

Hidrogeologia urbana: uma visita às cidades brasileiras



Universidade de São Paulo



World Bank

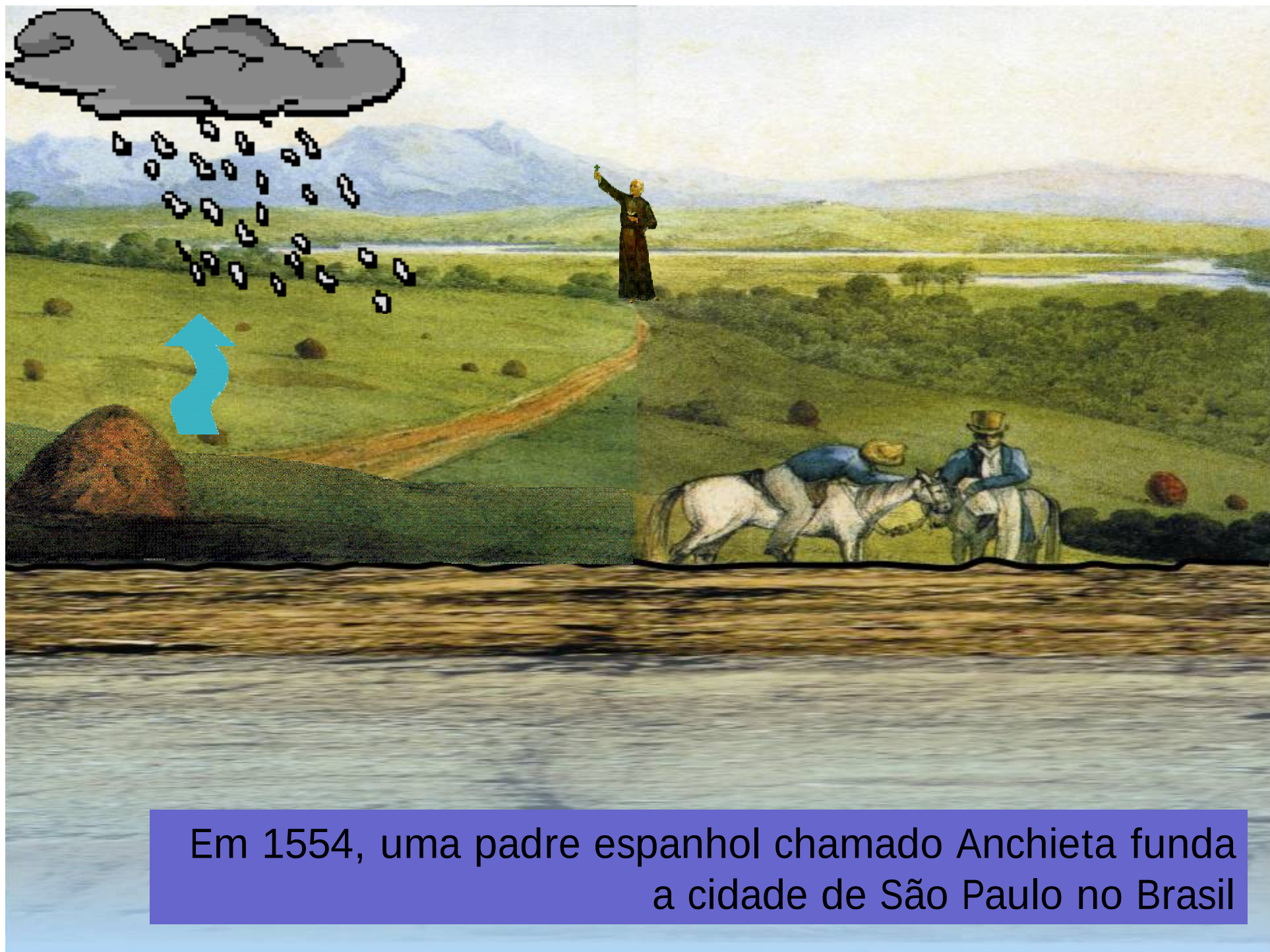
Ricardo Hirata

Instituto de Geociências - USP

GW-MATE - World Bank



Como na novela *Crônica de uma morte anunciada* (*Crónica de una muerte anunciada*) do prêmio Nobel **Gabriel Garcia Marques**, todos na cidade de Aracataca (Colômbia) sabiam que uma pessoa seria assassinada, mas ninguém pode evitar....



Em 1554, uma padre espanhol chamado Anchieta funda a cidade de São Paulo no Brasil

São Paulo em 1554

Precipitação
1536 mm/a

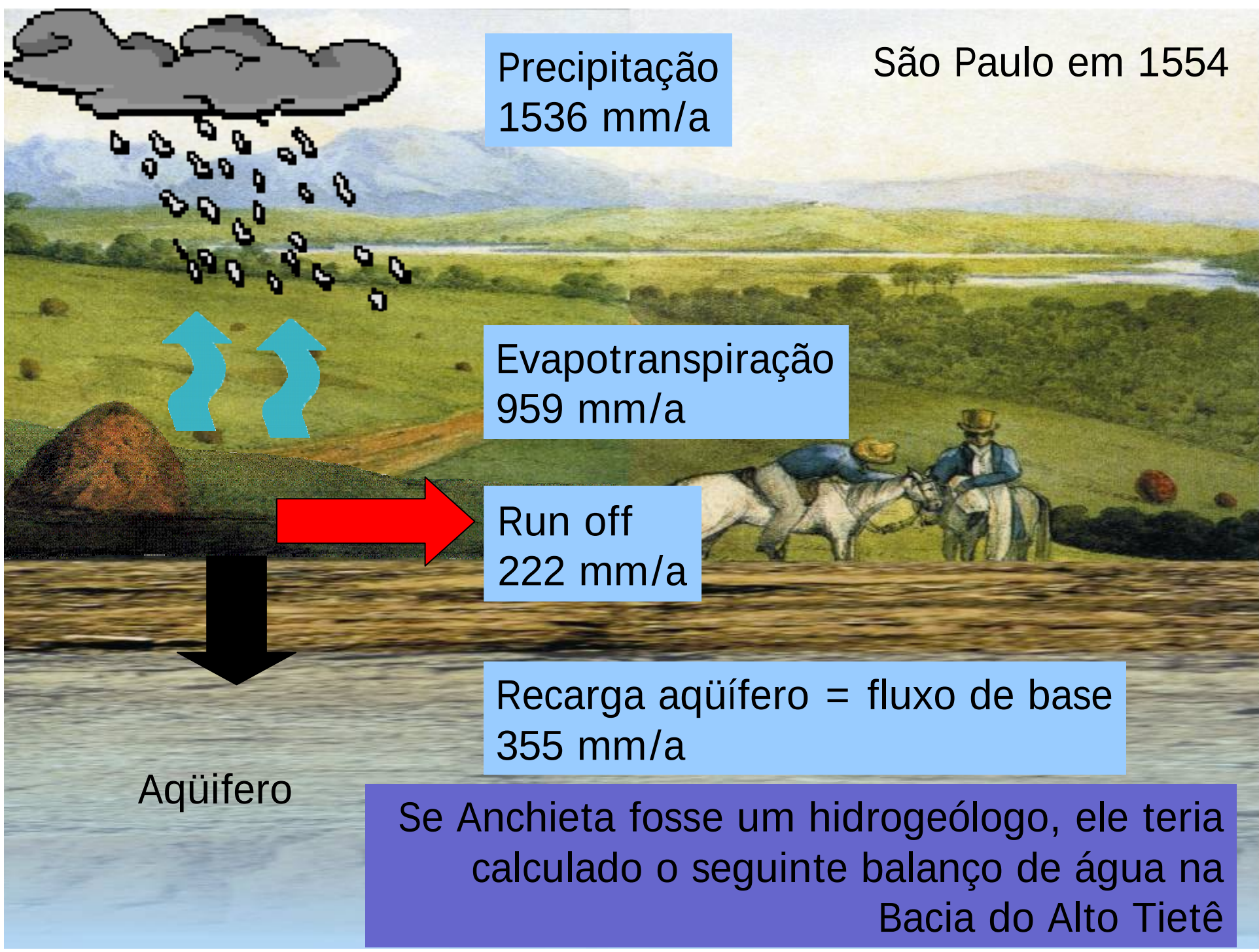
Evapotranspiração
959 mm/a

Run off
222 mm/a

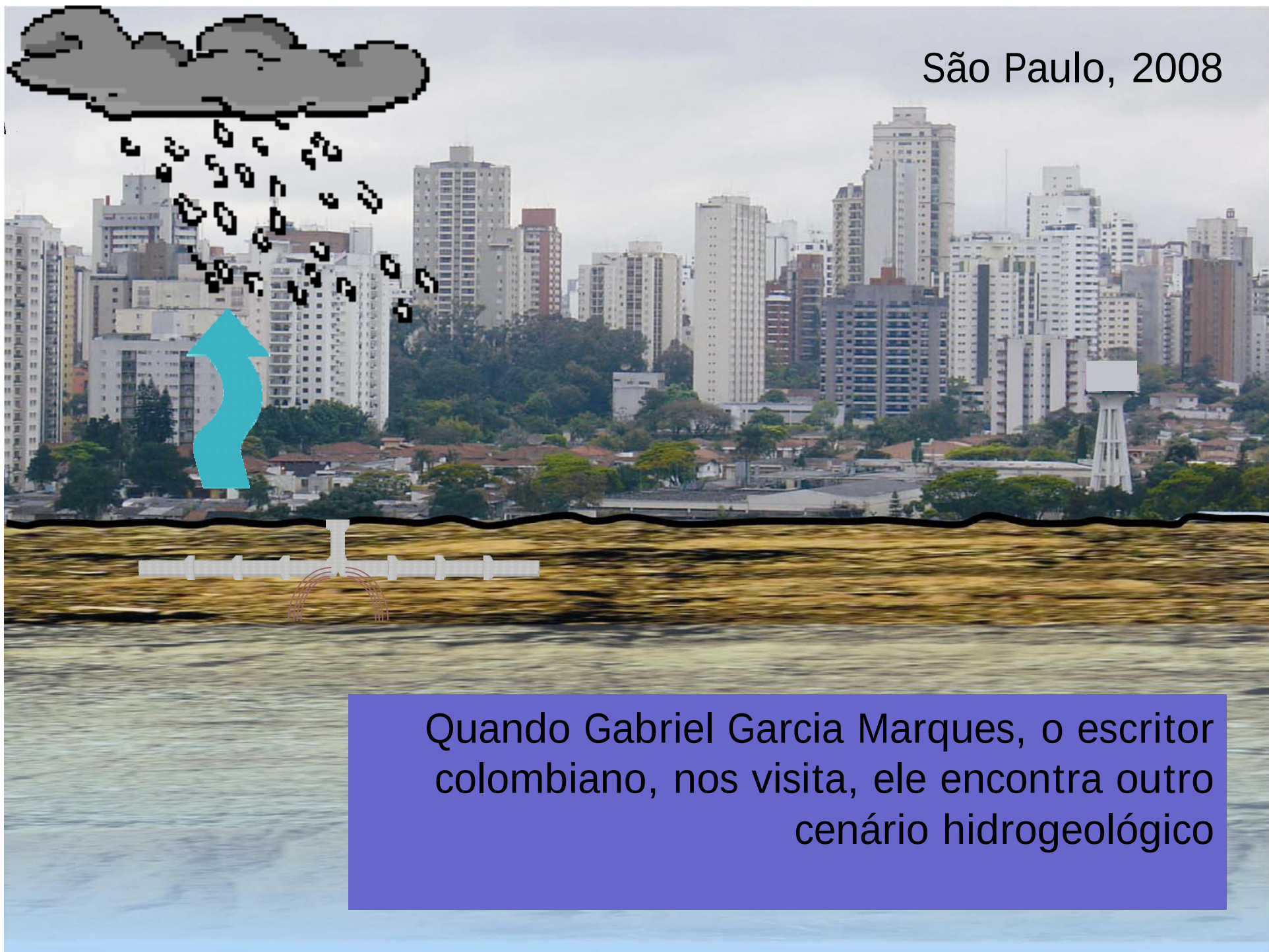
Recarga aquífero = fluxo de base
355 mm/a

Aquífero

Se Anchieta fosse um hidrogeólogo, ele teria calculado o seguinte balanço de água na Bacia do Alto Tietê



São Paulo, 2008



Quando Gabriel Garcia Marques, o escritor colombiano, nos visita, ele encontra outro cenário hidrogeológico

São Paulo 2008

Precipitação
1536 mm/a

Evapotranspiração
959 mm/a

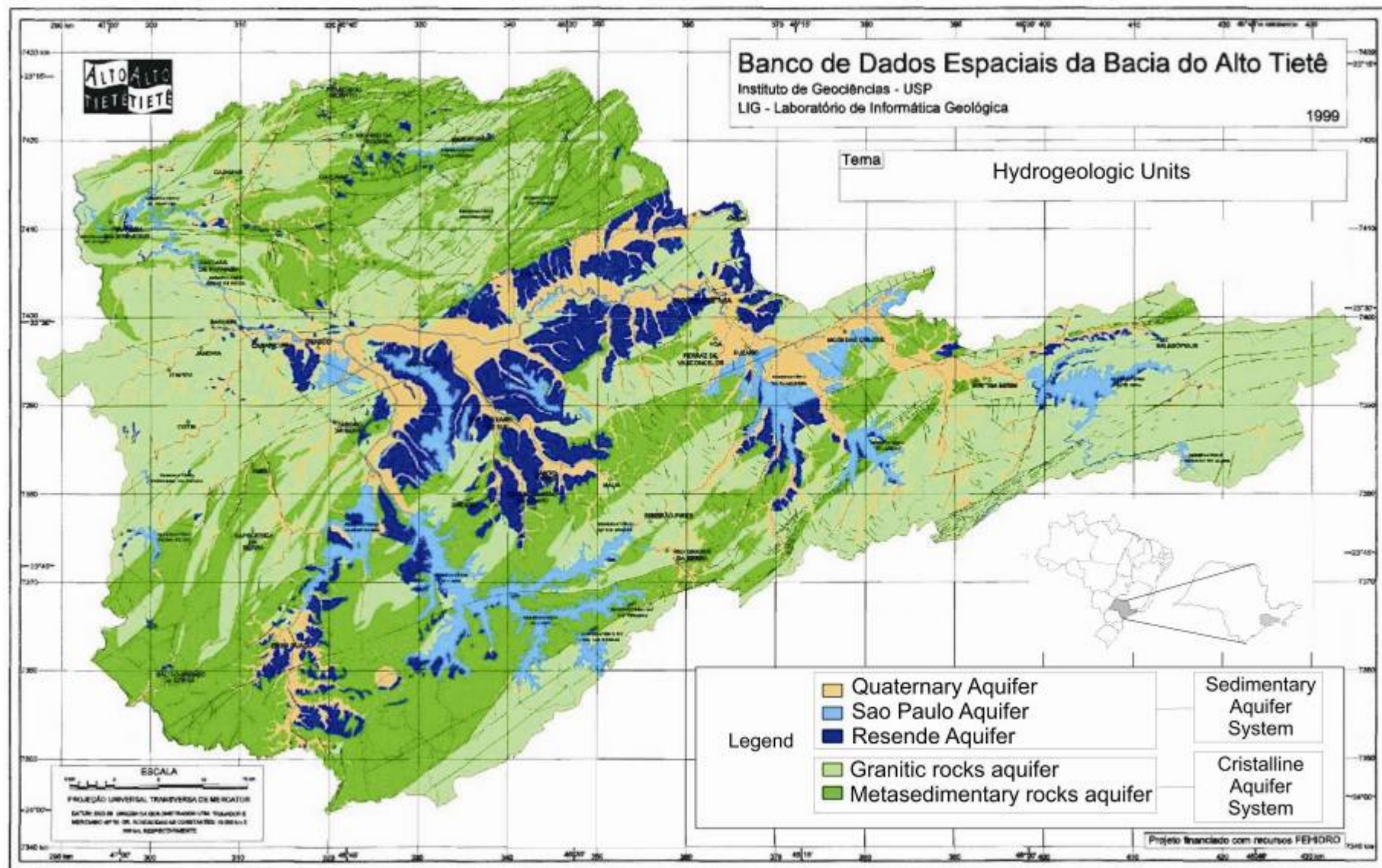
Run off (interceptação)
397 mm/a (*antes 222 mm/a*)

Recharge urbana	180 mm/a
Fugas da rede de água(*)	+ 270 mm/a
Recarga total	= 450 mm/a

A recarga aquífera
não mudou
expressivamente

(*antes = 355 mm/a*)

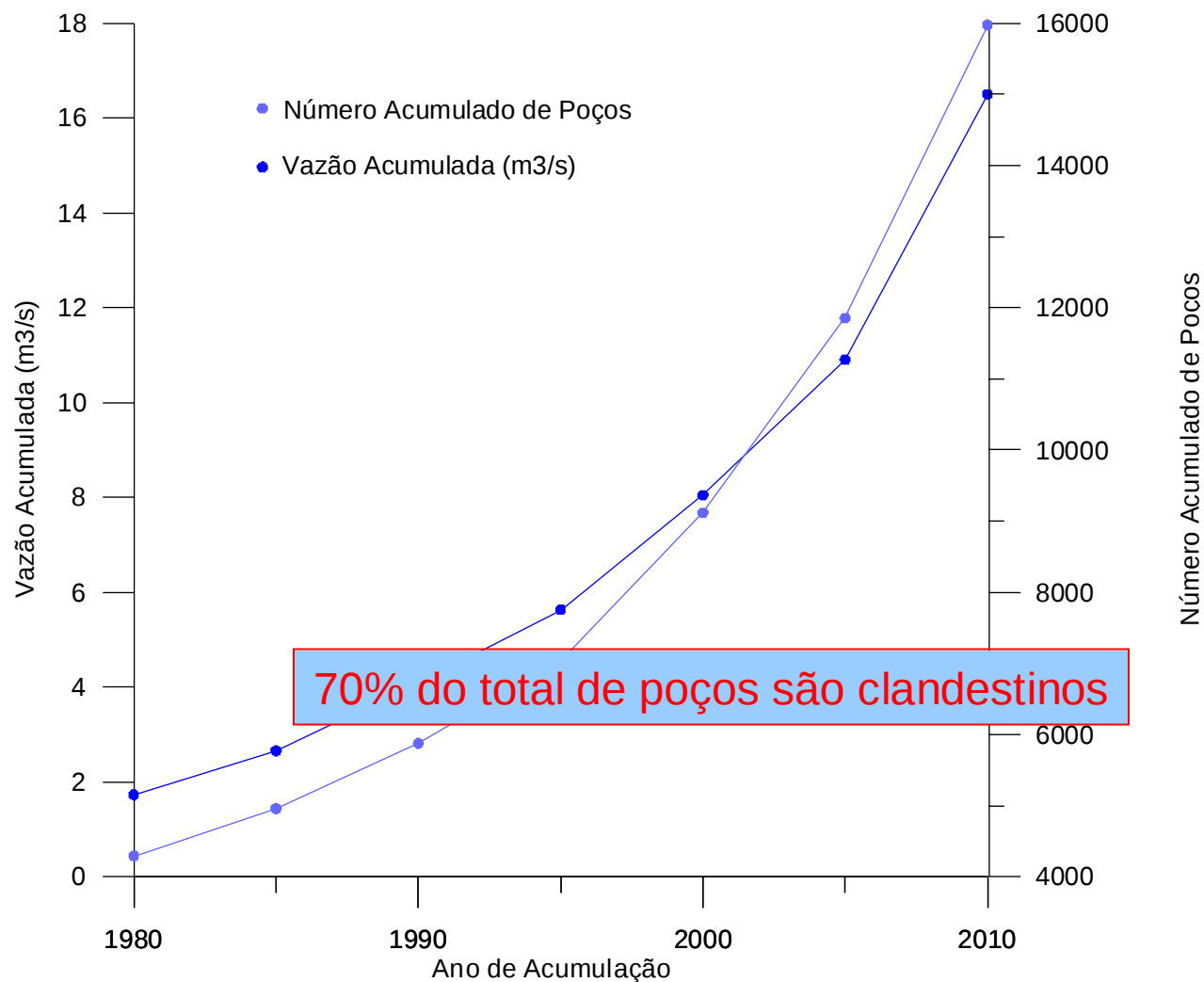
(*) hoje a bacia importa
água



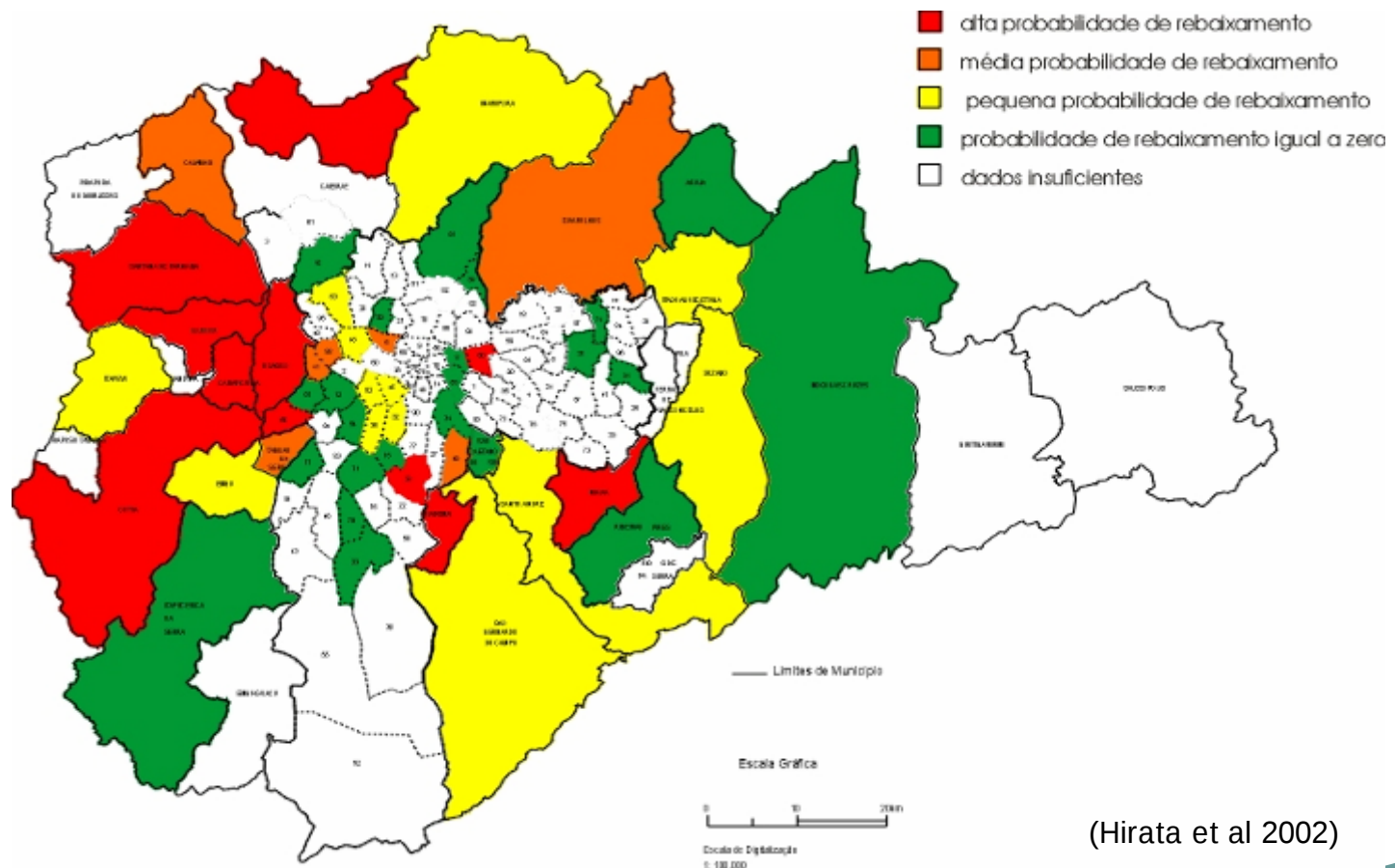
A água subterrânea tem um importante papel no abastecimento humano em São Paulo

- As águas superficiais atendem quase toda a população da cidade por sistema público. O sistema tem capacidade de prover, em termos regulares, mais de $64 \text{ m}^3/\text{s}$;
- A cidade demanda mais que $72 \text{ m}^3/\text{s}$, a diferença é atendida por 8 mil poços privados.
- Se algum problema afetar as águas subterrâneas (super-exploração ou contaminação), a população migrará para o sistema público e isso poderá causar o colapso no sistema, que não tem como atender essa demanda extra.

Evolução da perfuração e extração de poços na Bacia do Alto Tietê

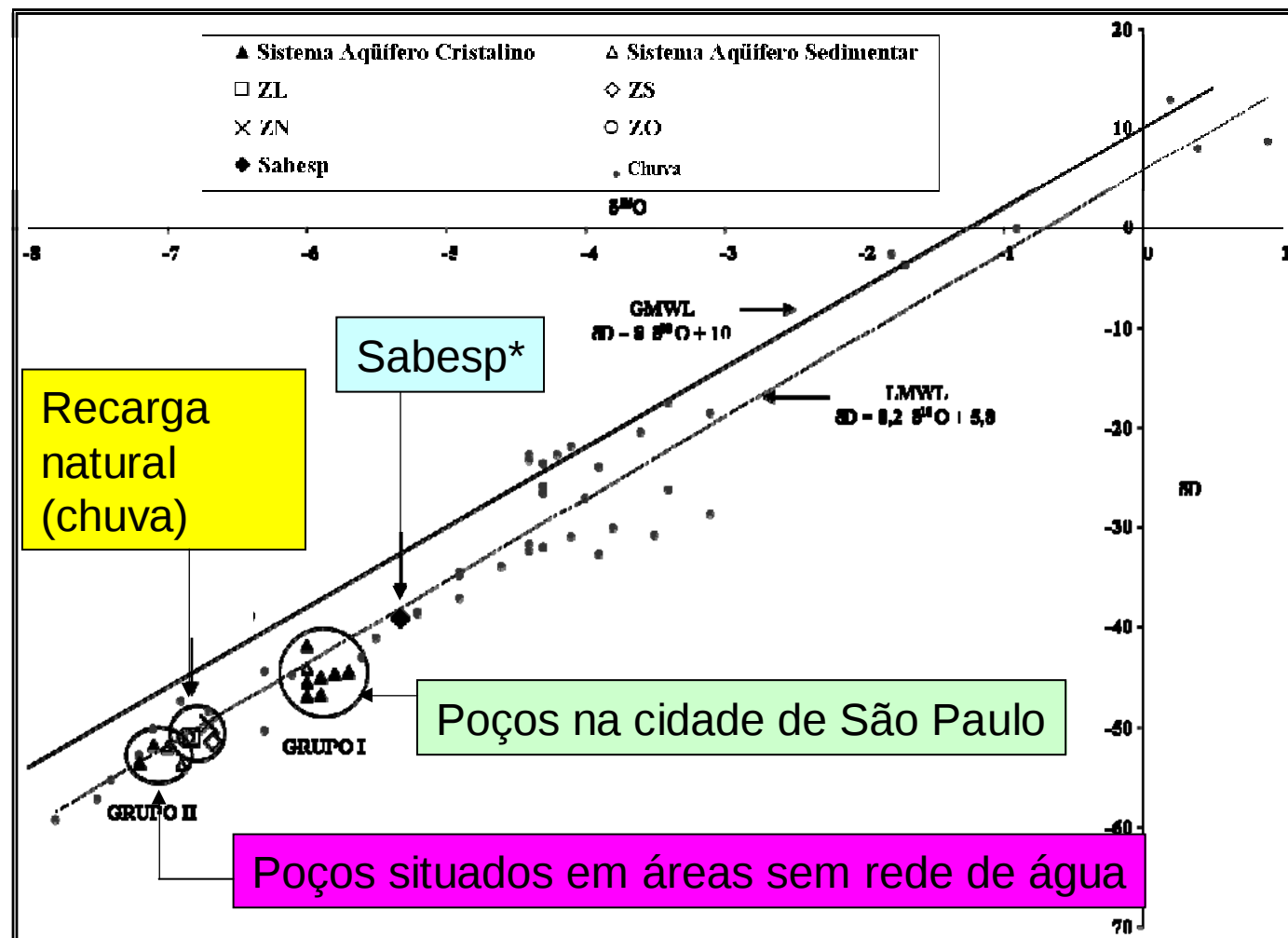


Áreas que apresentam sérios problemas de queda do nível de água dos aquíferos devido à exploração não controlada



(Hirata et al 2002)

A água subterrânea em São Paulo é uma mistura de 60% das fugas da rede de água e esgoto e 40% da recarga natural



*Sabesp: companhia de águas de São Paulo

Duas áreas com diferentes ocupações: o campus da universidade e uma área residencial de classe média-baixa em São Paulo

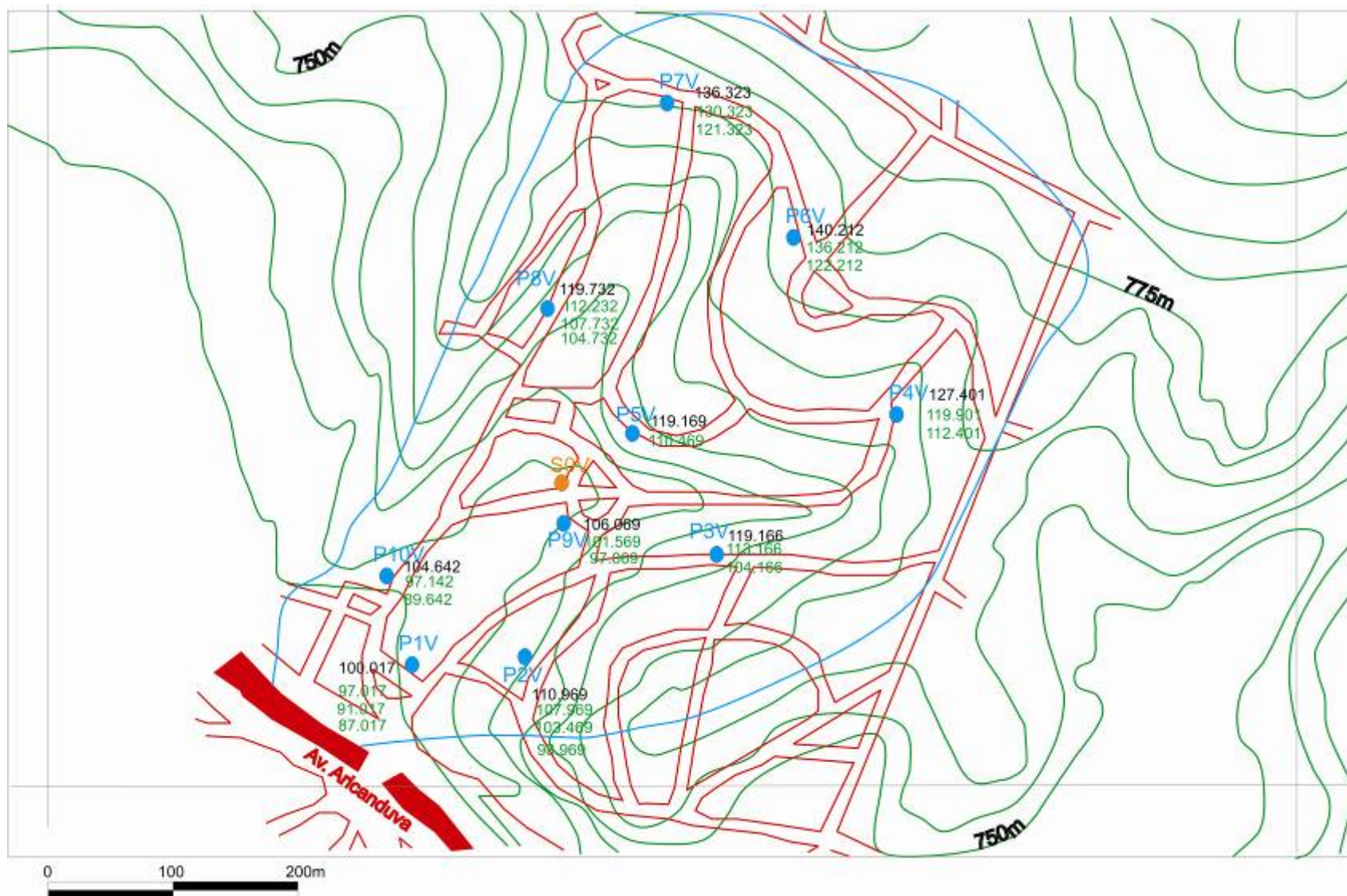


Universidade de São Paulo



Vila Eutália

Vila Eutália: uma área de 1 km², monitorado por 10 poços multiníveis (2 a 4 níveis) até 20m de profundidade

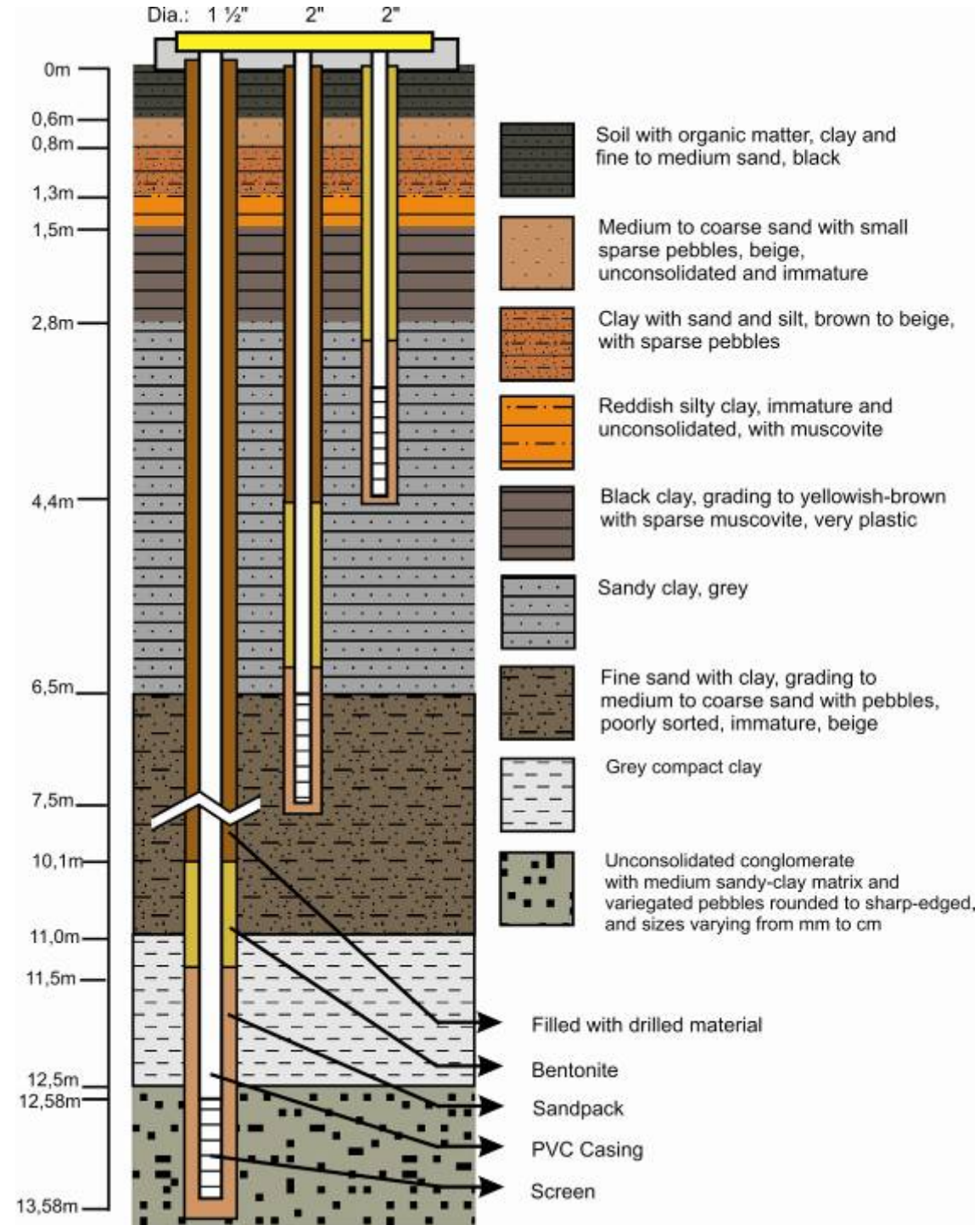


Geoprobe e hollow stem auger



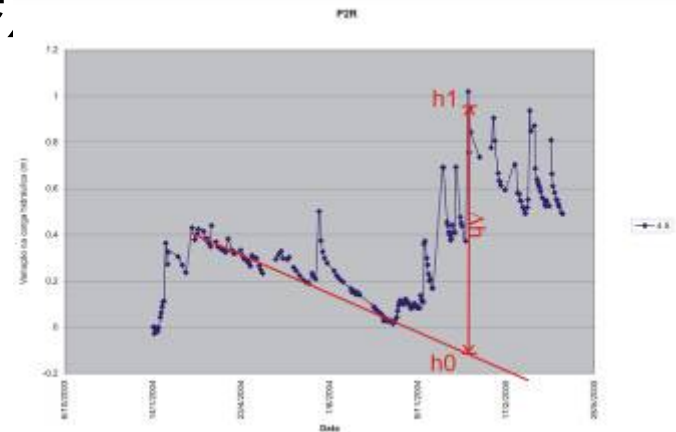
Geologia

Vila Eutália



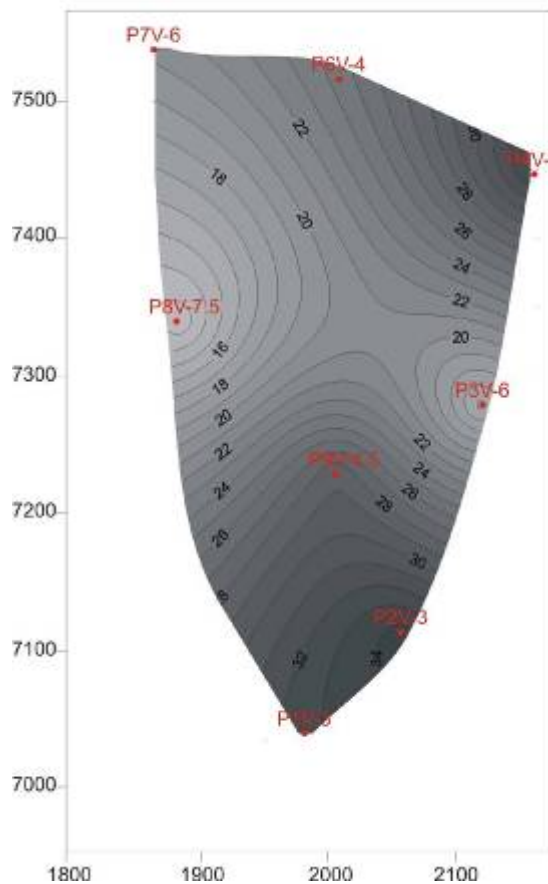
Recarga usando métodos clássicos e isotópicos

- **Aproximação de Darcy:** recarga total (infiltração natural e perdas da rede)
- **Técnica da flutuação dos níveis de água:** recarga natural (não afetado por fontes contínuas: fugas da rede)
- **Isótopos** ($^{18}\text{O}/\text{D}$, ^{15}N) e métodos químicos (NH_4 , Cl , NO_3)

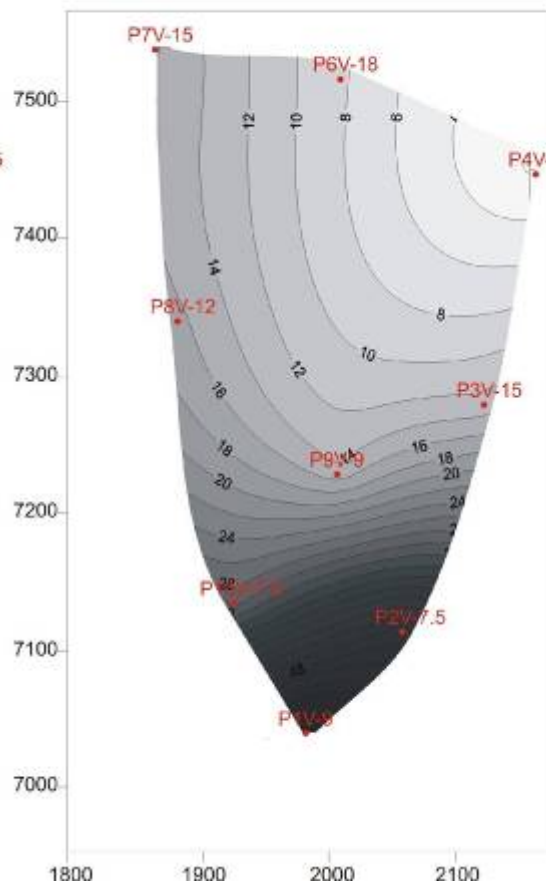


Vila Eutália: cloreto (período seco)

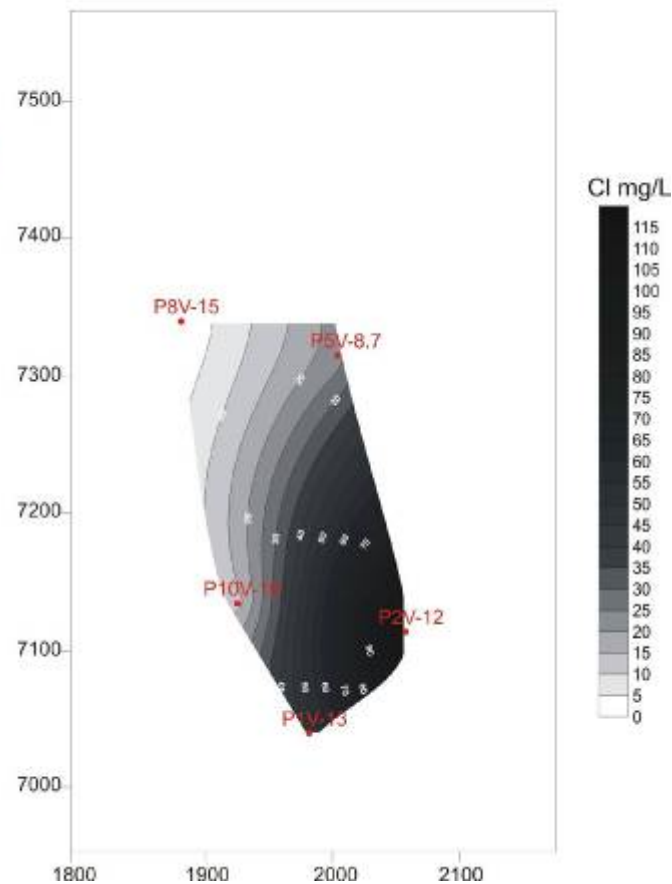
Nível 1 - seca - setembro/04



Nível 2 - seca - setembro/04

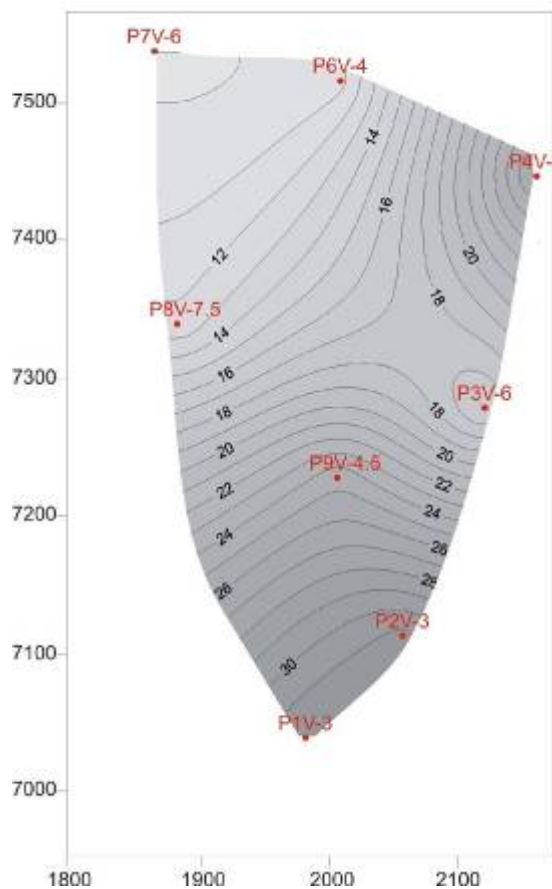


Nível 3 - seca - setembro/04

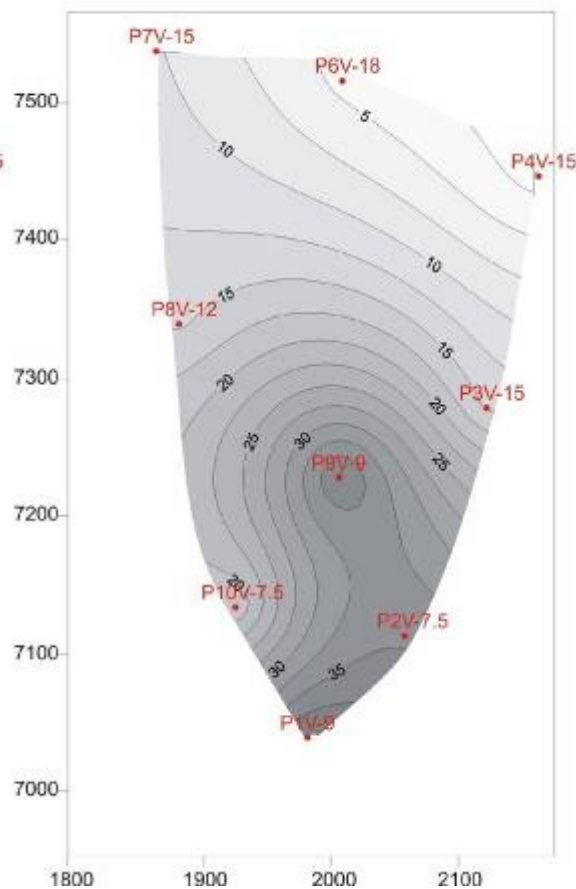


Vila Eutália: cloreto (período úmido)

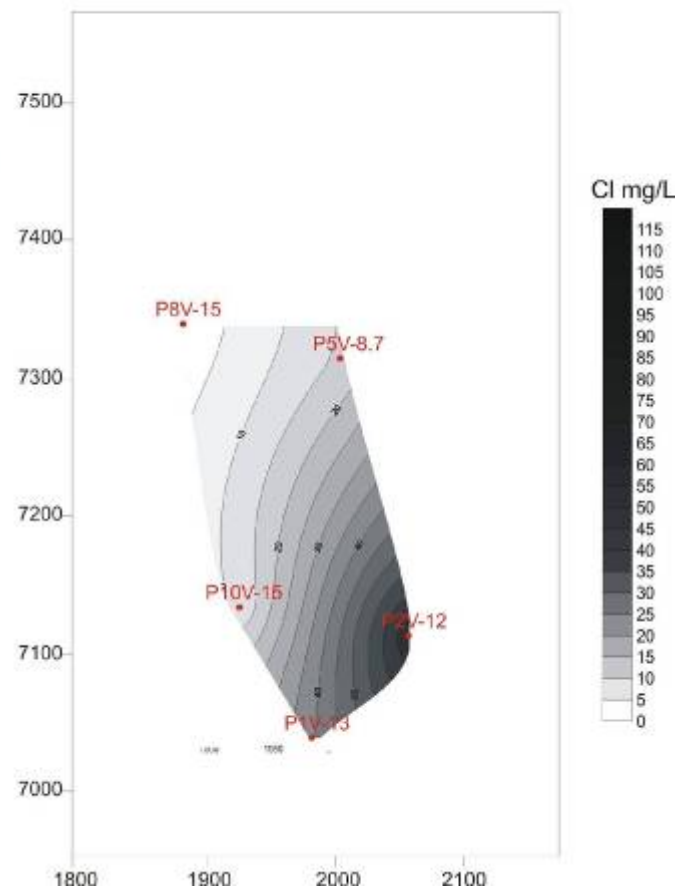
Nível 1 - recarga - fevereiro/05



Nível 2 - recarga - fevereiro/05

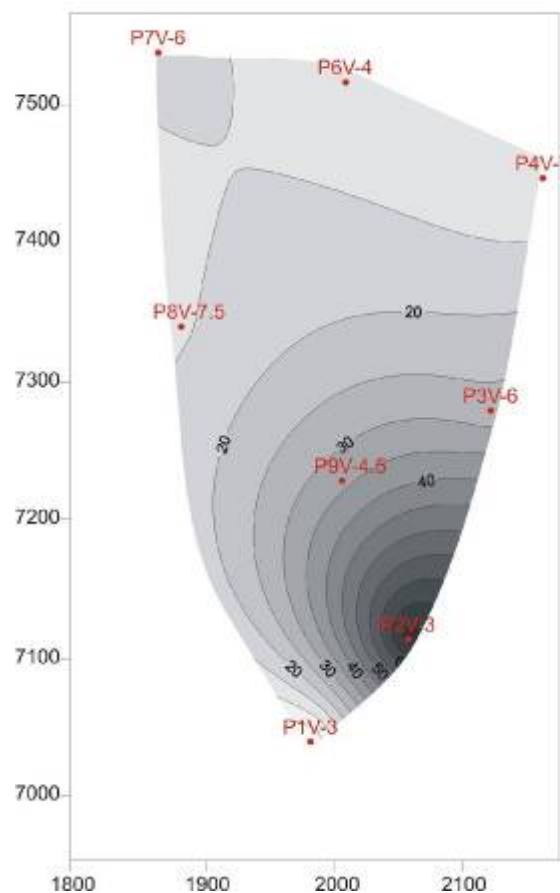


Nível 3 - recarga - fevereiro/05

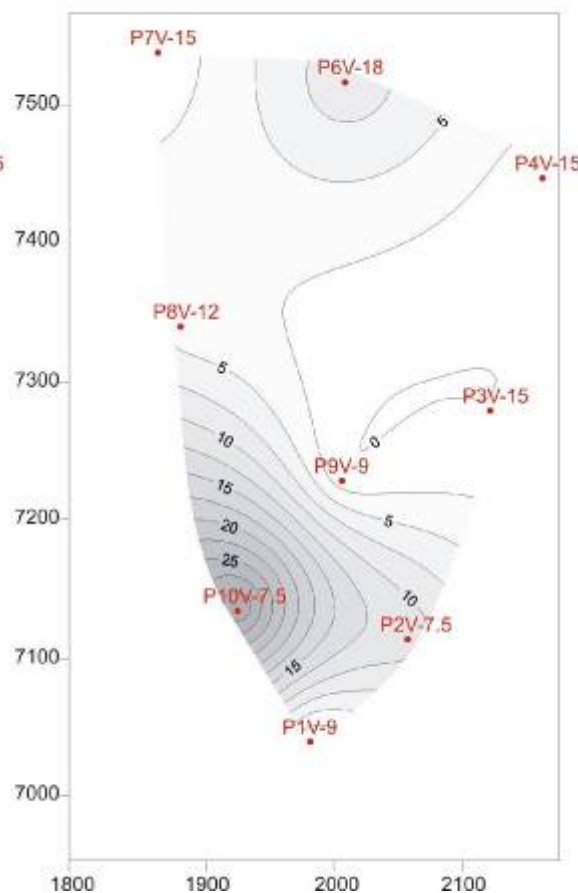


Vila Eutália: nitrato (período seco)

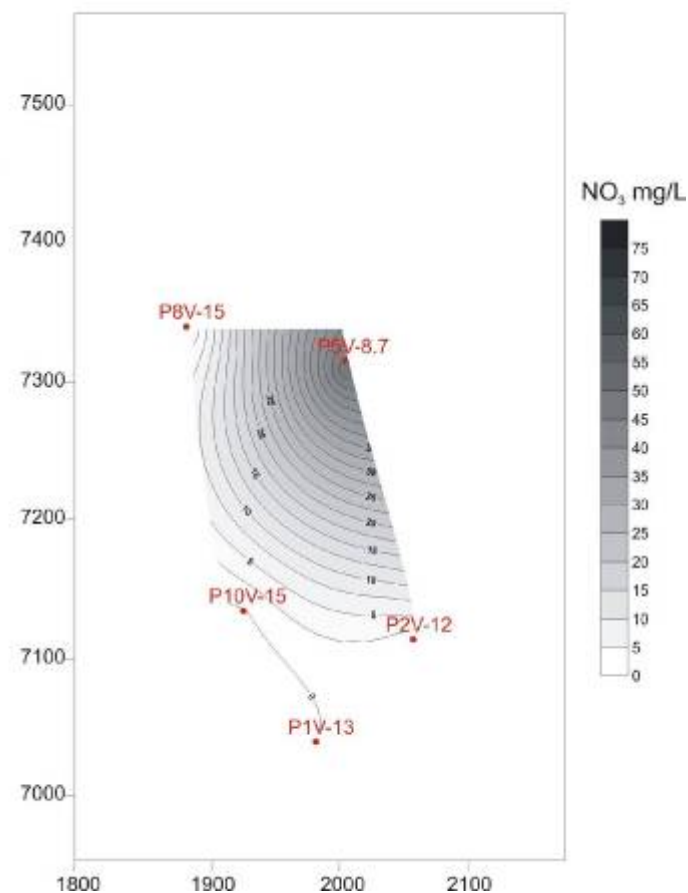
Nível 1 - seca - setembro/04



Nível 2 - seca - setembro/04

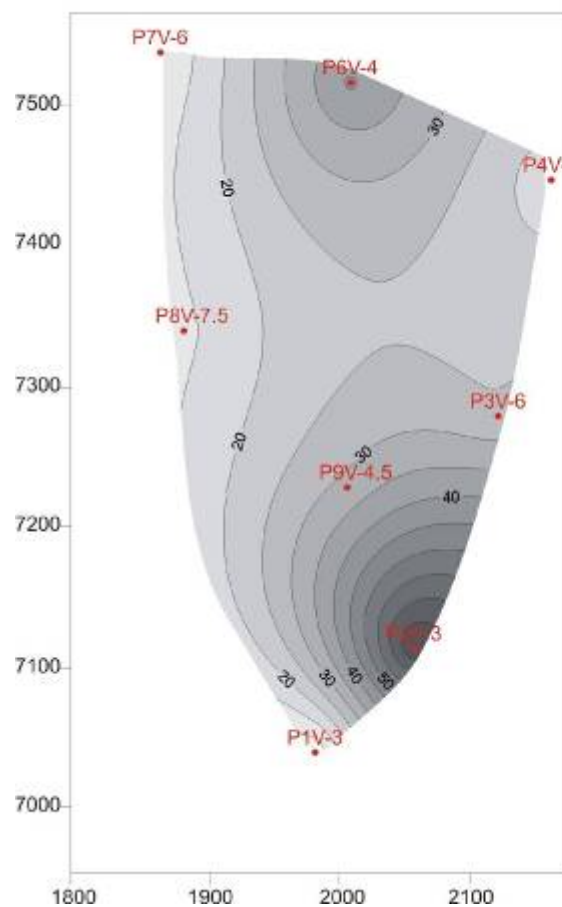


Nível 3 - seca - setembro/04

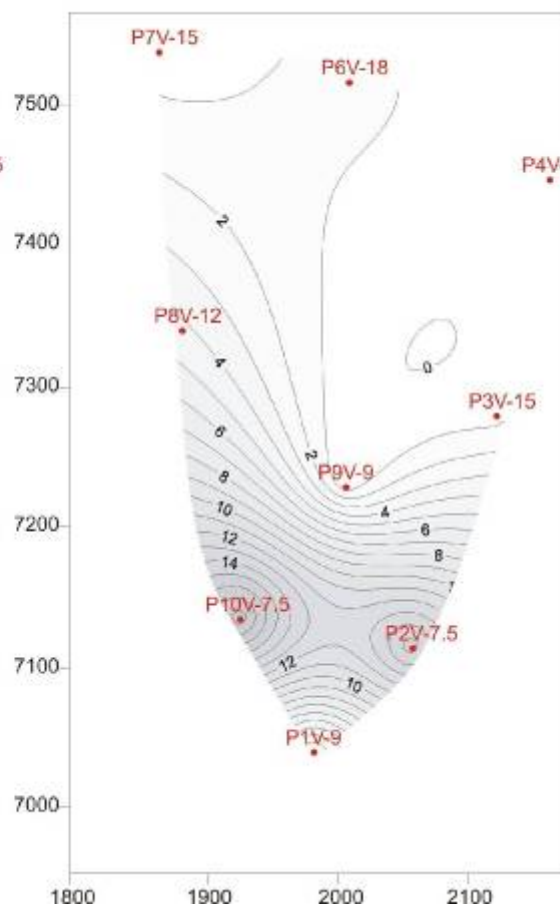


Vila Eutália: nitrato (período úmido)

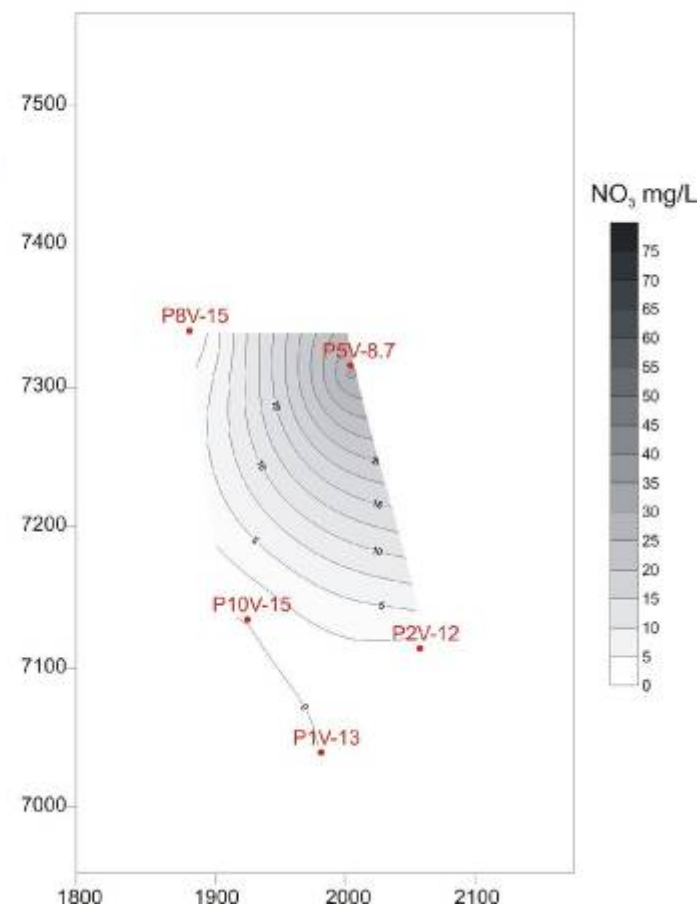
Nível 1 - recarga - fevereiro/05



Nível 2 - recarga - fevereiro/05



Nível 3 - recarga - fevereiro/05

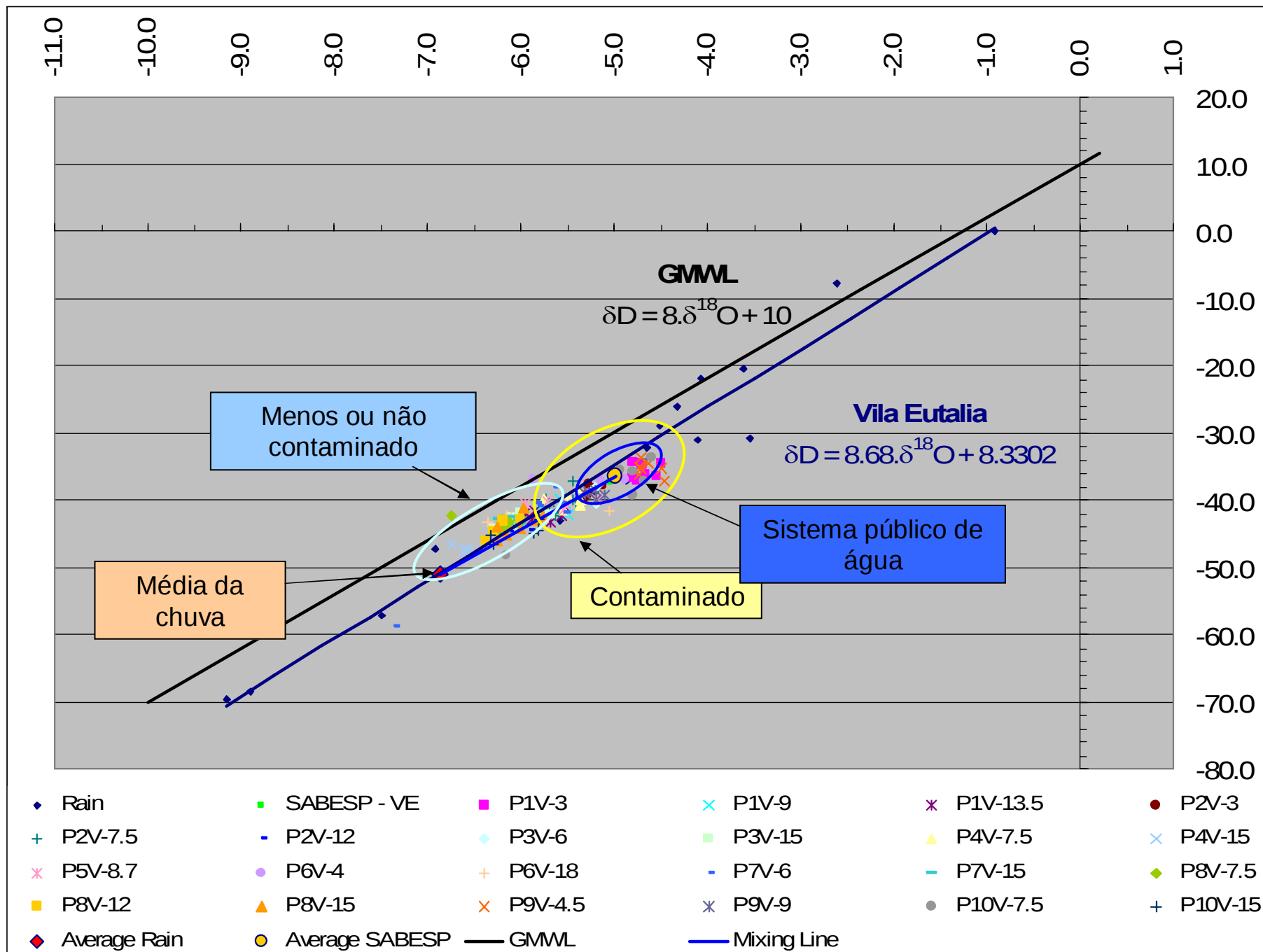


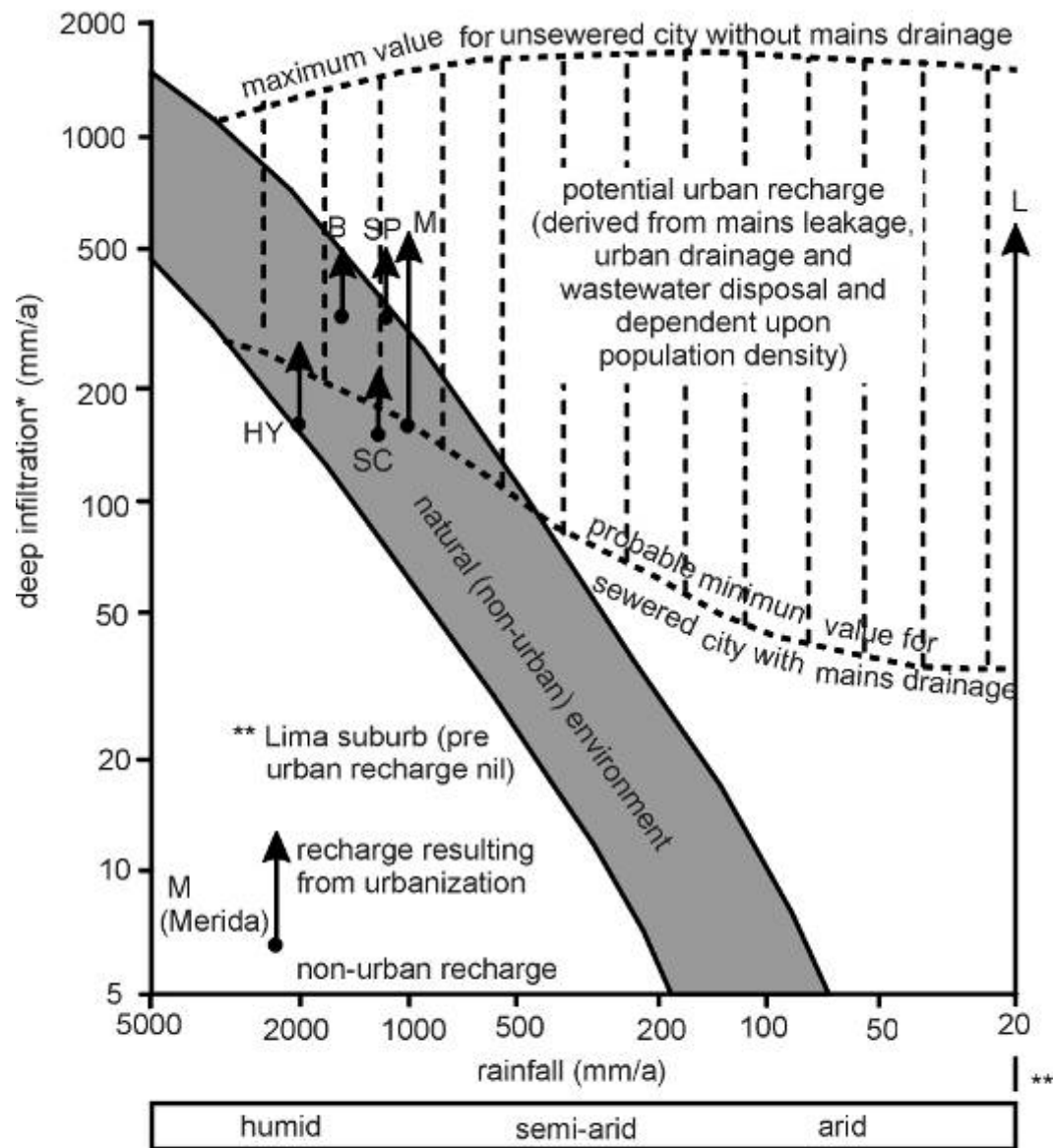
NO₃ mg/L



Recarga Vila Eutália: ocupação residencial de classe média

Método	Recarga (mm/a)
Aproximação de Darcy	437 (recarga total)
Flutuação do nível de água	183 (recarga natural)
$^{18}\text{O}/\text{D}$ composição	70% Sabesp + 30% natural
Composição de íons maiores	Esgoto + água potável da rede



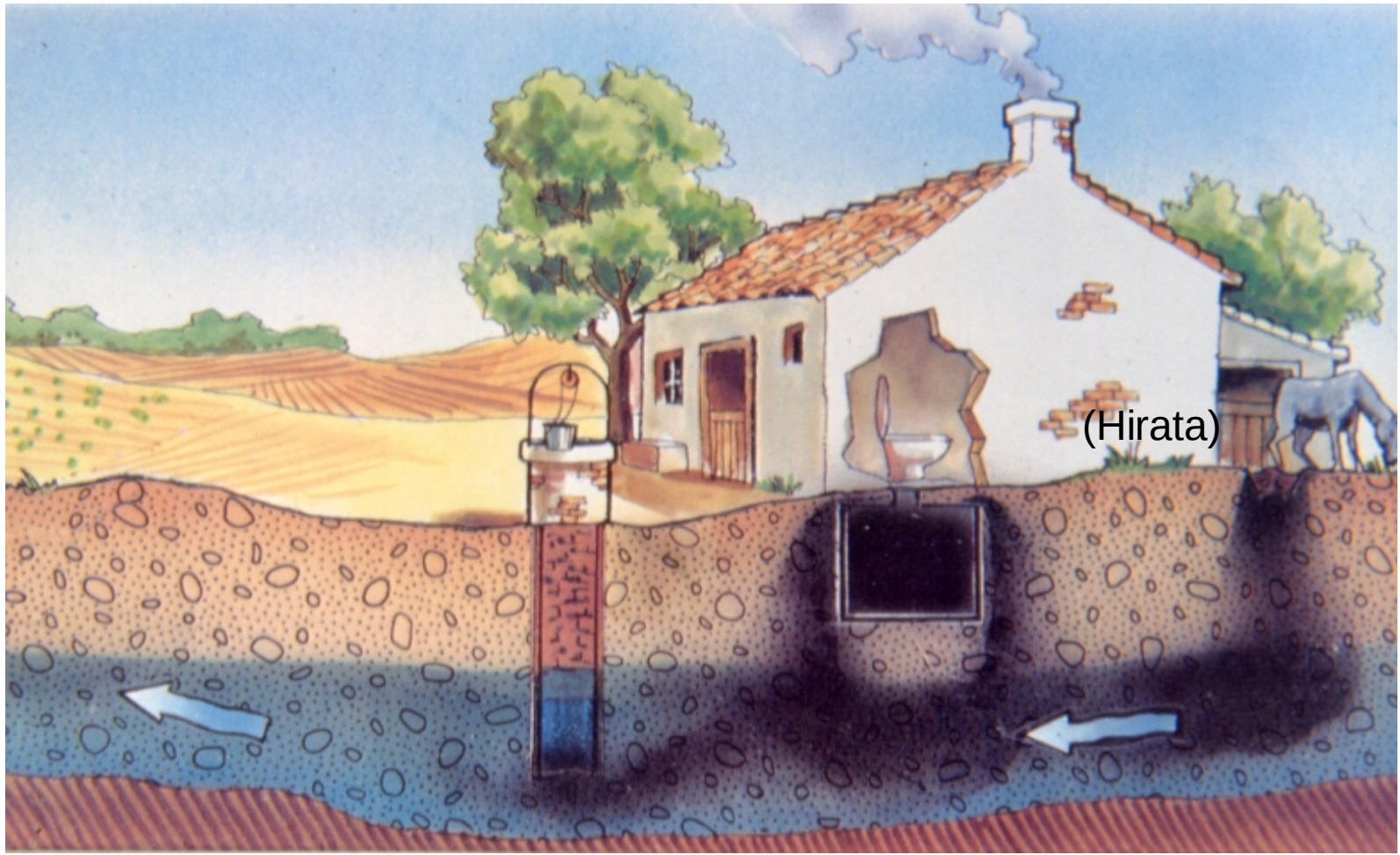


* to unconfined or semi-confined aquifer recognising that surface runoff becomes more frequent in high rainfall situations, but not making any allowance for phreatic evapotranspiration

Recarga potencial
causada por
urbanização
**Geralmente,
ocorre aumento
da recarga líquida**

(after Foster et al 1993)

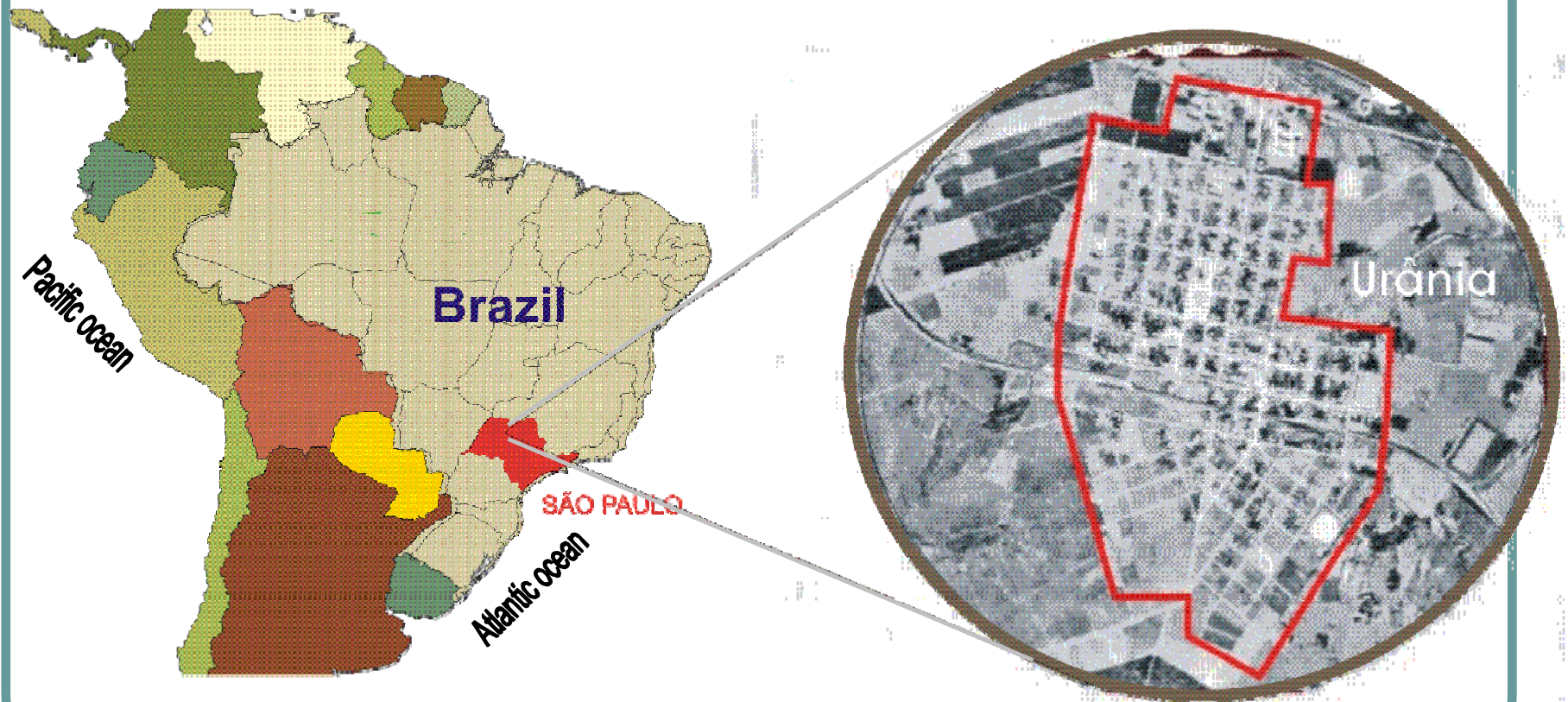
Contaminação por tanques sépticos



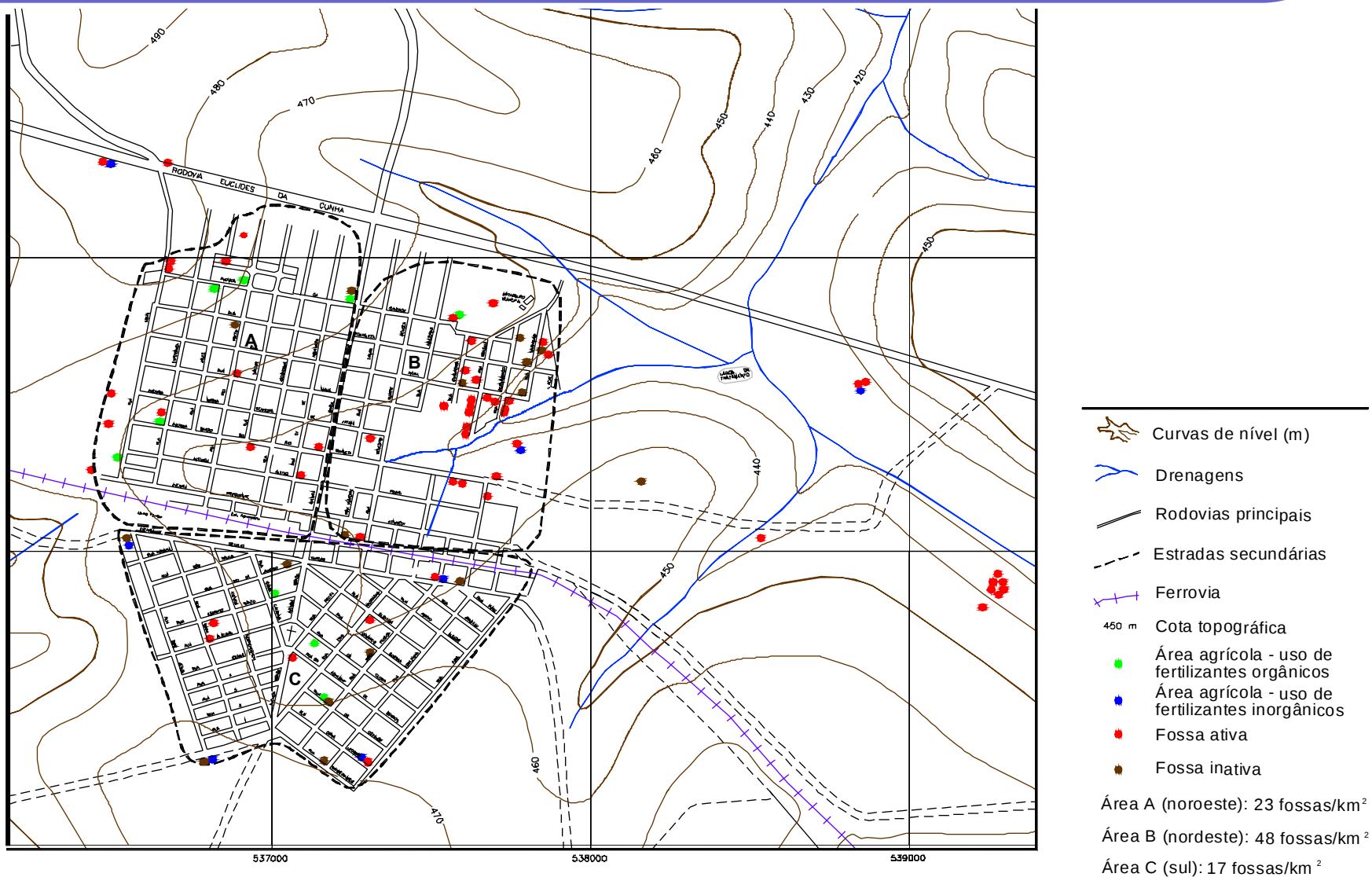
Tanque séptico em favelas no Brasil



Urânia: uma pequena cidade do interior de São Paulo



Localização dos tanques sépticos e poços rasos e profundos em Urânia (SP)

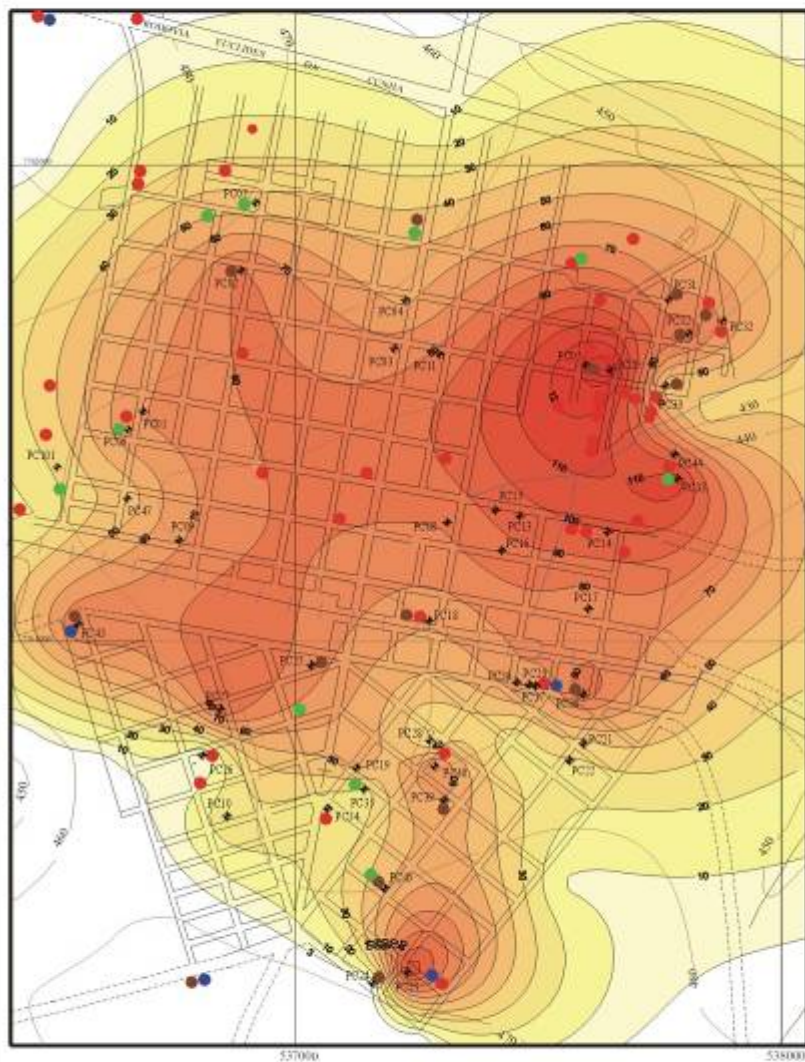


- Embora a rede de esgoto já exista desde os anos de 1980 cobrindo quase toda a cidade, altas concentrações de nitrato são observadas na cidade.
- É possível que o nitrato gerado antes dos anos de 1980 ainda esteja no aquífero (condição aeróbica) [recebendo também fugas da rede de esgoto: a exemplo do que ocorre em São Paulo].
- A mesma condição é observada em muitas cidades brasileiras

Nitrato na porção rasa do aquífero e de meia profundidade

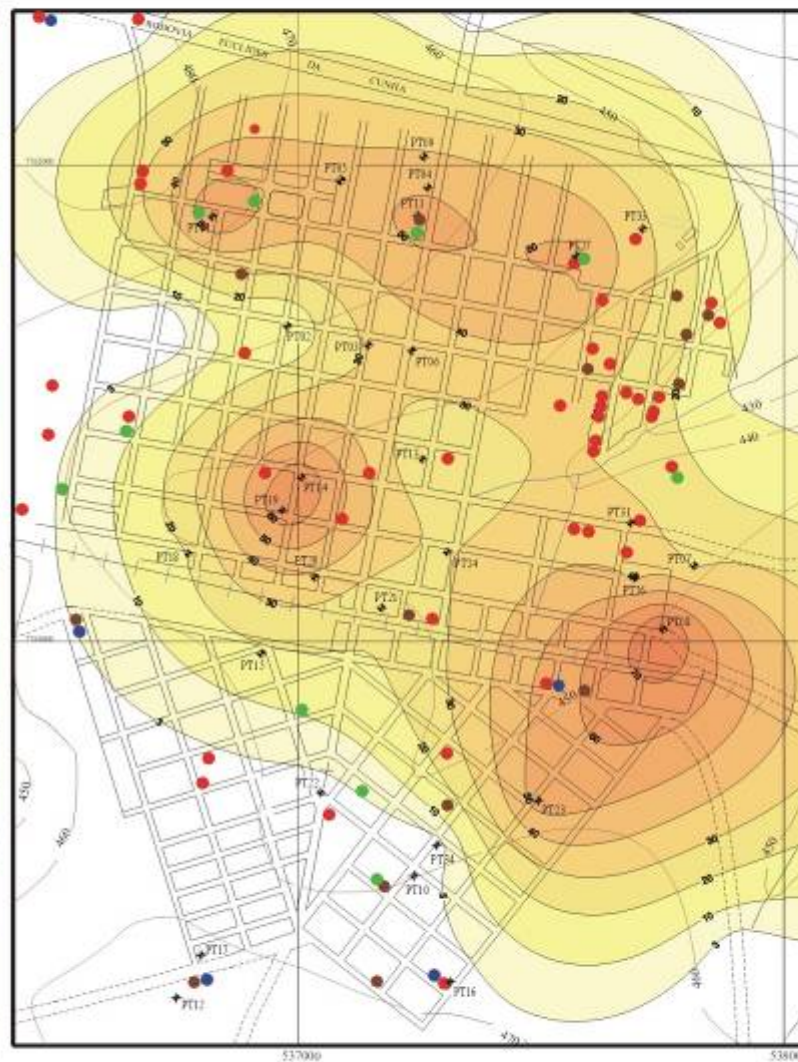
FIGURA 6.10
ISOCONCENTRAÇÃO DE NITRATO (mg/L)
ZONAS RASA E INTERMEDIÁRIA
Estação úmida

ZONA RASA



Up to 30m

ZONA INTERMEDIÁRIA



30-80 m



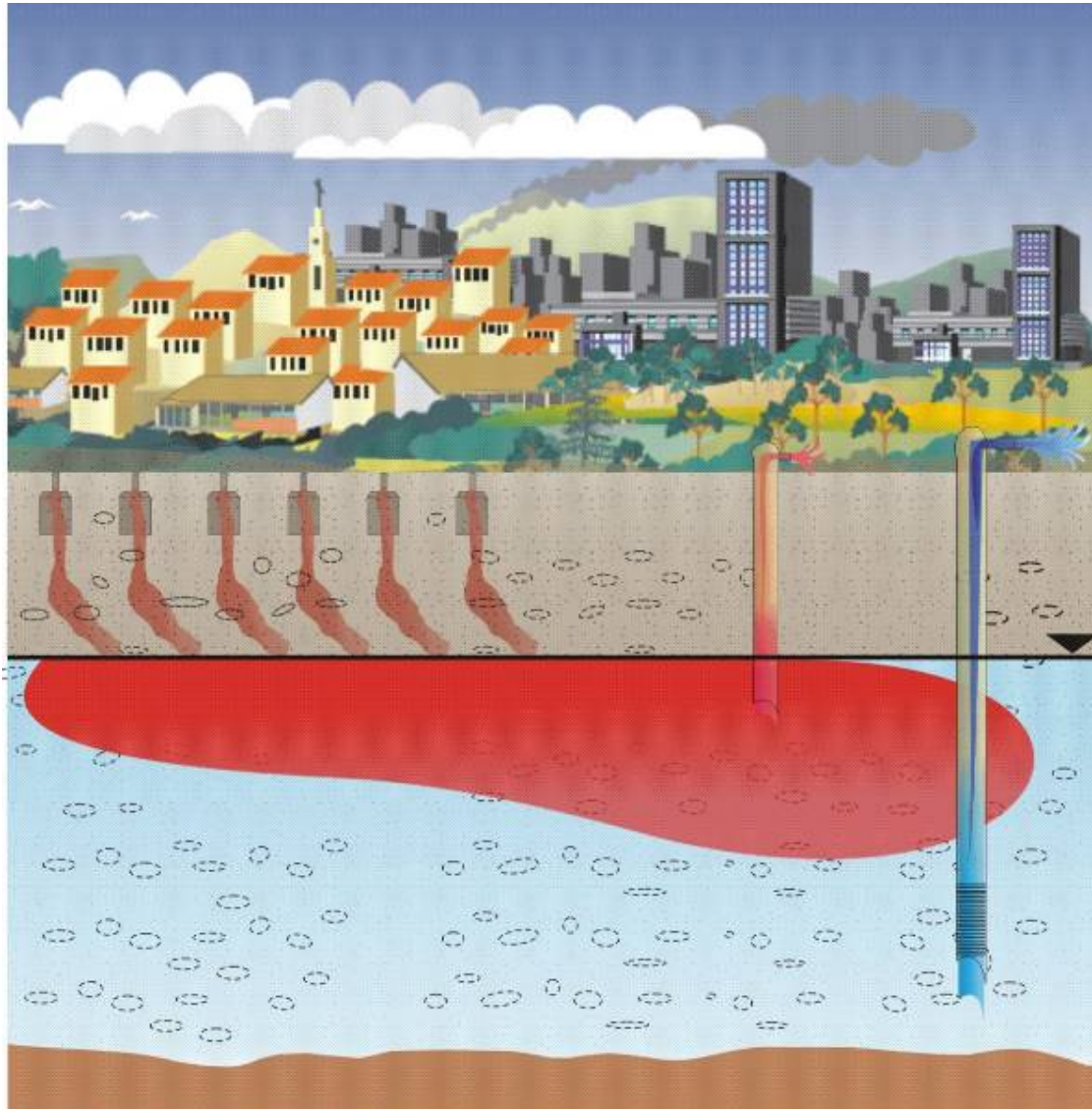
- Curvas de nível (m)
- Drenagens
- Rodovias principais
- Estradas secundárias
- Ferrovias
- PO1 Poço cadoimbo
- PO2 Poço tubular
- Área agrícola com uso de fertilizantes orgânicos
- Área agrícola com uso de fertilizantes inorgânicos
- Fossa ativa
- Fossa inativa

Concentração de nitrato (mg/L)

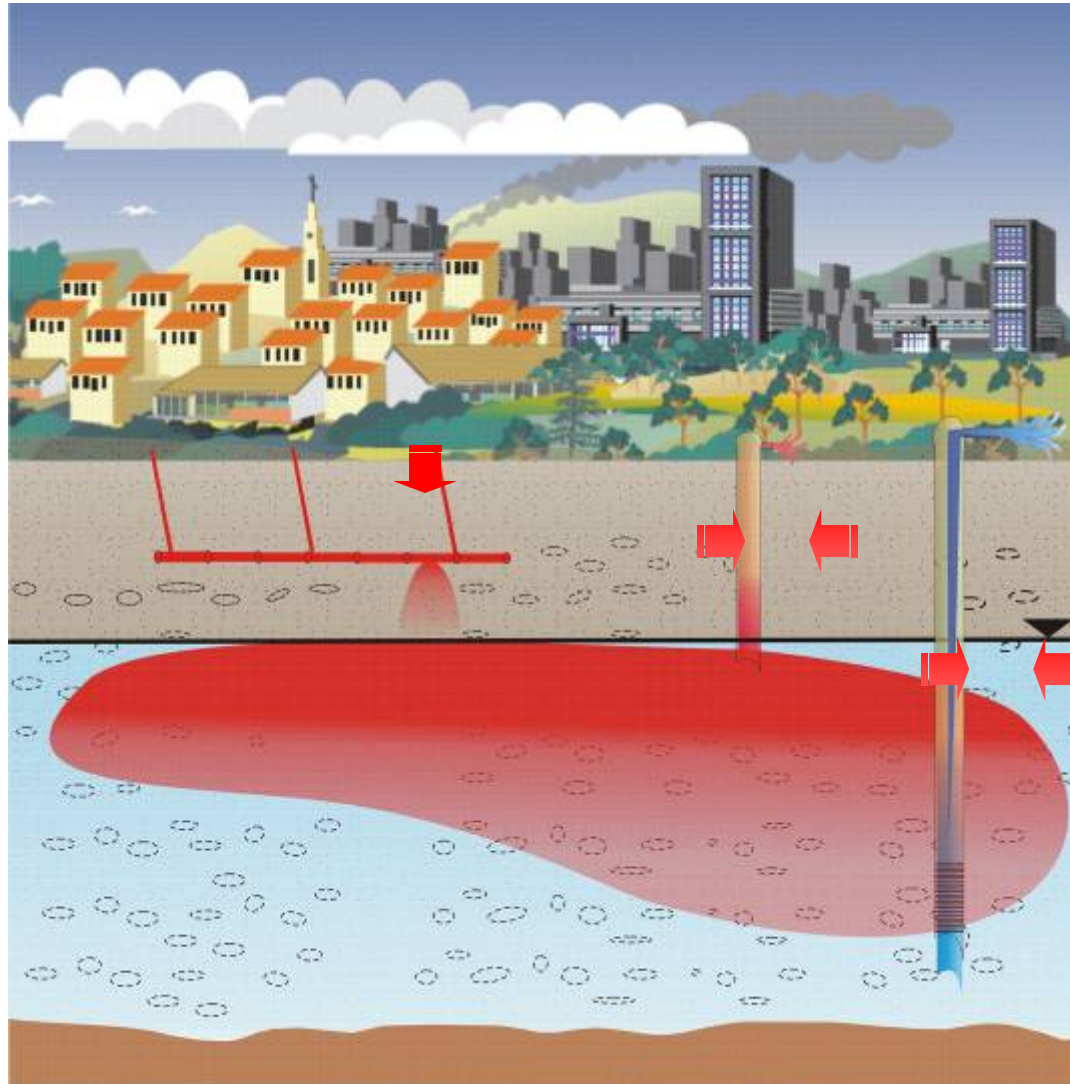


0 50 100 150 200 250
ESCALA 1:10.000

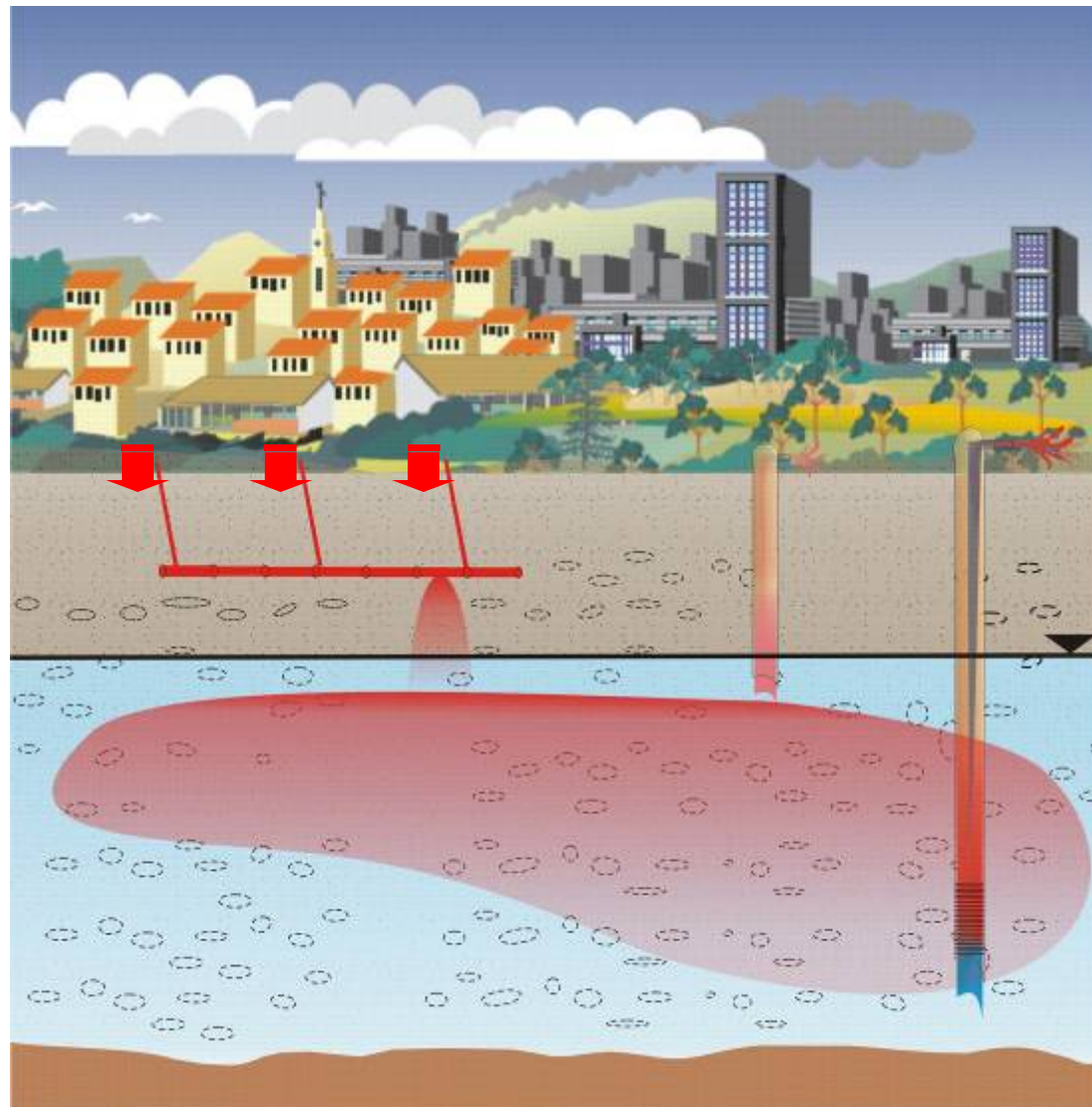
Antes de 1980: a parte rasa do aquífero é contaminado por sistemas de saneamento *in situ* (tanques séptico)



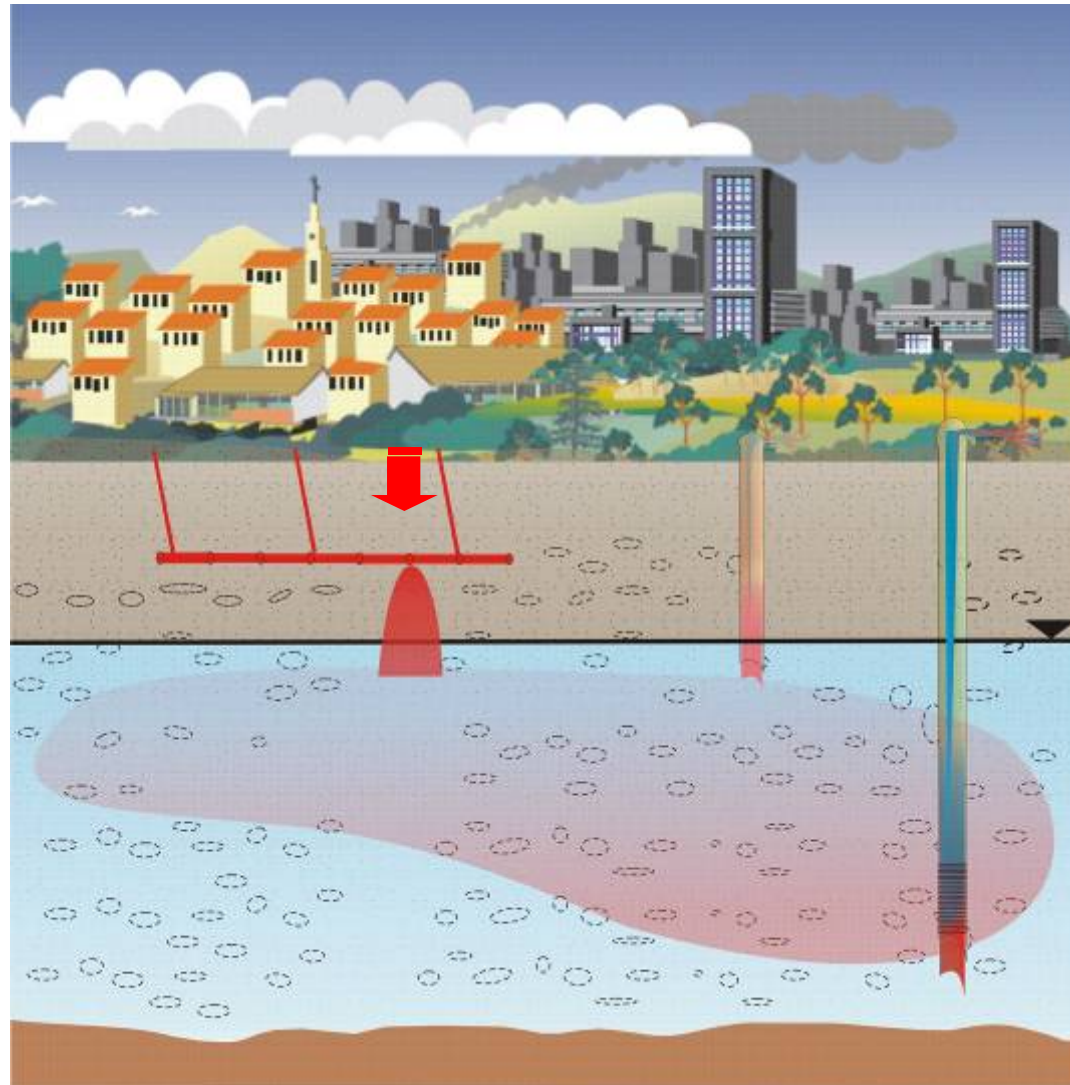
Hoje: desde 1980 a rede de esgoto cobre a cidade, mas ainda se observam problemas de contaminação em poços. Mas não nos poços municipais, mais profundos.



Será uma questão de tempo?



Ou somente a diluição (ou algo de desnitrificação) será capaz de resolver o problema?

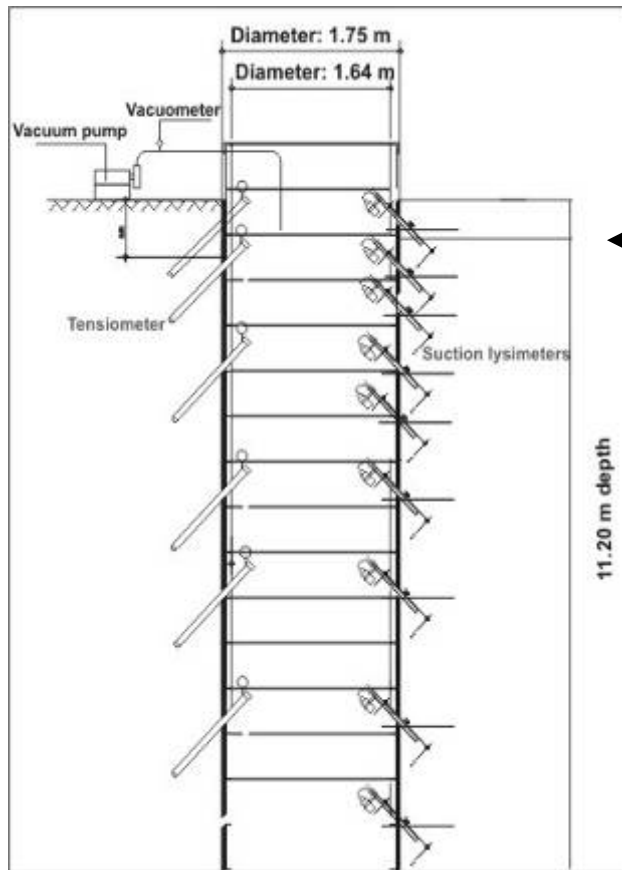


- Para entender a evolução do problema, um estudo do impacto de uma fossa séptica está sendo implementado em Urânia, através do estudo hidrogeoquímico: *íons maiores* (incluindo a série nitrogenada), *íons menores* e isotópicos: *isótopos estáveis* ($^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$, $^{15}\text{N}_{\text{N}_2\text{O}}$, $^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ e $^{18}\text{O}_{\text{N}_2\text{O}}$), e *gases* (O_2 , CO_2 , N_2O e CH_4)

Tanque séptico na cidade de Urânia



Estação experimental



- ✓ 12 tensiômetros, 12 lisímetros,
- ✓ 12 portas para gases;
- ✓ 1 poço de monitoramento



Equipamento para amostragem

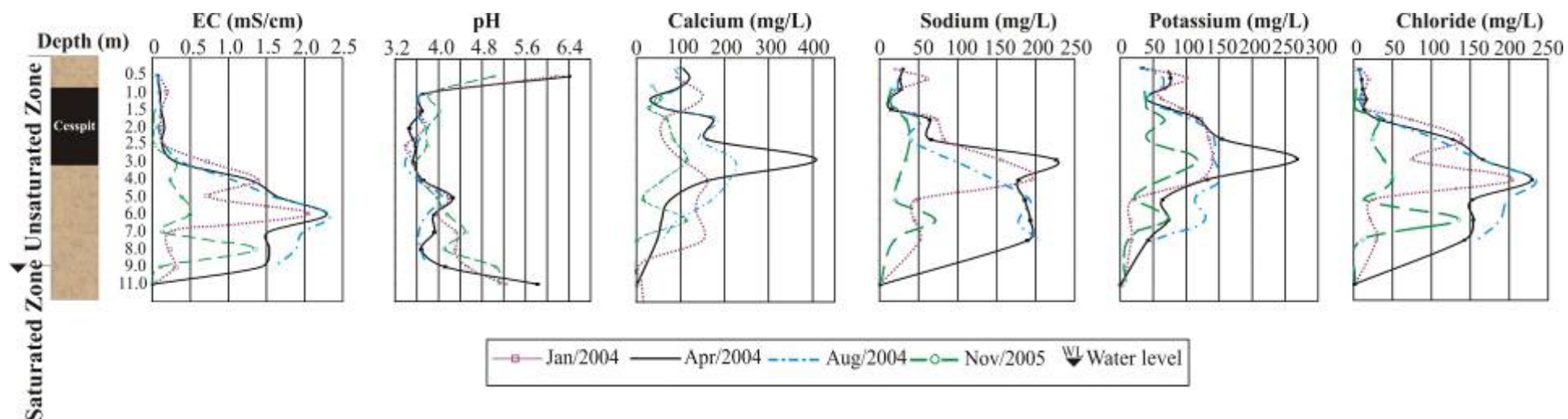


Amostras na zona não saturada

Água: íons, $^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$, $^{18}\text{O}/\text{D}$, $^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$, TOC

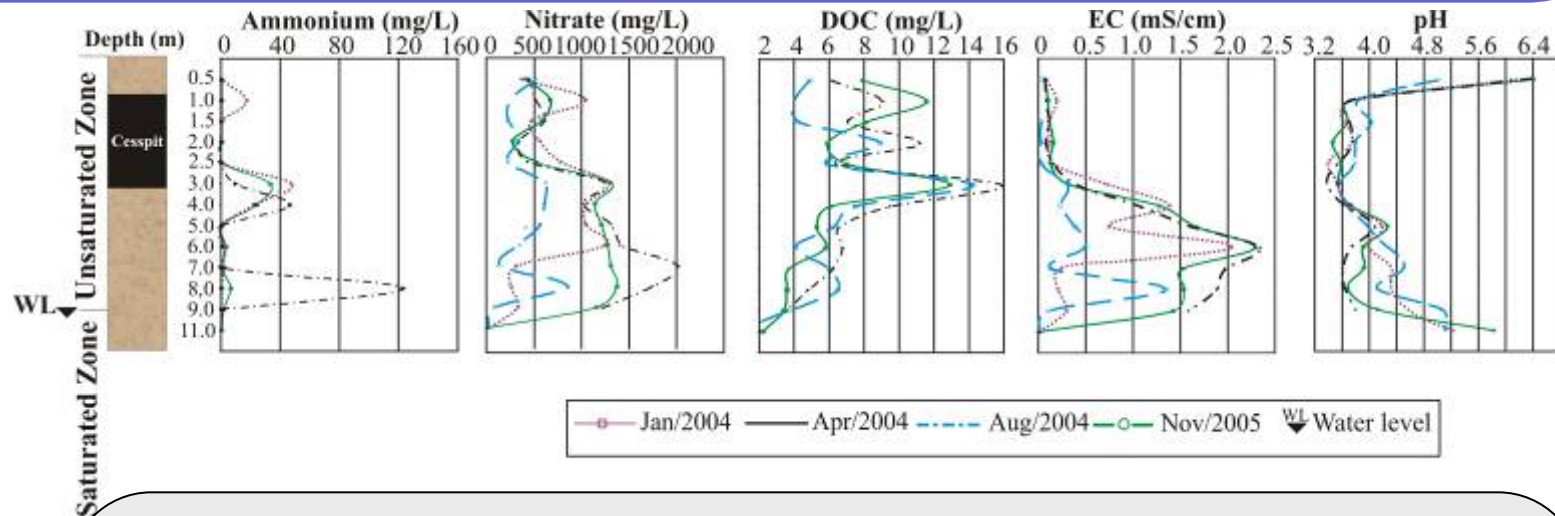
Gases: $^{15}\text{N}_{\text{N}_2\text{O}}$, $^{18}\text{O}_{\text{O}_2}$, $^{18}\text{O}_{\text{NO}_2}$, $^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$, O_2 , CO_2 , N_2O , CH_4

Perfis químicos



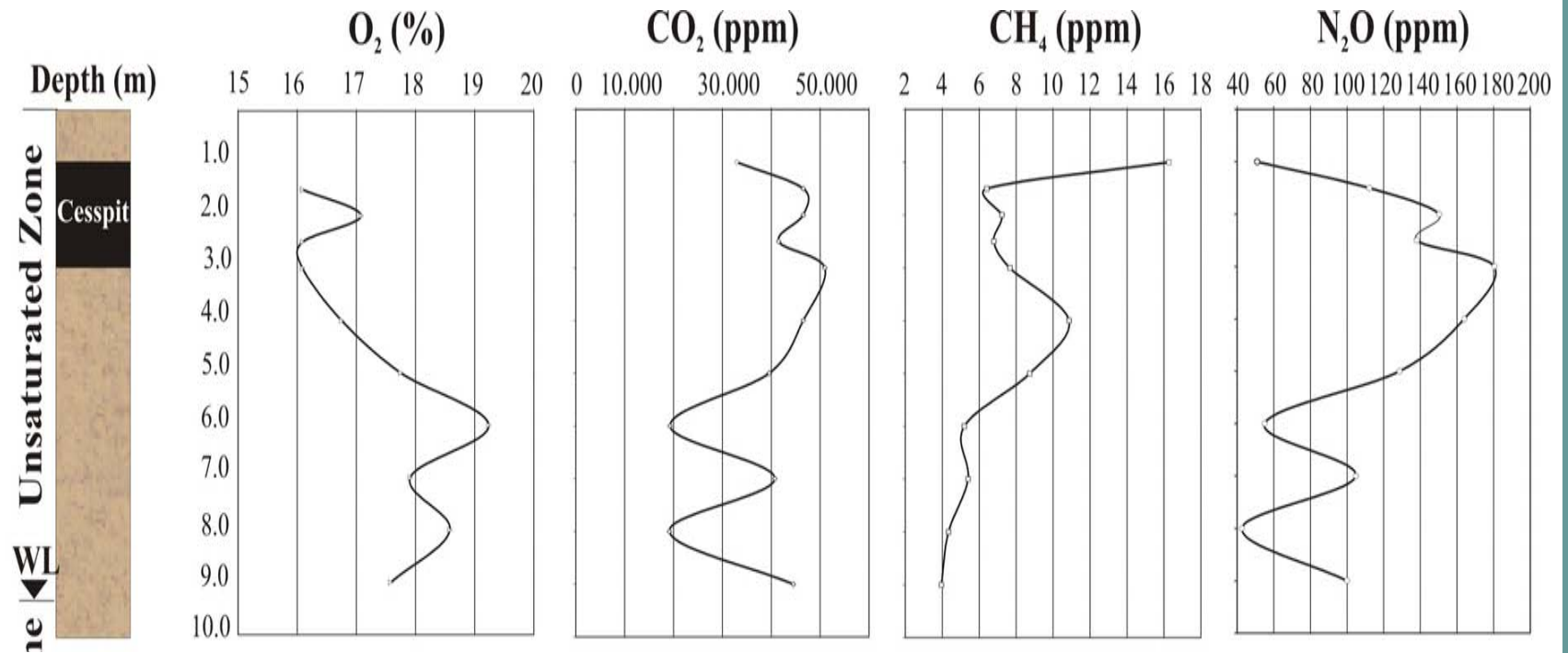
- ✓ Água com alta concentração de TDS (EC até 2850 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ;
- ✓ Acentuado processo de nitrificação na zona não saturada;
- ✓ pH entre 3.40 e 6.41 (**efeito da nitrificação**);
- ✓ Ions: Cátions $\Rightarrow$ sódio, cálcio, potássio
Anions $\Rightarrow$ nitrato, cloreto

Nitrogênio e COD

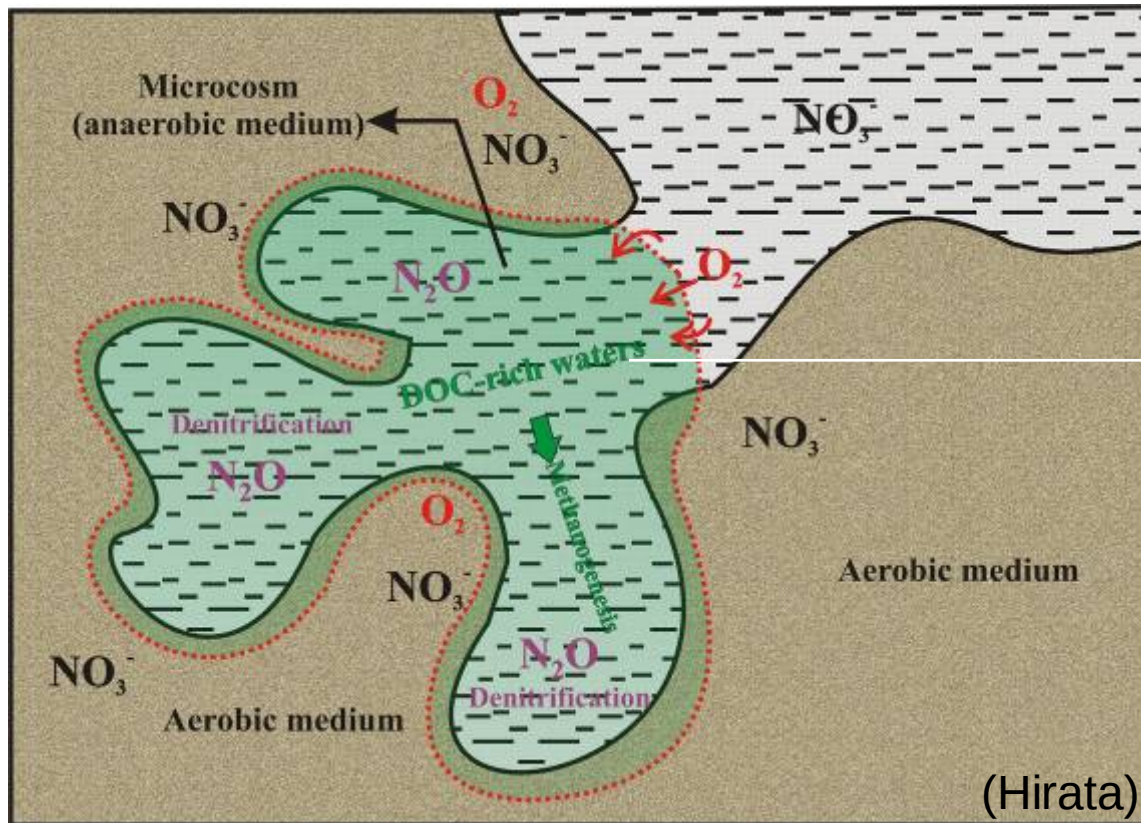


- ✓ Os parâmetros apresentam um *zigzag* ao longo de todo o perfil (principalmente durante o período seco);
- ✓ Picos maiores em 2.0; 4.0 e 6.0 m (**níveis menos permeáveis**);
- ✓ Identificação dos seguintes processos: a) oxidação da matéria orgânica; b) amonificação; c) nitrificação; d) desnitrificação; e) metanogêneses

Gases da zona não saturada

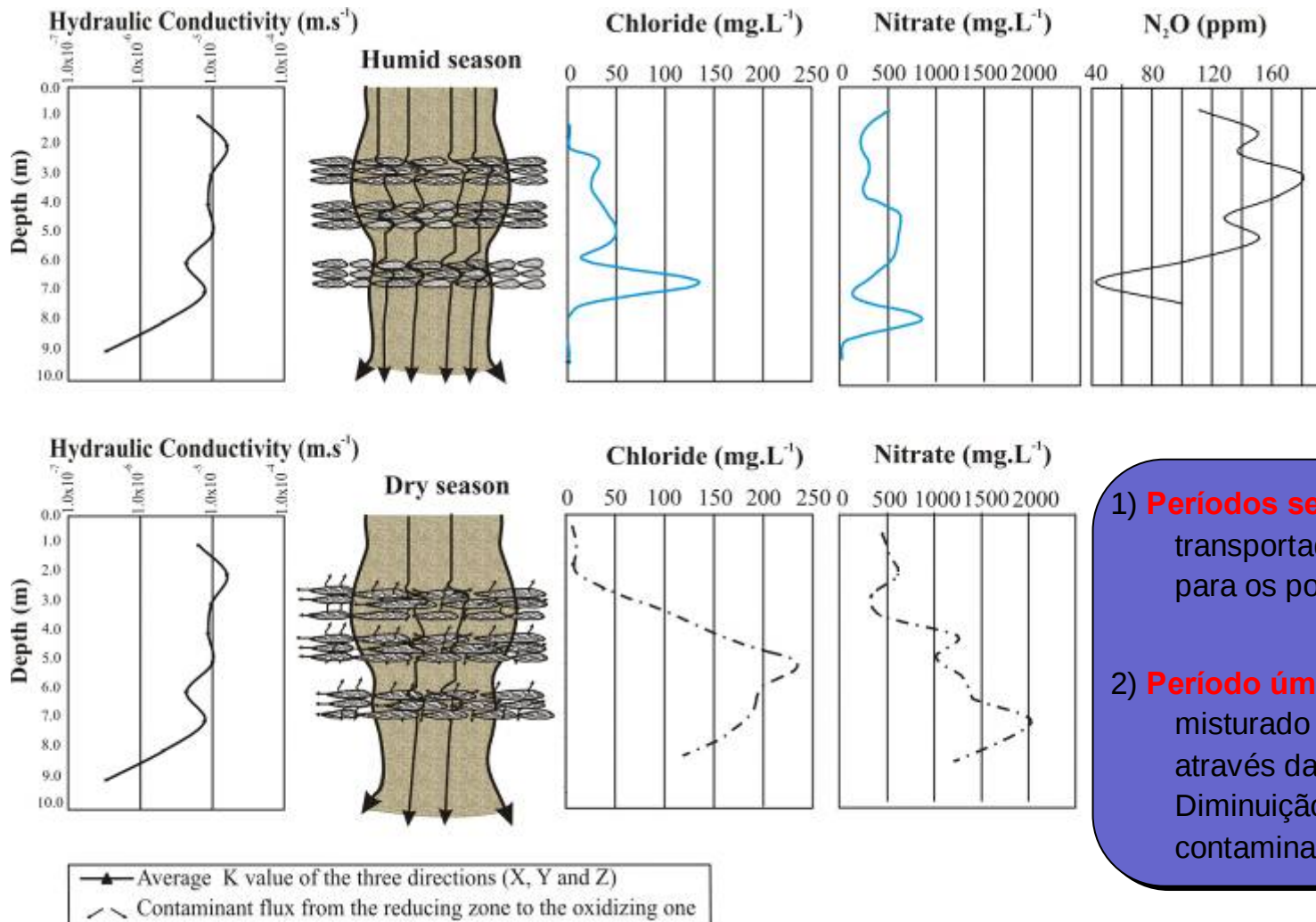


O processo de nitrificação e desnitrificação estão ocorrendo ao mesmo tempo no mesmo local (ou quase)



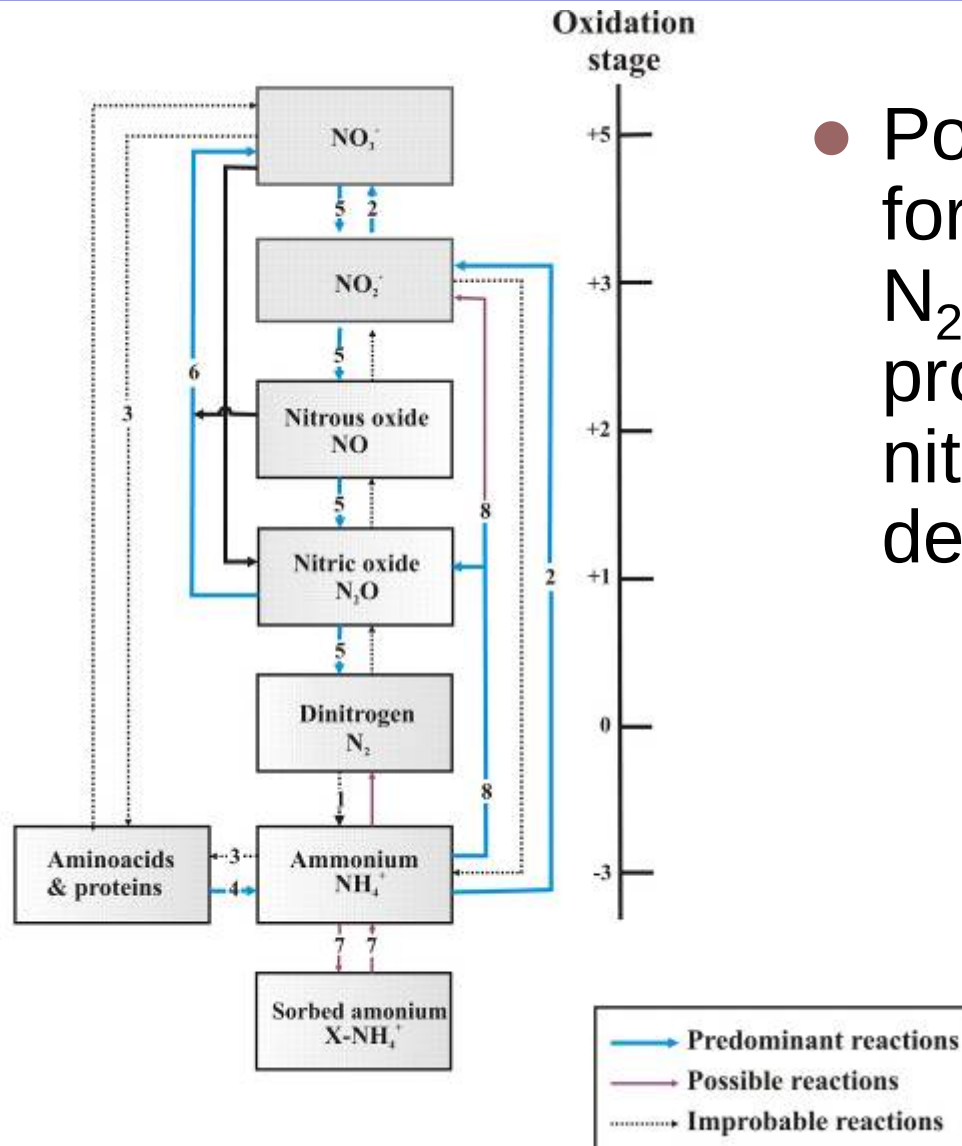
✓ Esse comportamento pode ser explicado pela presença de **microcosmos** (principalmente associados com um material de menor condutividade hidráulica) que restringem o acesso de águas ricas em oxigênio.

Hidroquímica: variação sazonal



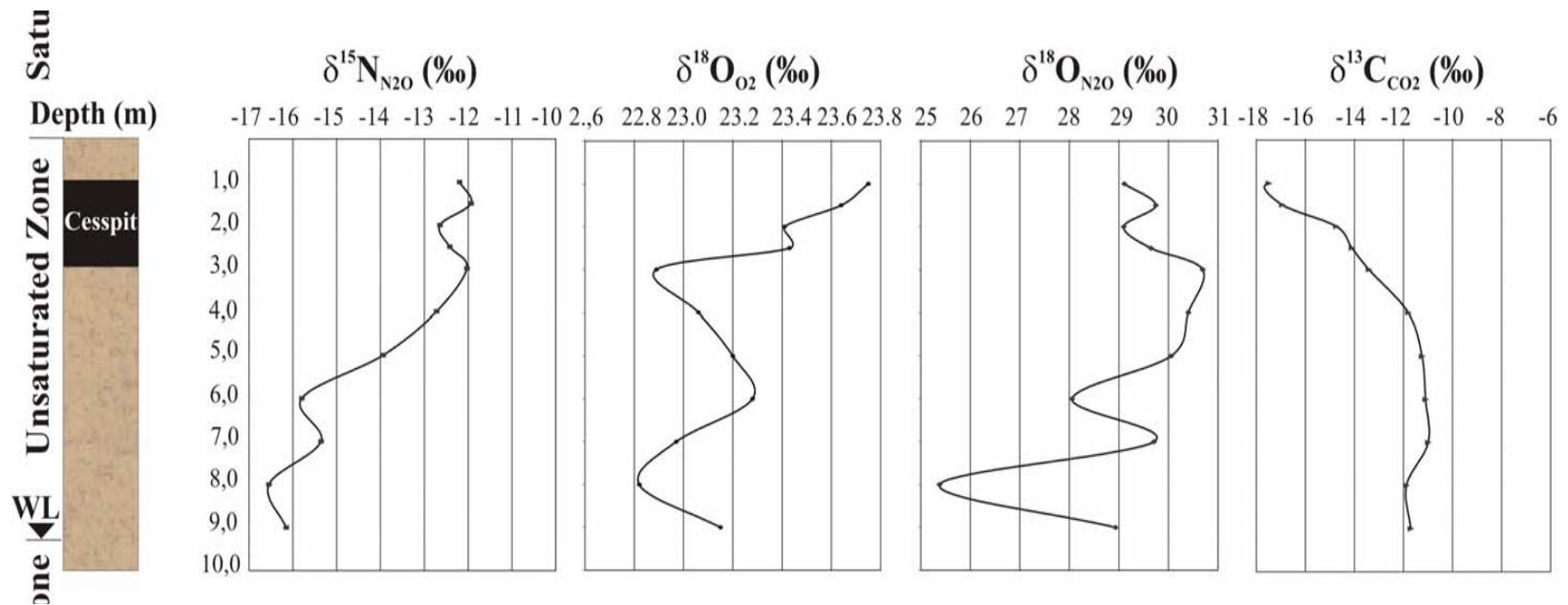
- 1) **Períodos secos:** o contaminante é transportado por difusão molecular para os poros mortos
- 2) **Período úmido:** o contaminante é misturado com a água que passa através da zona não saturada. Diminuição da concentração do contaminante

Espécies químicas no ciclo do nitrogênio



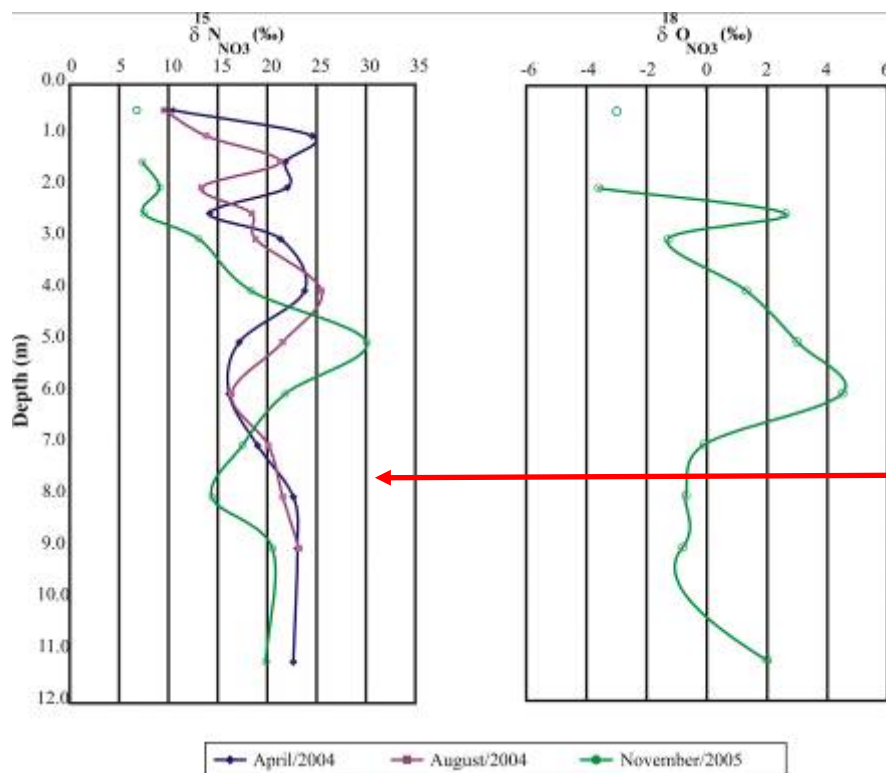
- Possível formação de N_2O nos processos de nitrificação e desnitrificação

Outros isótopos estáveis em gases



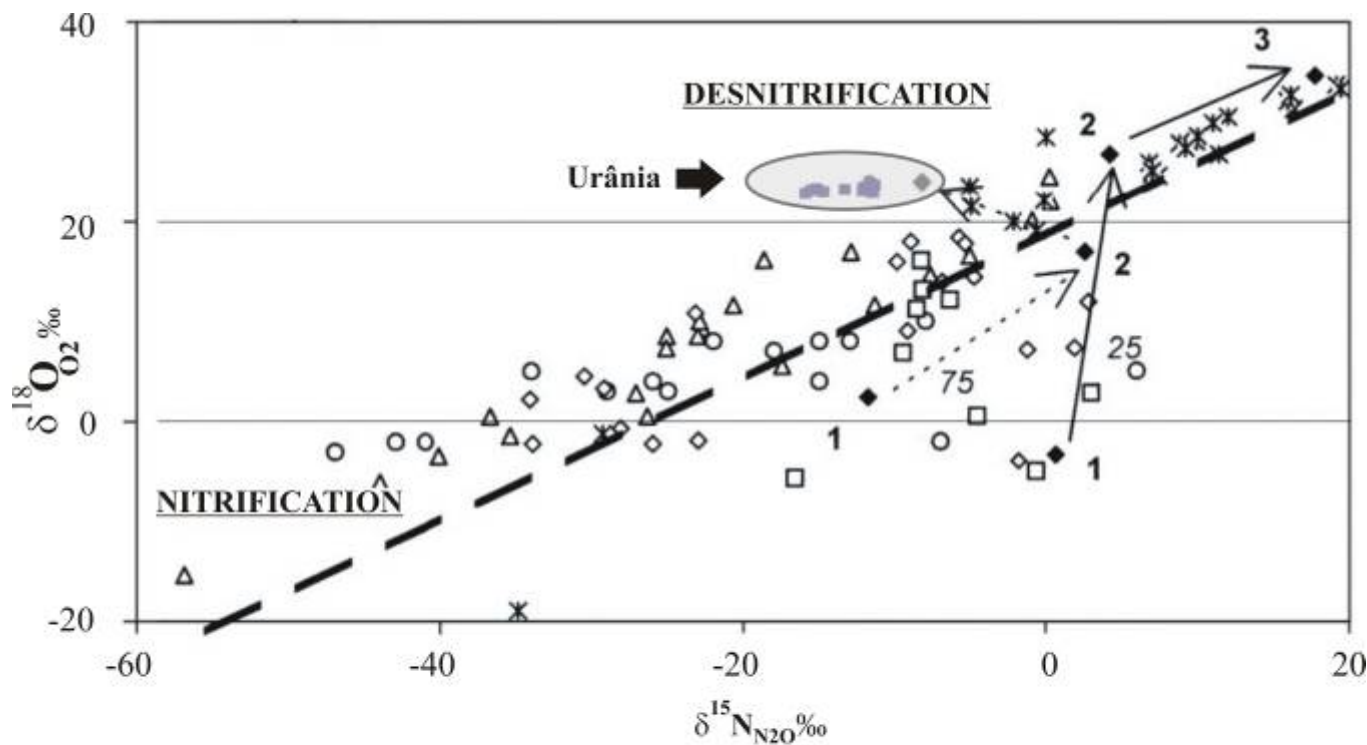
Isótopos estáveis

• $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$



- ✓ +6.80 to +30.09 ‰ (período úmido)
+9.54 to +23.25 ‰ (período seco)
- ✓ **Mais enriquecido em $\delta^{15}\text{N}$:** no tanque séptico (até 2.0 m) e áreas próximas (até 6.0 m)
- ✓ O range é mais enriquecido que o finger print para esgotos regulares para o nitrato (+8.1‰ to +13.1‰)
- ✓ Isso pode ser um indicativo de desnitrificação

- $\delta^{15}\text{N}_{\text{N}_2\text{O}}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{O}_2}$



△ Pasture soil (YAMULKI *et al.*, 2000; YAMULKI *et al.*, 2001)

○ Agricultural soil (PÉREZ *et al.*, 2001)

✱ Landfill soil (MANDERNACK & Rahn, 2000)

✱ Pure culture (SUTKA *et al.*, 2003)

◆ Pasture soil (BOL *et al.*, 2003)

◇ Tropical forest soil (PÉREZ *et al.*, 2000)

□ Pasture soil (TILSNER *et al.*, 2003)

$\delta^{15}\text{N}_{\text{N}_2\text{O}}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{N}_2\text{O}}$ (-16.16 a -11.94‰ e 28.05 a 30.69‰) eram comparados com valores reportados por outros autores (-37 to -11‰ e -21 to +57‰).

Eles indicam que o N_2O detectado na área é **produzido por desnitrificação**

Se Gabriel Garcia Marques fosse um hidrogeólogo talvez ele poderia contar-nos a seguinte estória....

- A água subterrânea é um recurso muito importante para o Brasil em suas áreas urbanas. **A dependência é aumentada por causa da falta de água superficial de boa qualidade, a bom preço, bem como pelo preço da água subterrânea e, em algumas áreas, pela falta de outra opção (em áreas pobres peri-urbanas)**
- A água subterrânea é um recurso **muito democrático**: é disponível para pessoas pobres em áreas peri-urbanas de cidades (onde não há outra fonte) e para a classe média e alta (por causa do baixo custo comparativamente à água das companhias de água).

Se Gabriel Garcia Marques fosse um hidrogeólogo...

- A contaminação de um aquífero é algumas vezes um problema irreversível, por causa das limitações técnicas e econômicas;
- A proteção das águas subterrâneas é economicamente menos custoso que a sua remediação;
- O correto controle da ocupação da terra pode reduzir drasticamente os problemas de contaminação de aquíferos



Alguns mecanismos para melhorar o manejo das águas subterrâneas em áreas urbanas implementados no Brasil

- O **desenvolvimento de uma clara definição do direito da água** (separado do direito à propriedade do terreno), pela força de licença de exploração e perfuração de poços;
- A **criação de comitês estaduais e locais**, com capacitação técnica e financeira para supervisionar e implementar programas ambientais, cuja jurisdição deva ser a bacia hidrográfica.

Mas esses “remédios” funcionam bem em muitos países desenvolvidos, mas eles funcionam bem em países em desenvolvimento?

- Mas não é por que uma agência implementa (ou impõe) uma política de proteção dos recursos hídricos, que ela será obedecida.
- No Brasil há a expressão: leis que pegam e leis que não pegam....

Mas esses “remédios” funcionam bem em muitos países desenvolvidos, mas eles funcionam bem em países em desenvolvimento?

- O comitê de bacia necessita criar um consenso social para superar a resistência para introduzir uma política lógica para os recursos hídricos.
- Em contraste com a água superficial, a água subterrânea é obtida por milhares de poços e operados individualmente. É quase impossível controlar todos os poços sem a participação do usuário. Então, **a implementação dessas políticas tem que envolver o público.**
- Existe falta de bons exemplos de participação social no manejo de água subterrânea no Brasil.

Outras limitações no Brasil e em outros países em desenvolvimento:

- **Falta de pessoal técnico bem treinado** para conduzir esses programas de outorga e descarga de efluentes contaminantes;
- O **conceito de sustentabilidade associado à extração e vulnerabilidade à contaminação de aquíferos não é ainda bem entendido**, devido às incertezas hidrogeológicas (principalmente trabalhando com pouca informação hidrogeológica)

- Finalmente, o público deve não somente ser informado sobre os impactos negativos da má gestão, mas que essa falta resultará em **perdas financeiras reais** (o real valor da água subterrânea) para a comunidade.
- Esta informação tem que ser usada para convencer o usuário em atender a lei e outorgar suas captações. O programa deve envolver uma campanha para a criação dessa consciência.
- Todos tem a ganhar com um aquífero bem administrado.

LAMO: laboratório de modelos físicos



Universidade de São Paulo

Ricardo Hirata
Instituto de Geociências
rhirata@usp.br