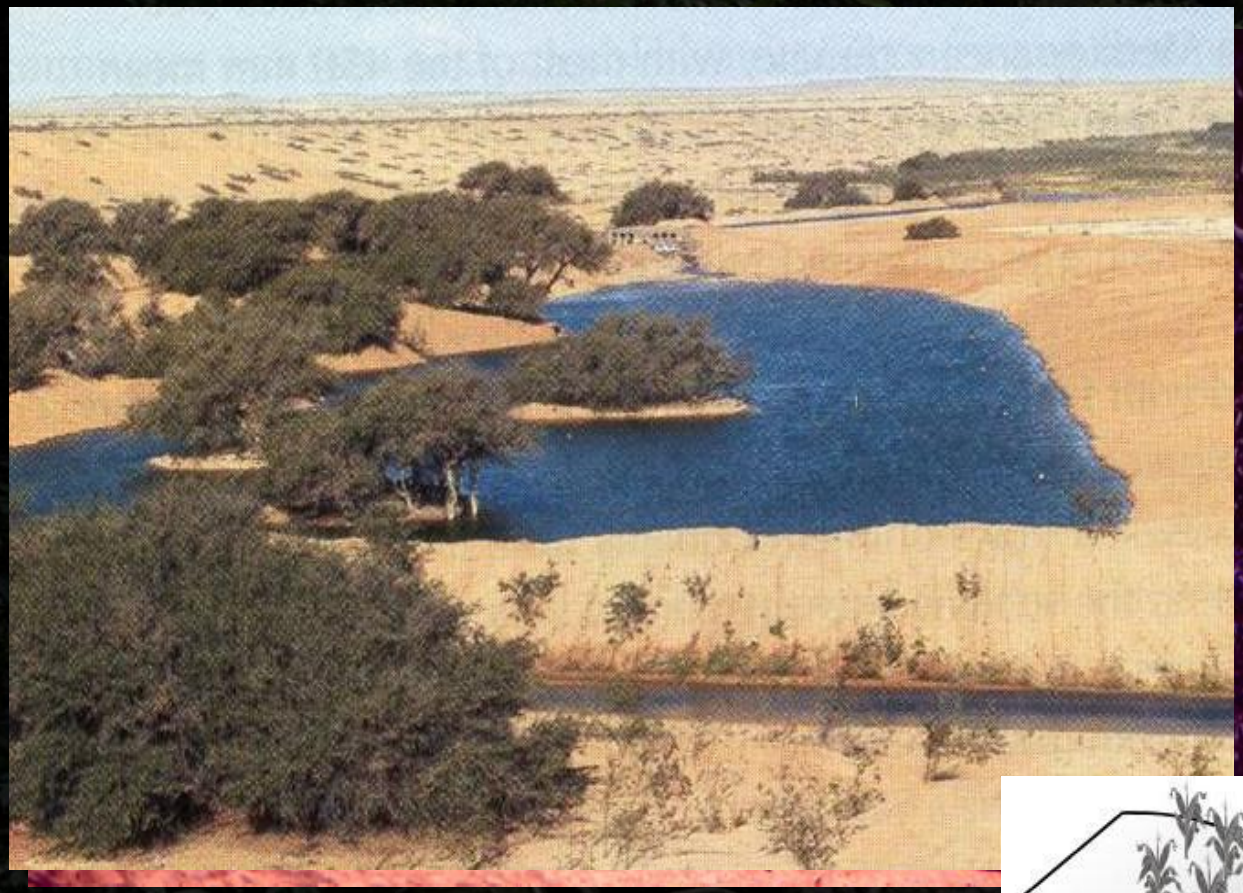
INTERFERÊNCIA REVERSÍVEL

- **bombeamento e custos crescentes**
- **rendimento dos poços decrescente**
- **fluxo base e fontes decrescentes**

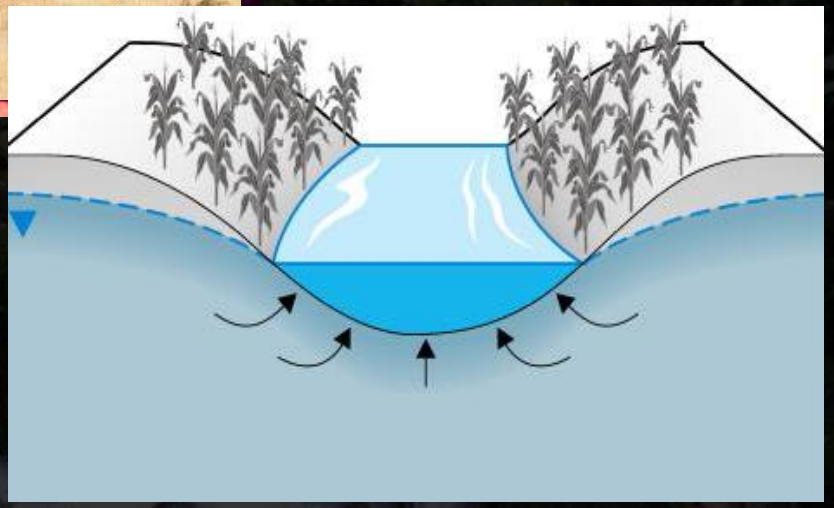
- **stress na vegetação freatófita**
- **compactação de aqüíferos**
- **redução da transmissibilidade**

DETERIORAÇÃO IRREVERSÍVEL

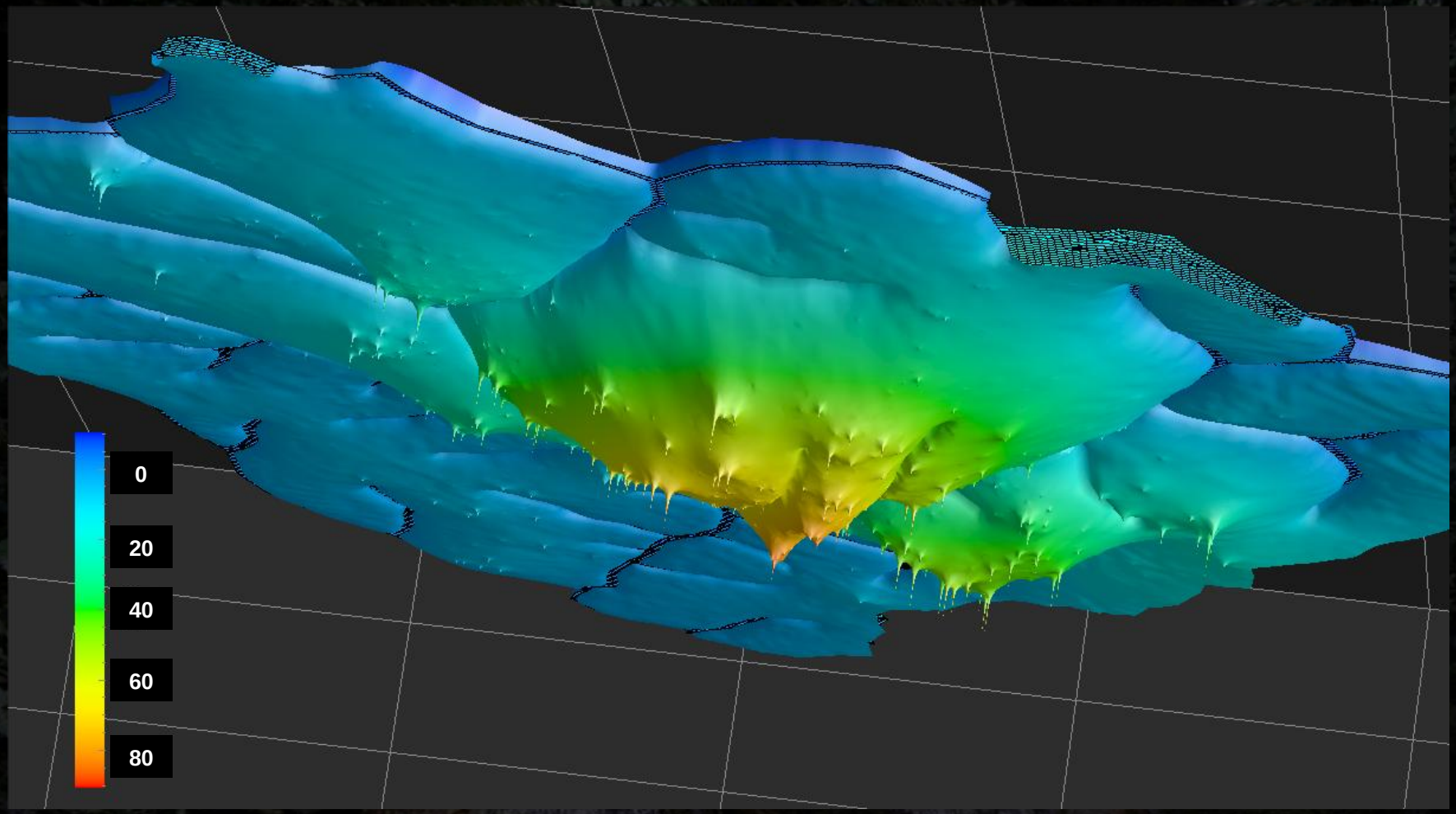
- **intrusão de água salgada**
- **ingresso de água contaminada**
- **assentamento do terreno e impactos relacionados**



A descarga das águas subterrâneas mantém corpos de água superficiais



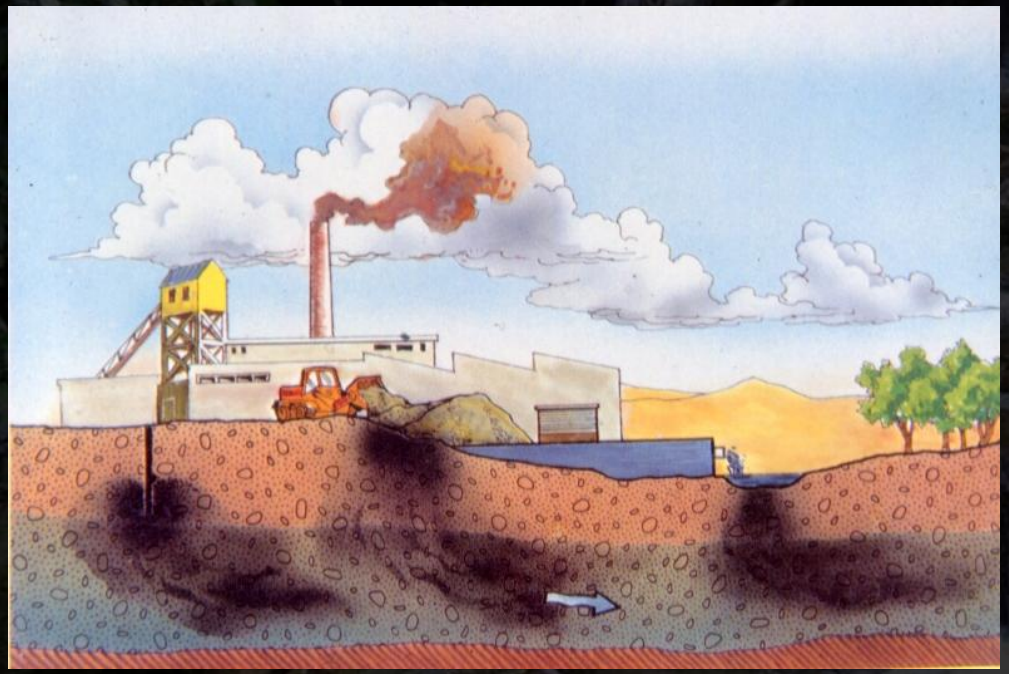
A contaminação ou a superexploração de um afeta o outro



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

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.



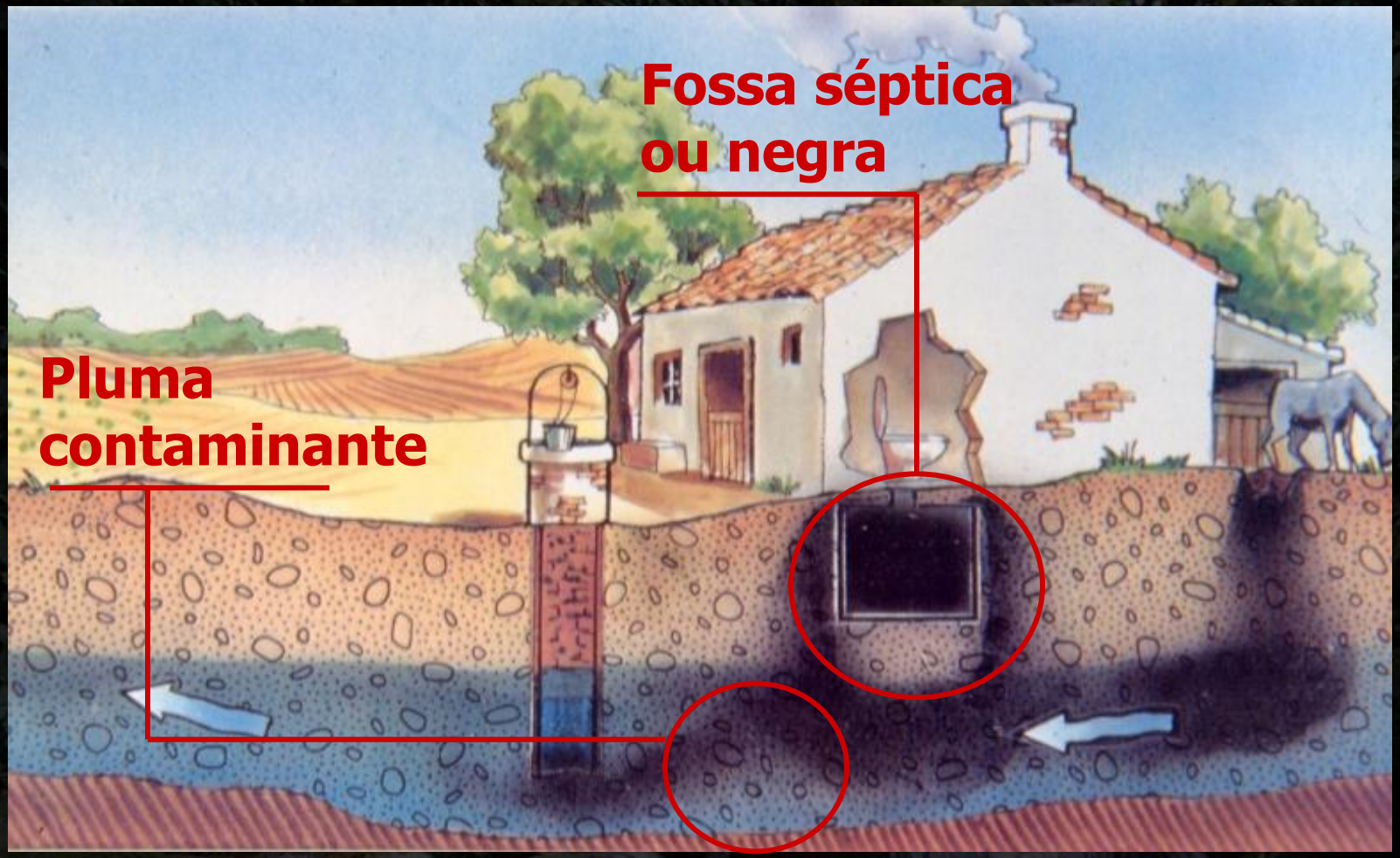
O controle de fontes tem sido um dos meios mais eficazes de reduzir este risco de contaminação de aqüíferos.

Fontes de contaminação mais comuns em solos e água subterrânea nos Países Baixos (baseado em 506 casos)

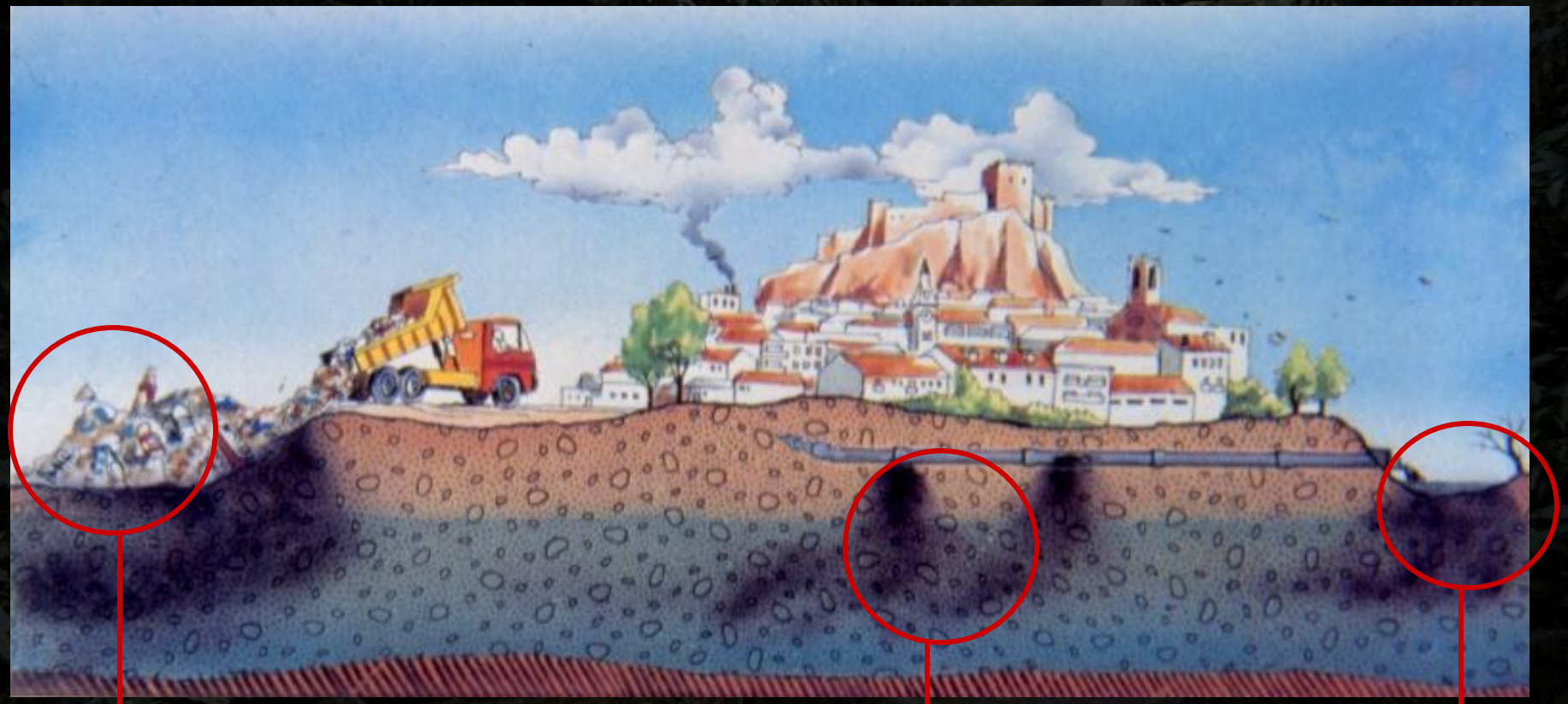
Fontes de contaminação	Frequência (%)
Posto de serviço	28
Lixão e aterros sanitários	21
Contaminação por óleo	8
Manejo de produtos químicos	7
Indústria de galvanoplastia	6
Indústria de metais	6
Pintura	5
Garages	3
Outros (limpeza de embarcações; indústria madeireira; limpeza a seco; téxteis)	< 1

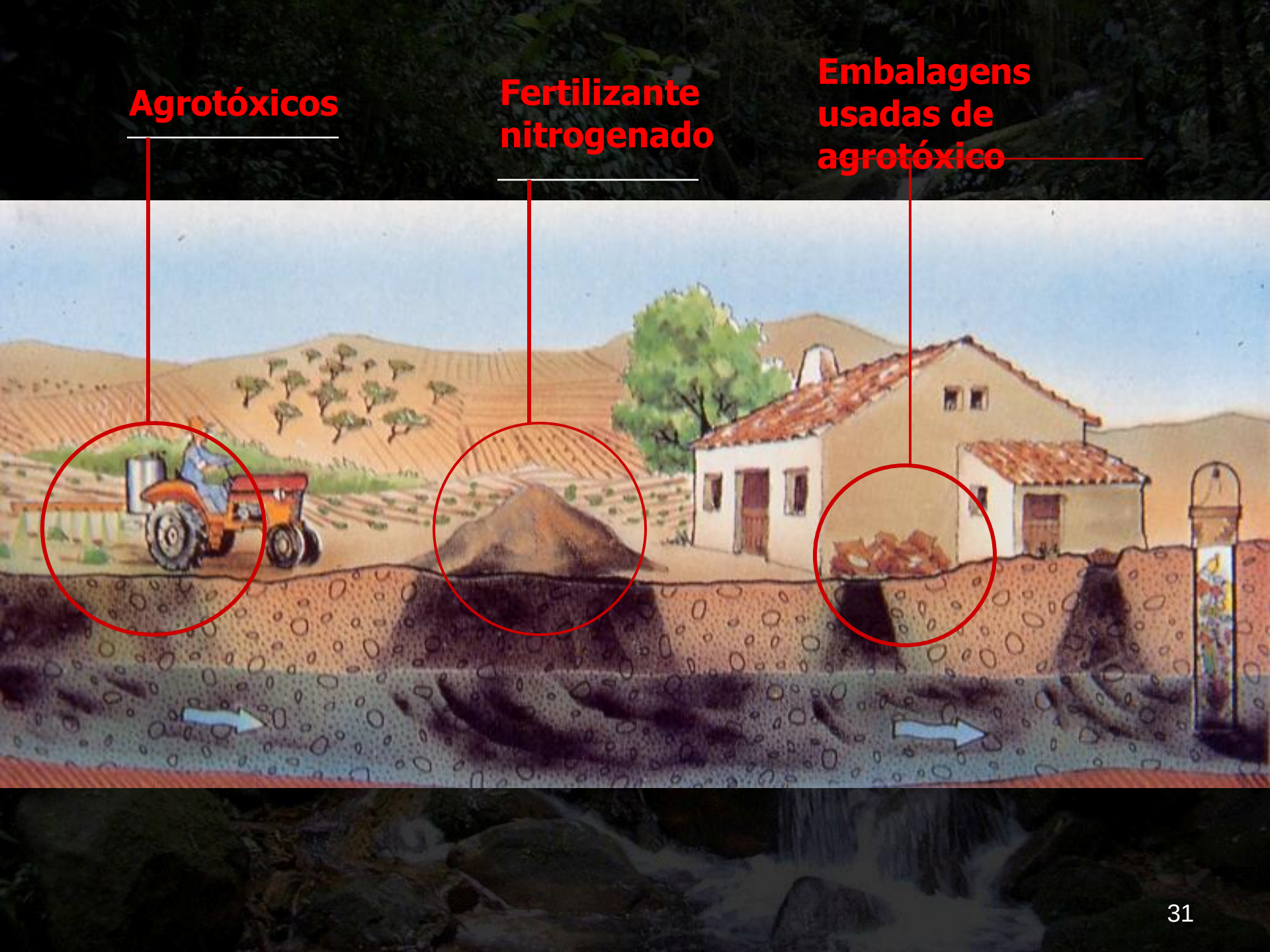
(Duijvernboaden 1985)

Contaminação por sistema de saneamento *in situ*

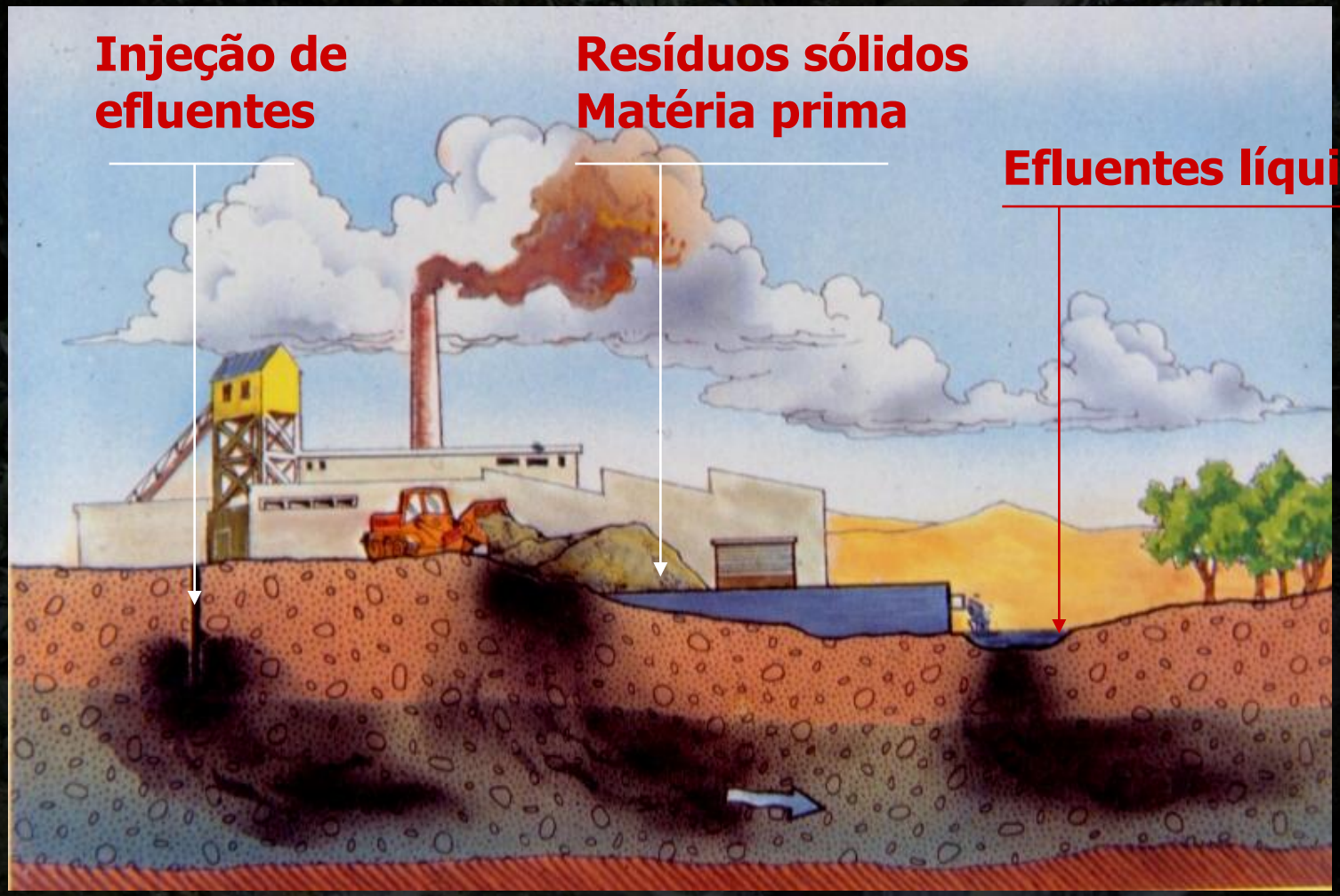


Fontes potenciais de contaminação urbana




Agrotóxicos
Fertilizante nitrogenado
Embalagens usadas de agrotóxico

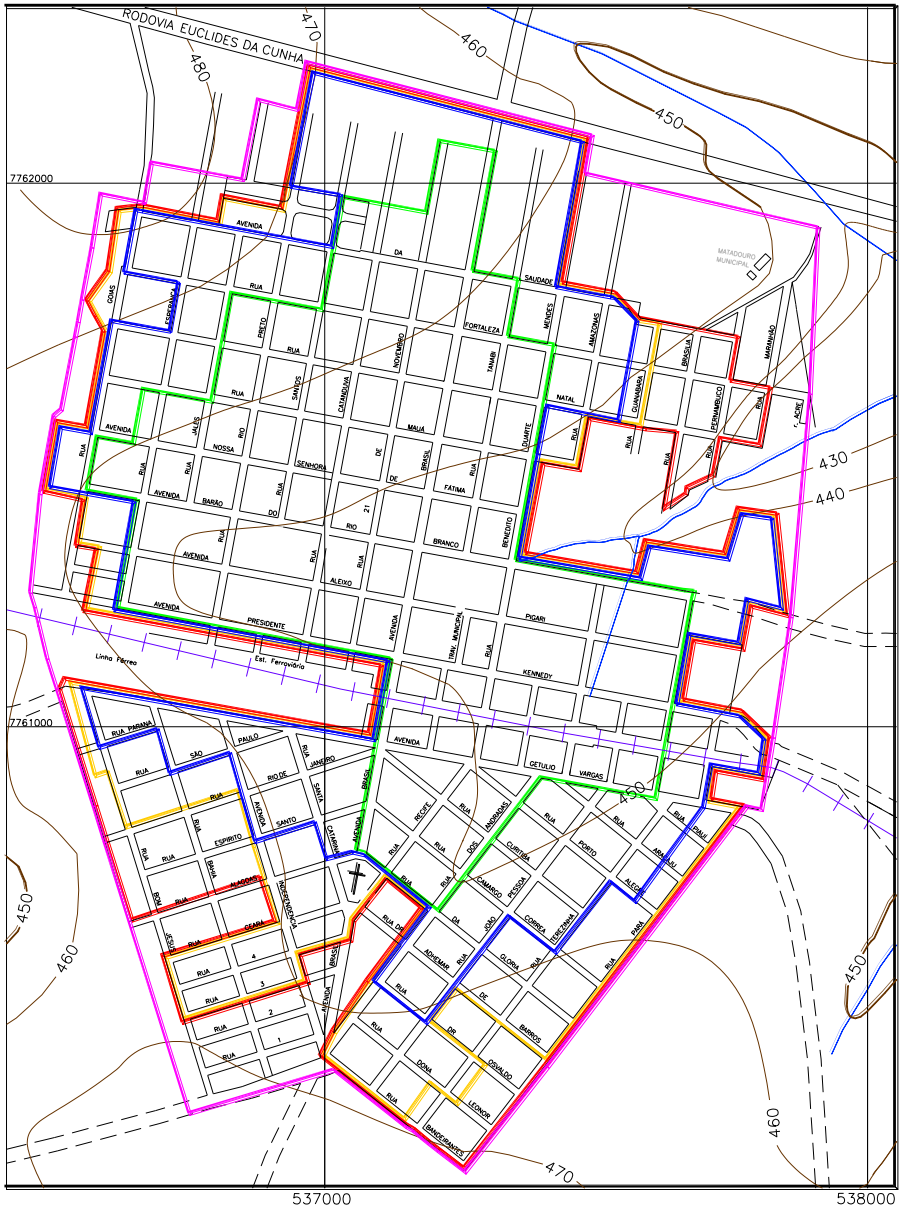
Fontes potenciais de origem industrial



Reutilização de áreas abandonadas contaminadas

- Um dos grandes problemas nas áreas urbanas é o re-uso de terrenos ocupados por antigas áreas poluentes. A contaminação do solo e das águas subterrâneas muitas vezes não é analisada, pondo em risco a população ou usuário do serviço.
- Existem 4238 áreas industriais abandonadas e cadastradas na RMSP, dos quais 2076 têm potencial poluidor (1997).
- A CETESB aponta 255 áreas no Estado de São Paulo

Município de Urânia (SP): evolução do uso territorial



Curvas de nível (m)

Drenagens

Rodovias principais

Estradas secundárias

Ferrovia

450 m Cota topográfica

Área urbana de Urânia nas décadas de:

60

70

80

90

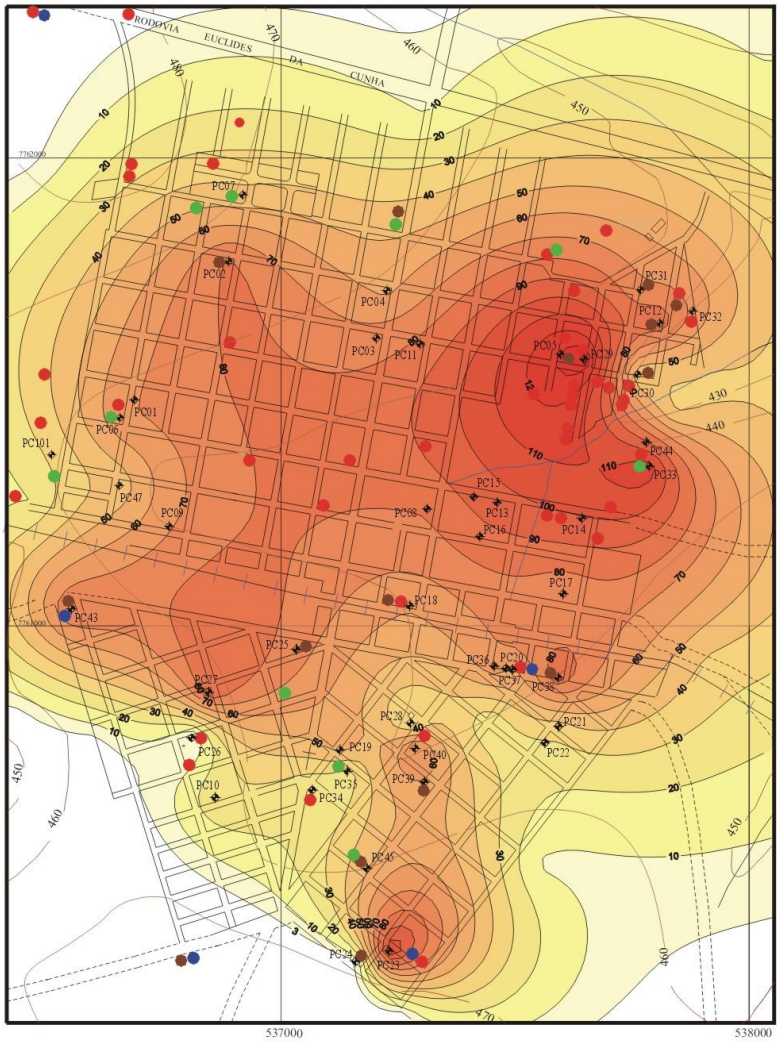
Ano de 2000

FIGURA 6.10

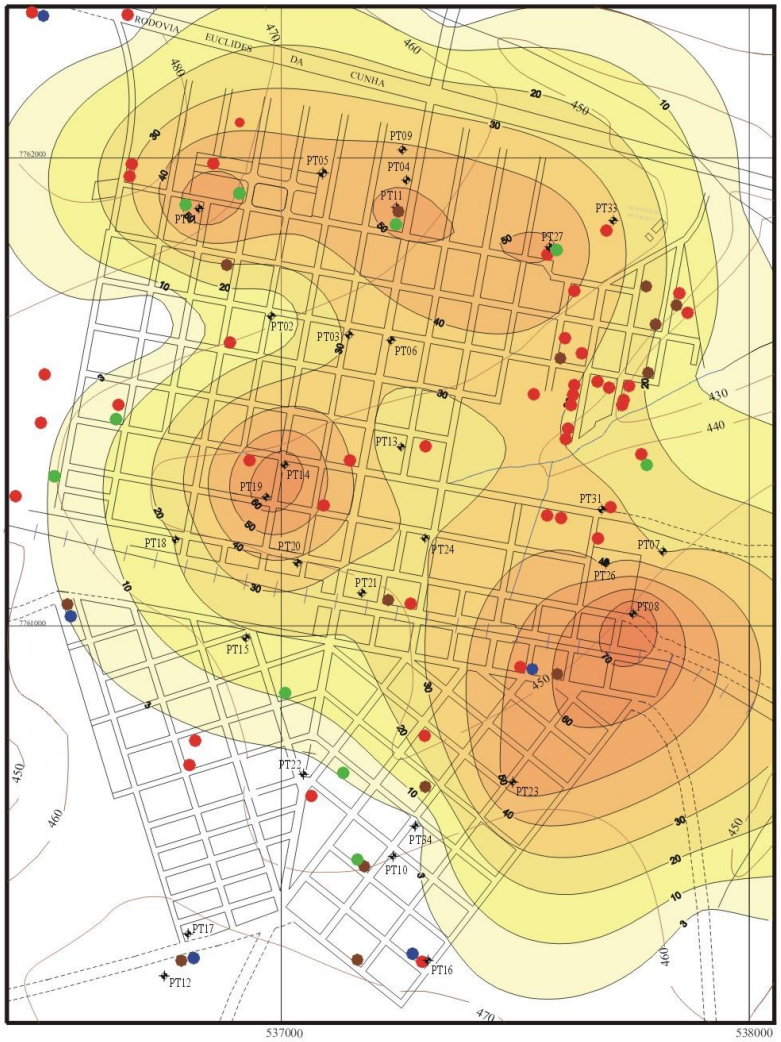
ISOCONCENTRAÇÃO DE NITRATO (mg/L)
ZONAS RASA E INTERMEDIÁRIA

Estação úmida

ZONA RASA



ZONA INTERMEDIÁRIA



Curvas de nível (m)

Drenagens

Rodovias principais

Estradas secundárias

Ferrovias

PC02 Poço cacimba

PT08 Poço tubular

Área agrícola com uso de fertilizantes orgânicos

Área agrícola com uso de fertilizantes inorgânicos

Fossa ativa

Fossa inativa

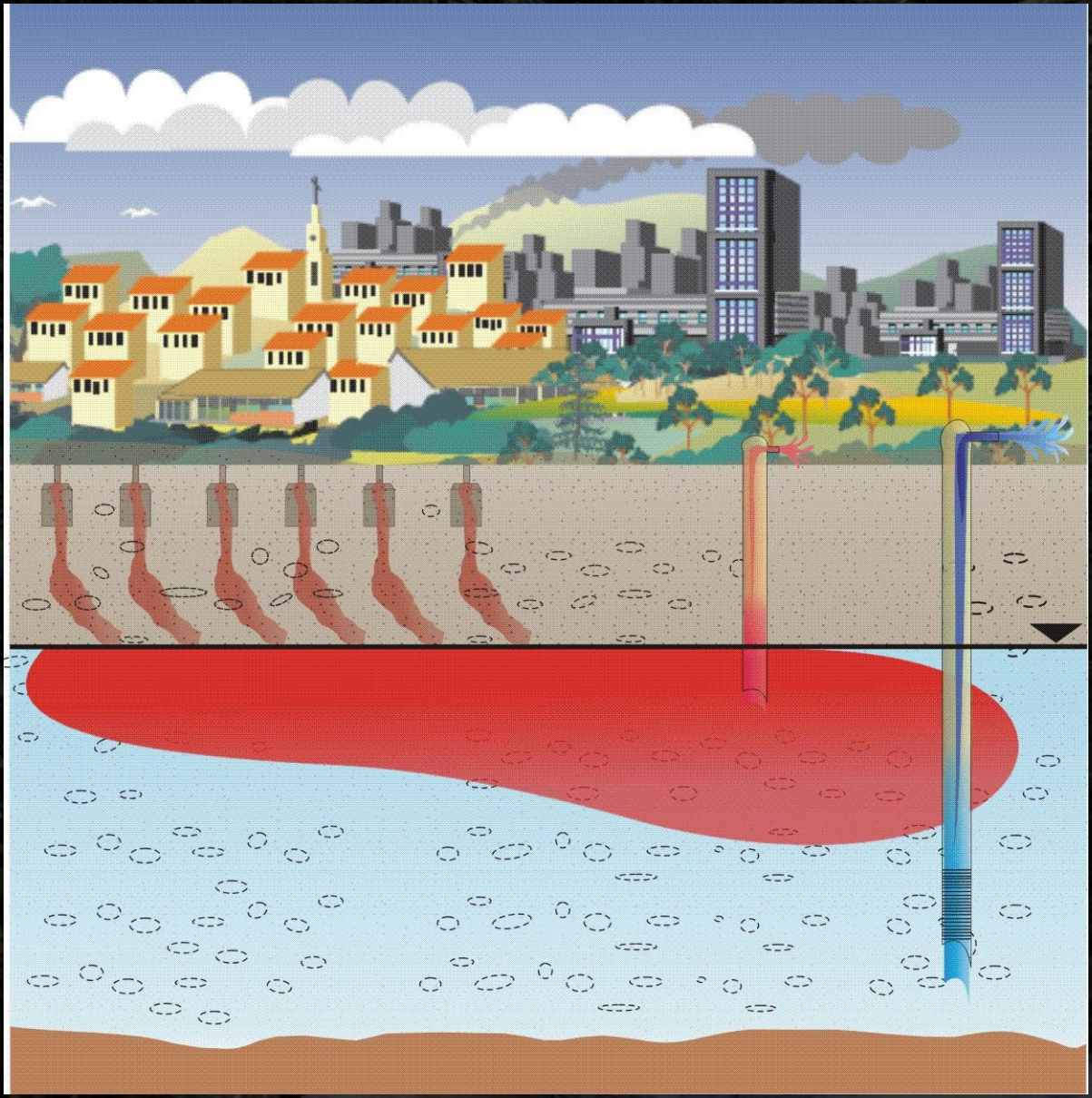
Concentração de nitrato (mg/L)

140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
3

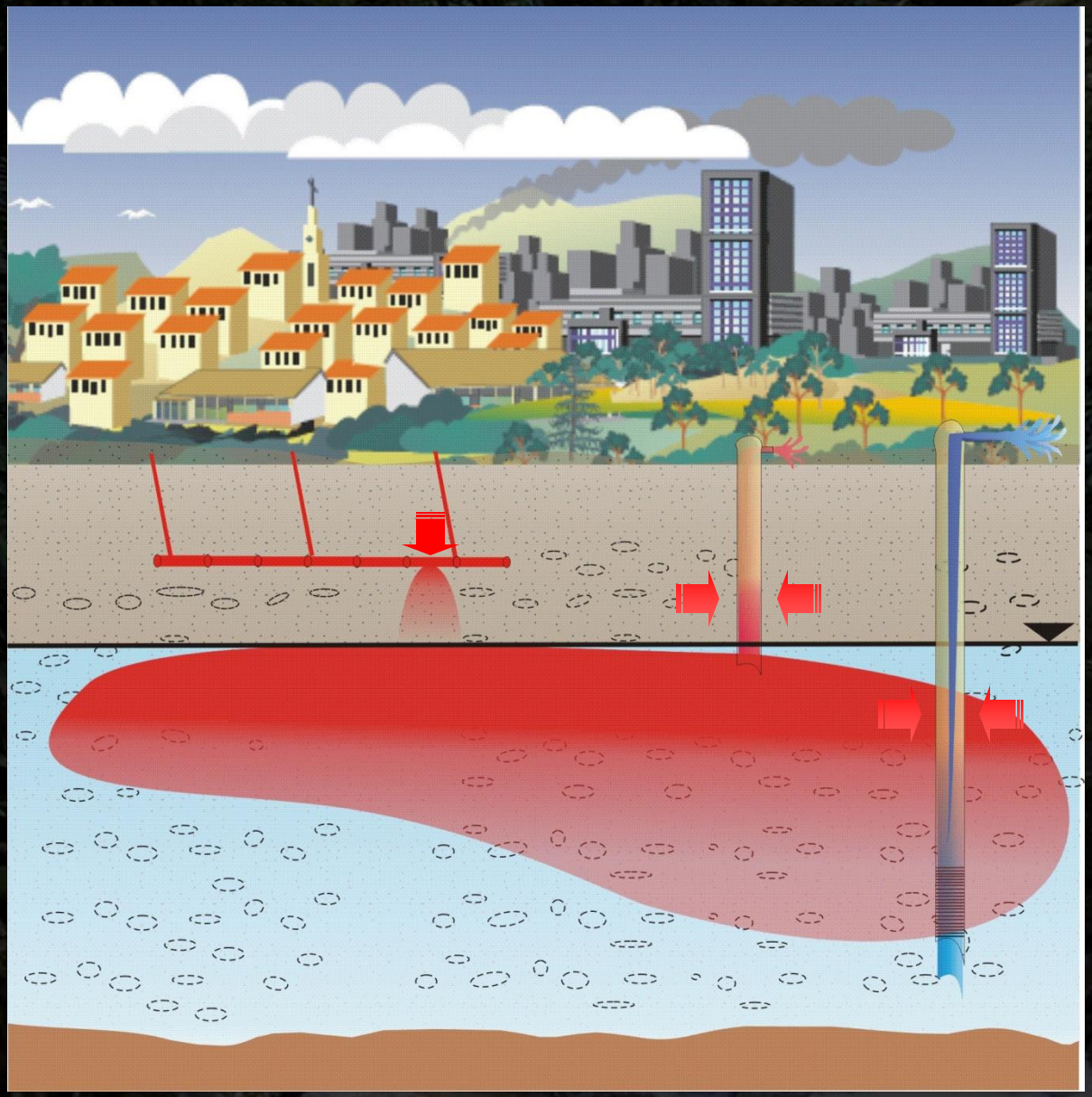
0 50 100 150 200 250 300m

ESCALA 1:10.000

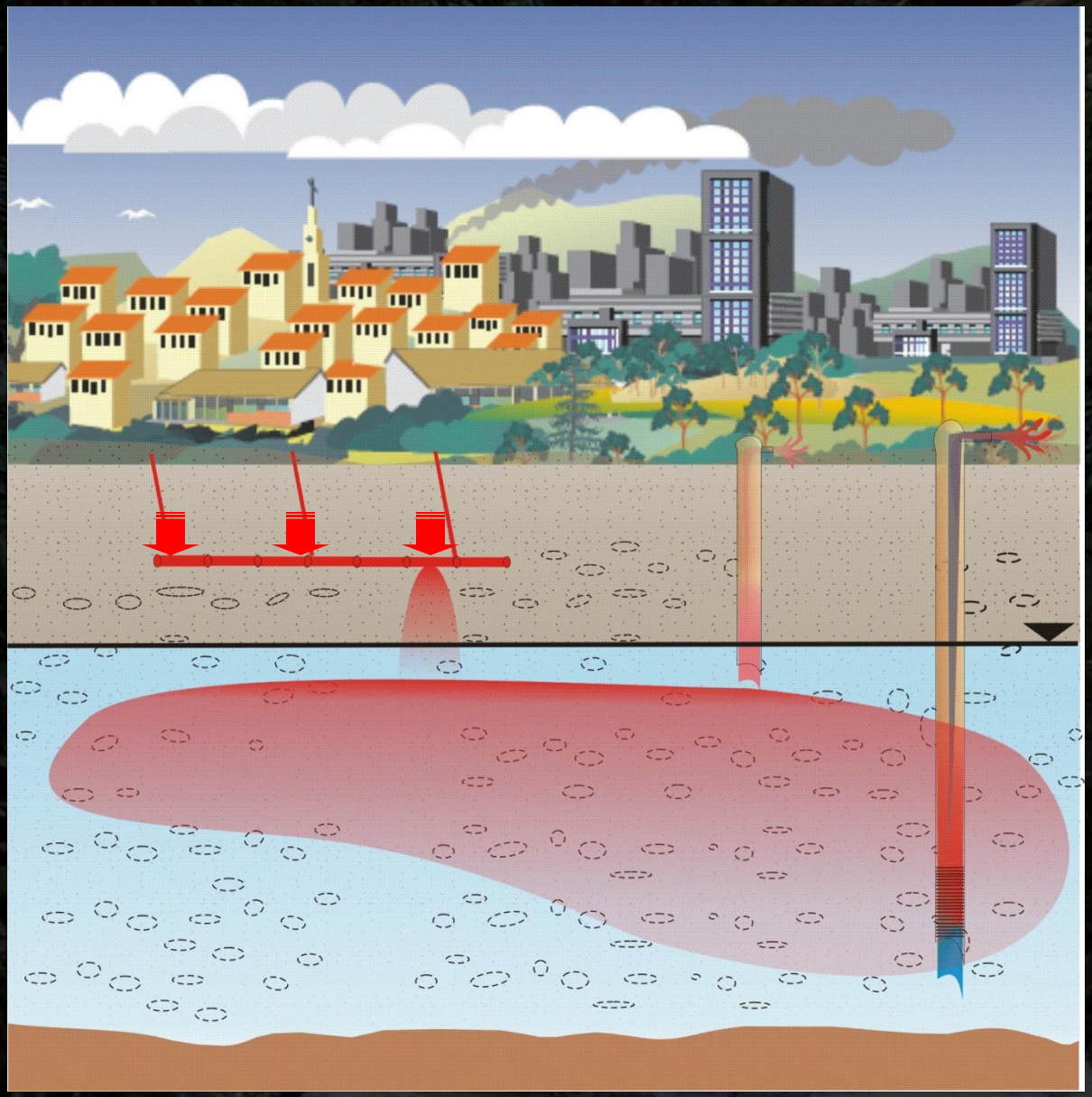
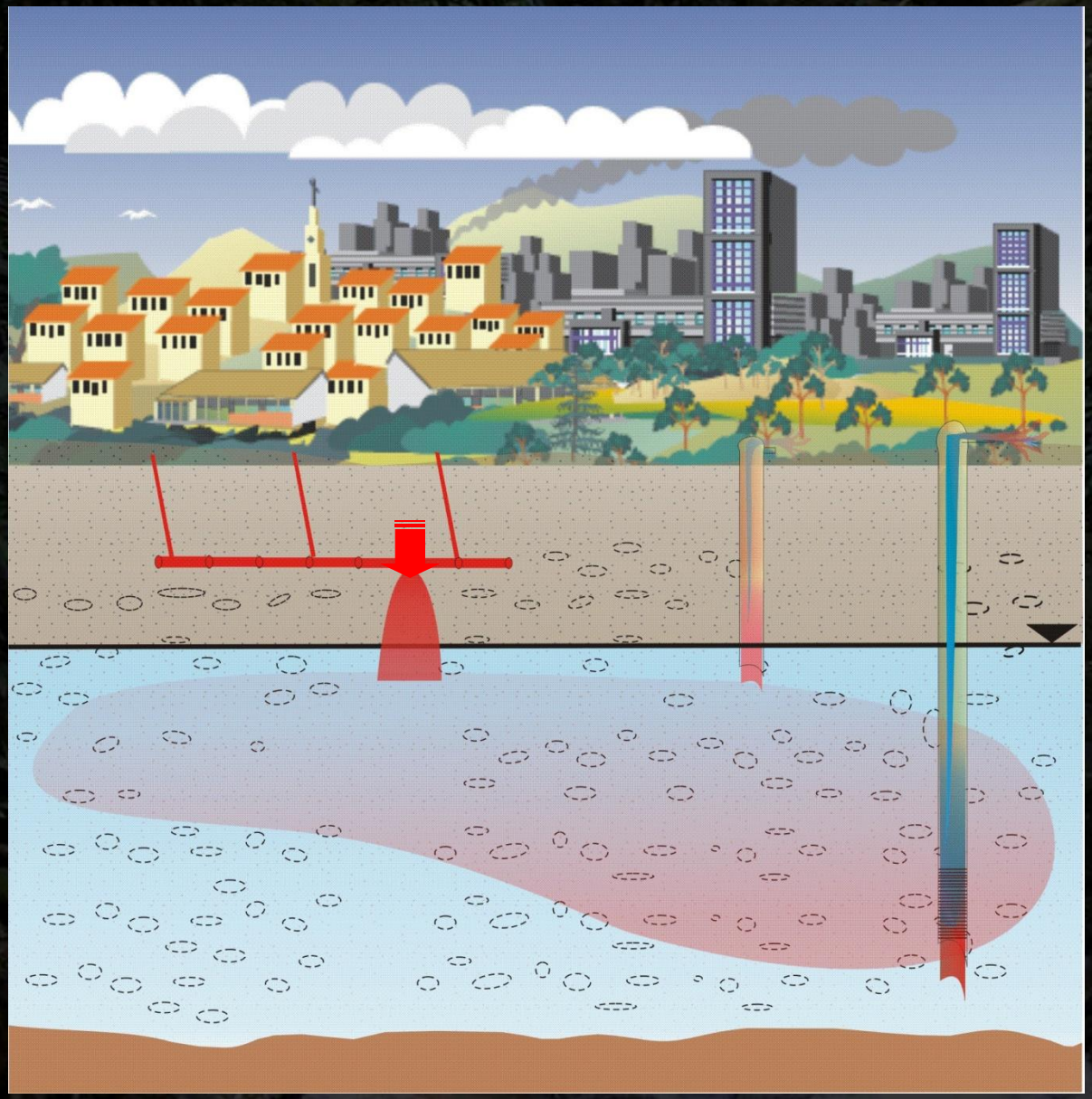
Antes de 1980: a porção rasa do aqüífero era contaminado por sistemas de saneamento in situ



Hoje: A porção superficial continua contaminada, embora haja rede de esgoto



O problema atingirá a porção profunda do aqüífero?



Ou somente a diluição resolverá o problema.....