



**REMEDIAÇÃO DE ÁREAS  
CONTAMINADAS:  
CONFINAMENTO GEOTÉCNICO,  
BARRERIAS PERMEÁVEIS,  
BARRERIAS REATIVAS**

Maria Eugenia Gimenez Boscov

PHA 2353 - 2020

# Recuperação de áreas degradadas

- ❖ A recuperação de áreas degradadas pode utilizar diversas atividades geotécnicas, como terraplenagem, dragagem, drenagem, obras de contenção de erosão, assim como envolver a **remediação de áreas contaminadas**.

# Potencial de contaminação em áreas urbanas

- ❖ Postos de abastecimento
- ❖ Indústrias licenciadas (porcentagem de potencialmente poluidoras)
- ❖ Áreas industriais abandonadas
- ❖ Aterros sanitários e lixões
- ❖ Estabelecimentos comerciais (oficinas mecânicas, laboratórios, lavanderias)
- ❖ Curtumes, matadouros, frigoríficos

# Potencial de contaminação em áreas rurais

- ❖ Carreamento de defensivos agrícolas e fertilizantes pela água
- ❖ Gás metano emitido pelos animais
- ❖ Vapores de amônia e dióxido de nitrogênio (fezes de animais e fertilizantes à base de nitrogênio)
- ❖ Gás carbônico (uso de combustíveis na mecanização e técnicas de manejo do solo)
- ❖ Queimadas

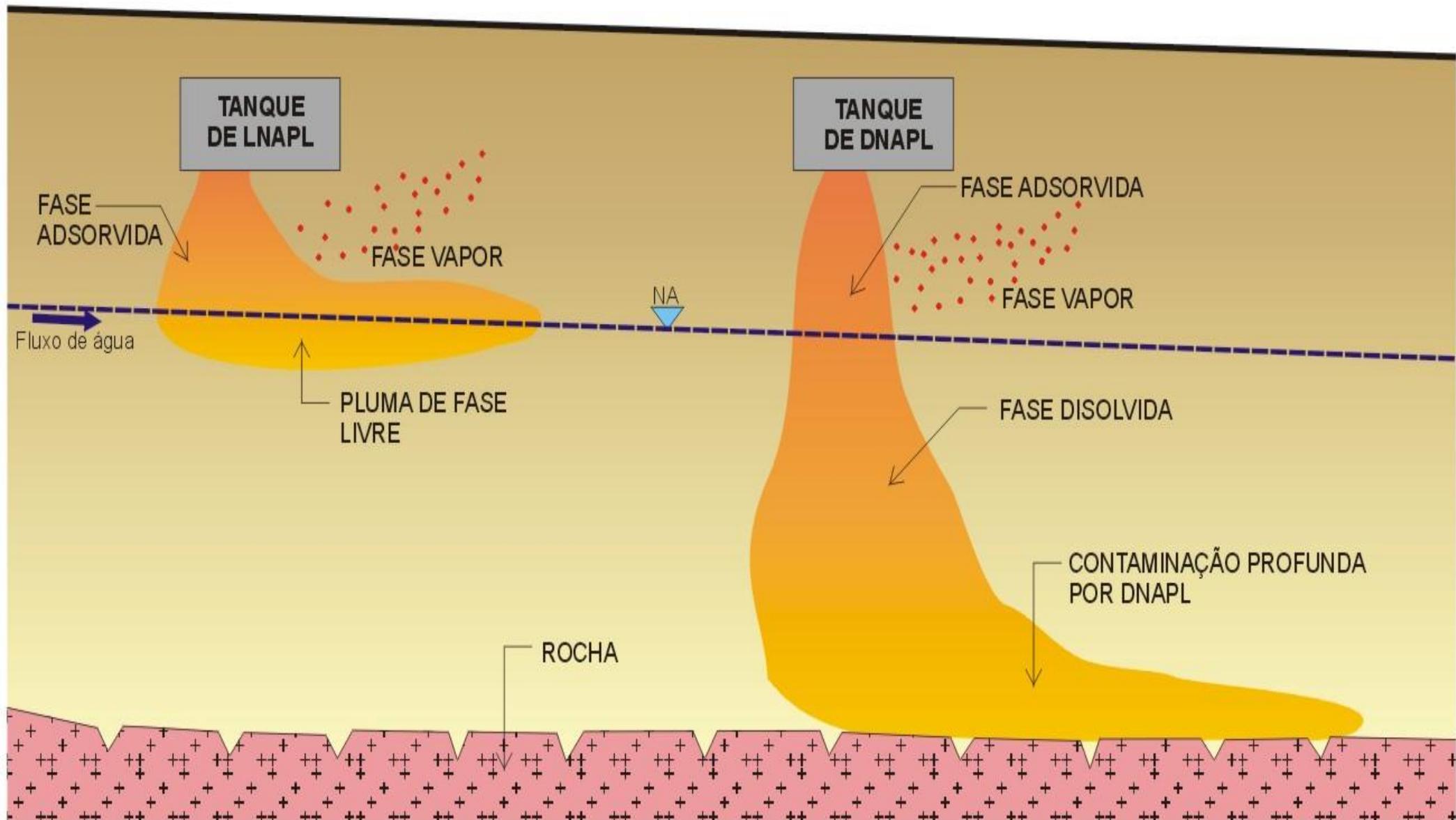
# TIPOS DE CONTAMINANTES

- ❖ Carga orgânica e fertilizantes
- ❖ Microrganismos: vírus e bactérias (patógenos fecais)
- ❖ Salinidade
- ❖ Compostos orgânicos sintéticos
  - compostos de petróleo, VOCs (BTEX), PAHs
  - solventes clorados (PCE, TCE, TCA, MC, VC, PCBs)
  - pesticidas clorados ou fosforados
- ❖ Metais pesados
  - arsênio, cádmio, cromo, chumbo, níquel, zinco, mercúrio
- ❖ Elementos radioativos
- ❖ Cloro, enxofre, arsênio, fósforo, selênio, carbono, enxofre, flúor, boro, nitrogênio

# Poluentes não miscíveis na água

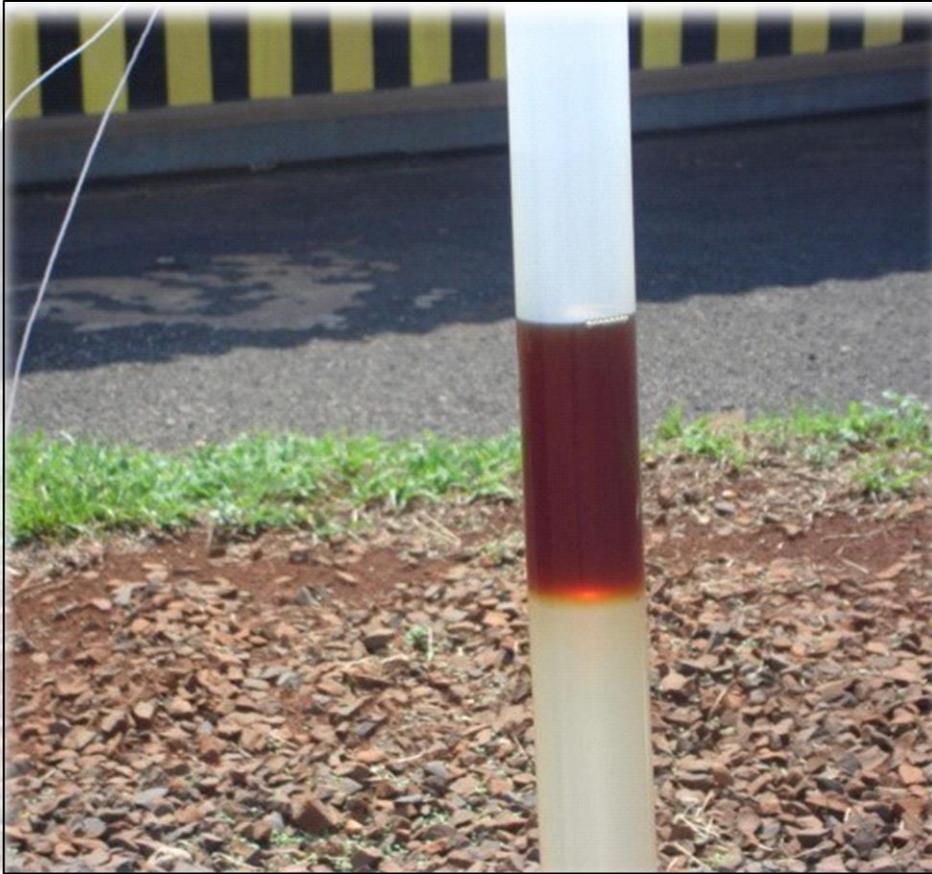
LNAPL – “light non aqueous phase liquid” – imiscível de menor densidade que a água

DNAPL – “dense non aqueous phase liquid” – imiscível de maior densidade que a água



(Campos, 2003)

# FASE LIVRE



# Técnicas de remediação

❖ *In situ* ou *ex situ*

❖ *Ex situ*:

Remoção

Disposição (em aterro adequado) ou tratamento

❖ *In situ*:

Contenção (confinamento) e/ou tratamento

# Técnicas de remediação

- ❖ Remoção de solo
- ❖ Barreiras impermeáveis
- ❖ *Pump and treat*
- ❖ Barreiras hidráulicas
- ❖ Barreiras permeáveis reativas
- ❖ Extração de vapor
- ❖ Extração multifásica
- ❖ *Air sparging*
- ❖ Oxidação/redução
- ❖ Biorremediação
- ❖ *Wetlands*

# Remoção do solo

- ❖ Lençol freático profundo, permeabilidade do subsolo muito baixa, contaminantes ainda não atingiram o lençol freático
- ❖ Remoção do solo contaminado, tratamento e posterior disposição em aterro adequado
- ❖ Principais técnicas de tratamento *ex situ*: tratamento térmico, incineração, “lavagem” de solo, solidificação ou inertização, tratamentos químicos.

# Confinamento geotécnico

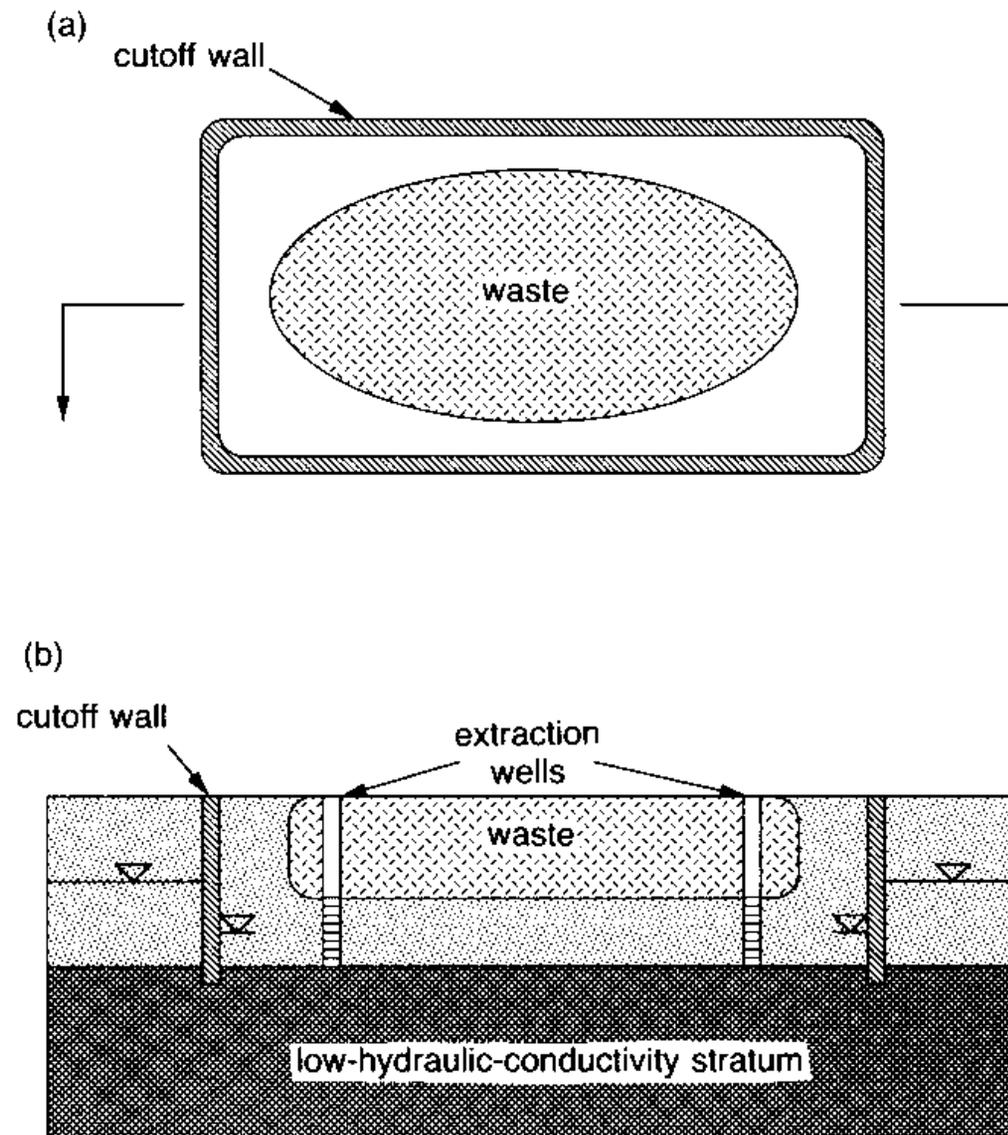
- ❖ Confinamento de um local contaminado por meio de barreiras de baixa permeabilidade, isolando a massa de resíduos ou de materiais contaminados dos seres vivos, impedindo seu contato com águas superficiais, evitando a infiltração e a percolação de águas de chuva em seu interior, assim como o escape de vapores para a atmosfera, e diminuindo o aporte de contaminantes ao lençol freático.

# Confinamento geotécnico

- ❖ É uma medida de remediação aceitável quando outras alternativas têm custos proibitivos e/ou eficácia baixa
- ❖ Volume de solo a ser tratado é muito grande ou há diversos tipos de contaminantes no solo, exigindo uma combinação de técnicas.

# Confinamento geotécnico

- ❖ Barreiras verticais
- ❖ Cobertura
- ❖ Barreiras horizontais de fundo



**Fig. 17.1** Schematic diagram of vertical cutoff wall configuration for typical site remediation project: (a) plan view and (b) cross-section.

# Barreiras verticais

- ❖ Barreiras no perímetro da área contaminada engastadas em estratos de menor permeabilidade.
- ❖ Permeabilidade da barreira deve ser significativamente menor do que a do subsolo natural.
- ❖ Podem ser localizadas em parte do local: a jusante da área contaminada para melhorar a eficiência de sistema de remoção de água subterrânea, ou a montante para evitar a entrada de água subterrânea limpa na área contaminada.

# Barreiras verticais

- ❖ Trincheira escavada preenchida com solo-bentonita, cimento-bentonita, concreto plástico ou concreto reforçado
- ❖ Por injeção: “jet grouting”
- ❖ Cortinas de estacas-prancha
- ❖ Painéis de geomembranas

# TRINCHEIRA ESCAVADA

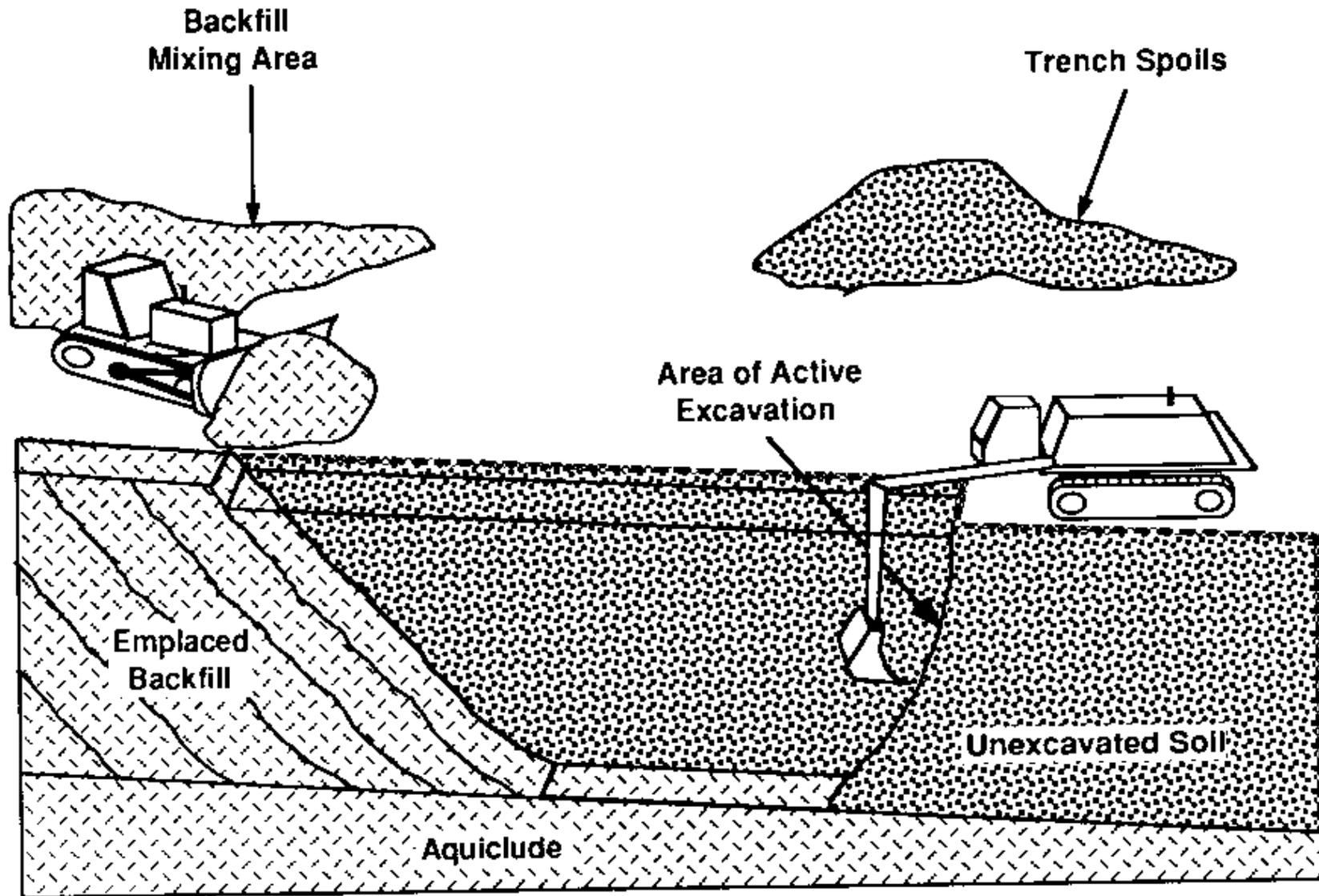
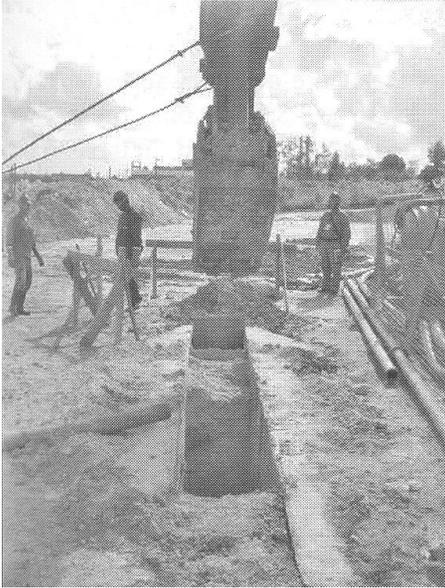


Fig. 17.2 Excavation of trench and placement of soil-bentonite backfill.

(Daniel, 1993)

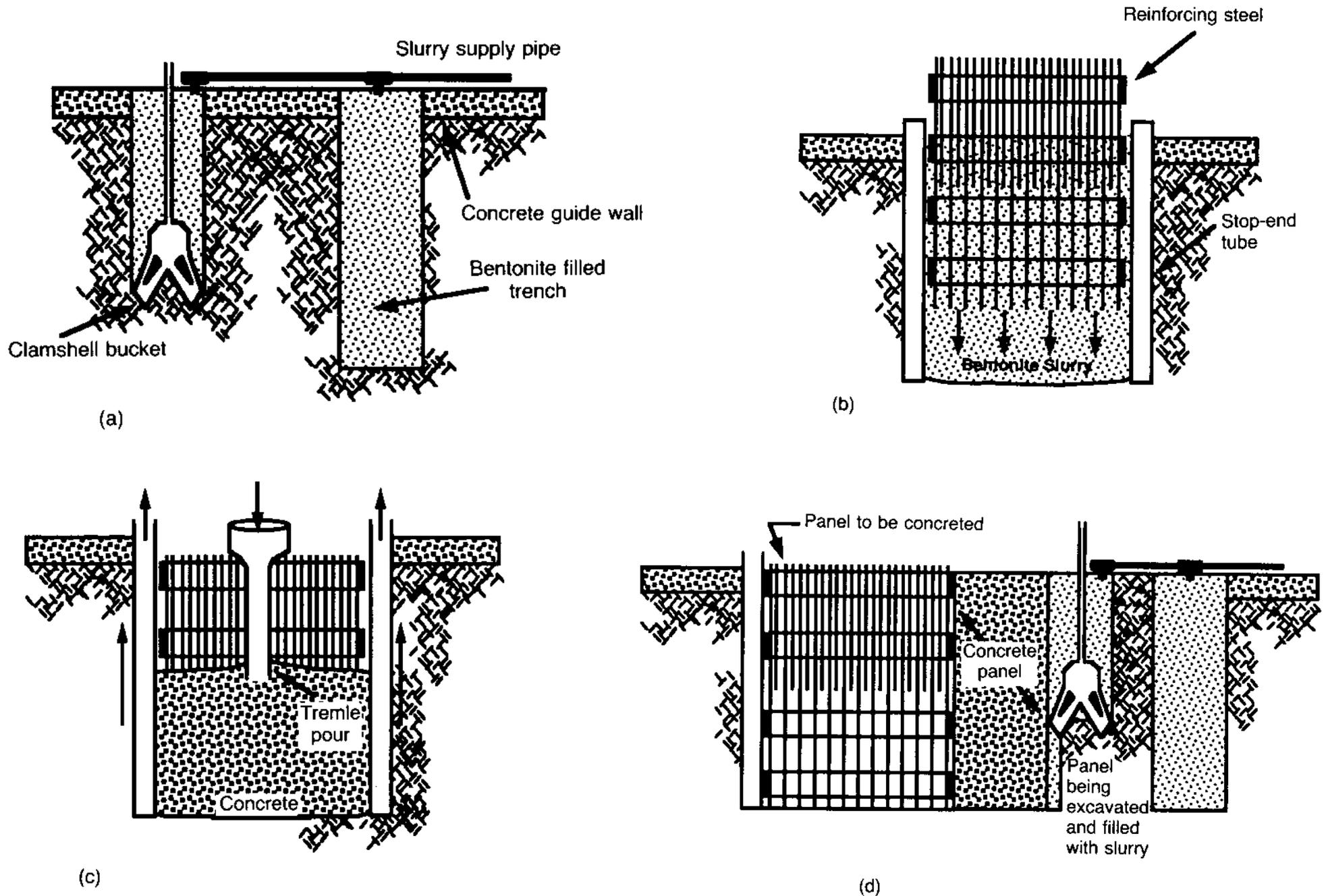




## ***CLAM SHELL***

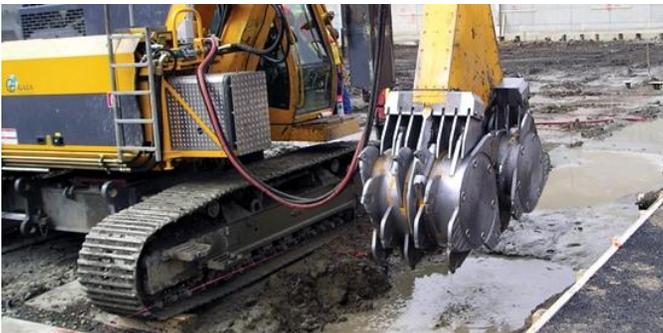


# Parede diafragma



(Daniel, 1993)

# ***DEEP SOIL MIXING***



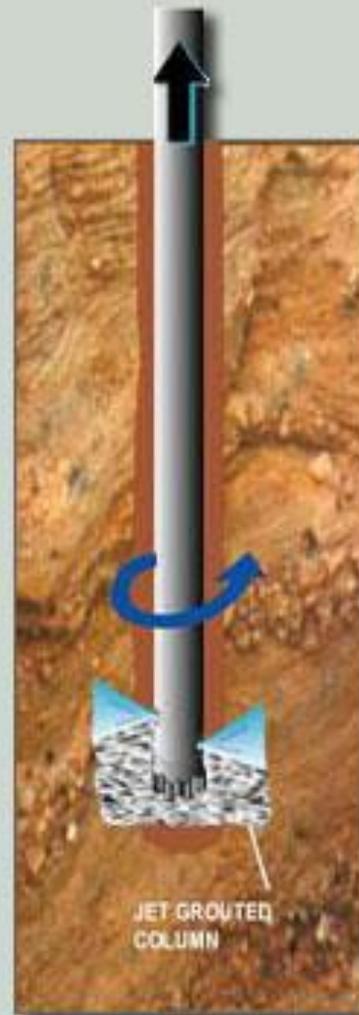
# Jet grouting



**STEP ONE:**  
ADVANCE STEEL DRILL  
ROD DOWNWARD TO THE  
DESIGNATED COLUMN  
DEPTH.



**STEP TWO:**  
SWITCH TO JET  
GROUTING SYSTEM.  
APPLY HIGH PRESSURE  
TO ACTIVATE THE JET  
MONITOR



**STEP THREE:**  
PERFORM JET GROUTING  
AS JET ROD IS ROTATED  
AND WITHDRAWN AT A  
CONTROLLED  
RATE.



**STEP FOUR:**  
AS THE JET ROD REACHES  
THE TOP, JET GROUTED  
COLUMN IS COMPLETED.

# Jet grouting



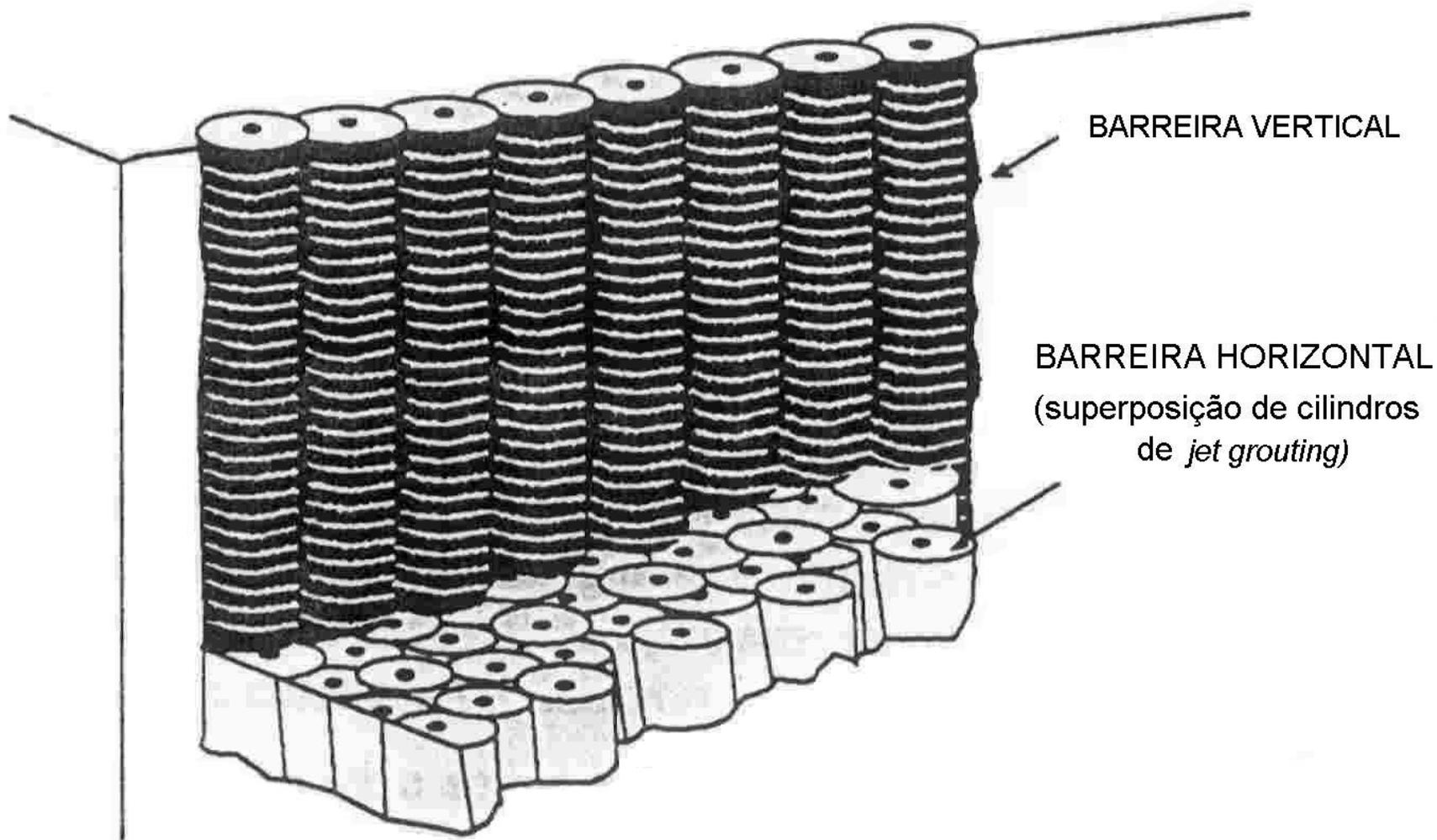
# Barreiras horizontais

❖ Coberturas

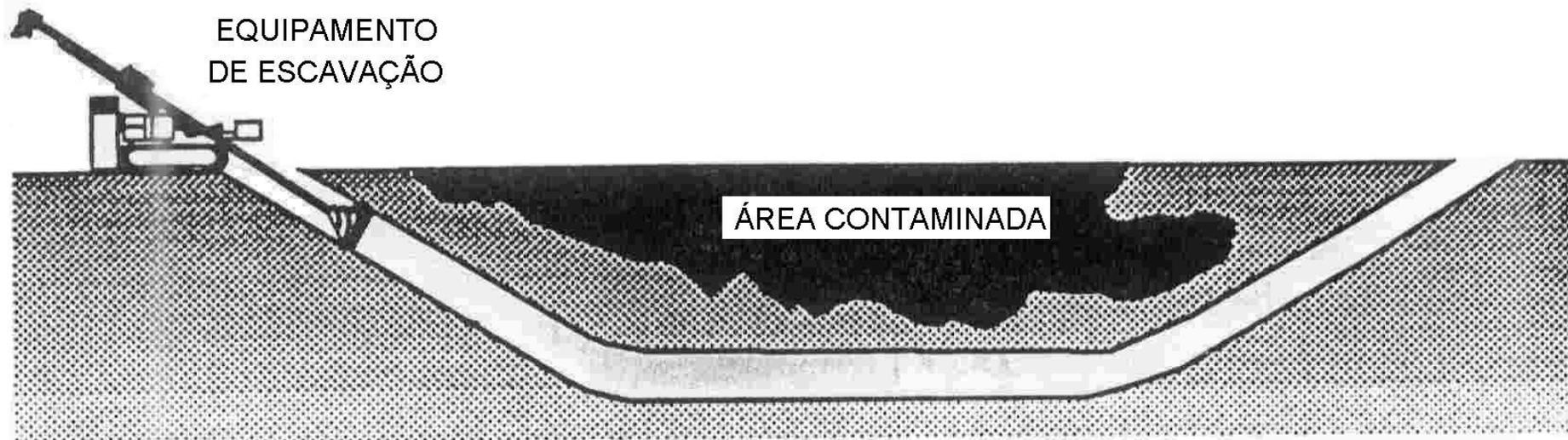
❖ Barreiras horizontais de fundo

# Barreiras horizontais de fundo

- ❖ Quando o estrato natural de baixa permeabilidade é profundo (principalmente no caso dos DNAPLs)
- ❖ Superposição de colunas de *jet grouting*, perfuração direcionada a partir da superfície e preenchimento do furo com material de baixa permeabilidade, por fraturamento hidráulico e preenchimento das fraturas com argamassa bombeada (*block displacement*) e por congelamento do solo.



Barreira horizontal construída por *jet grouting* (Sanchez 2007)



Barreira horizontal construída por perfuração direcionada a partir da superfície

(Adaptado de: Assessment of Waste Barrier Containment System (1997))

# ***PUMP AND TREAT***

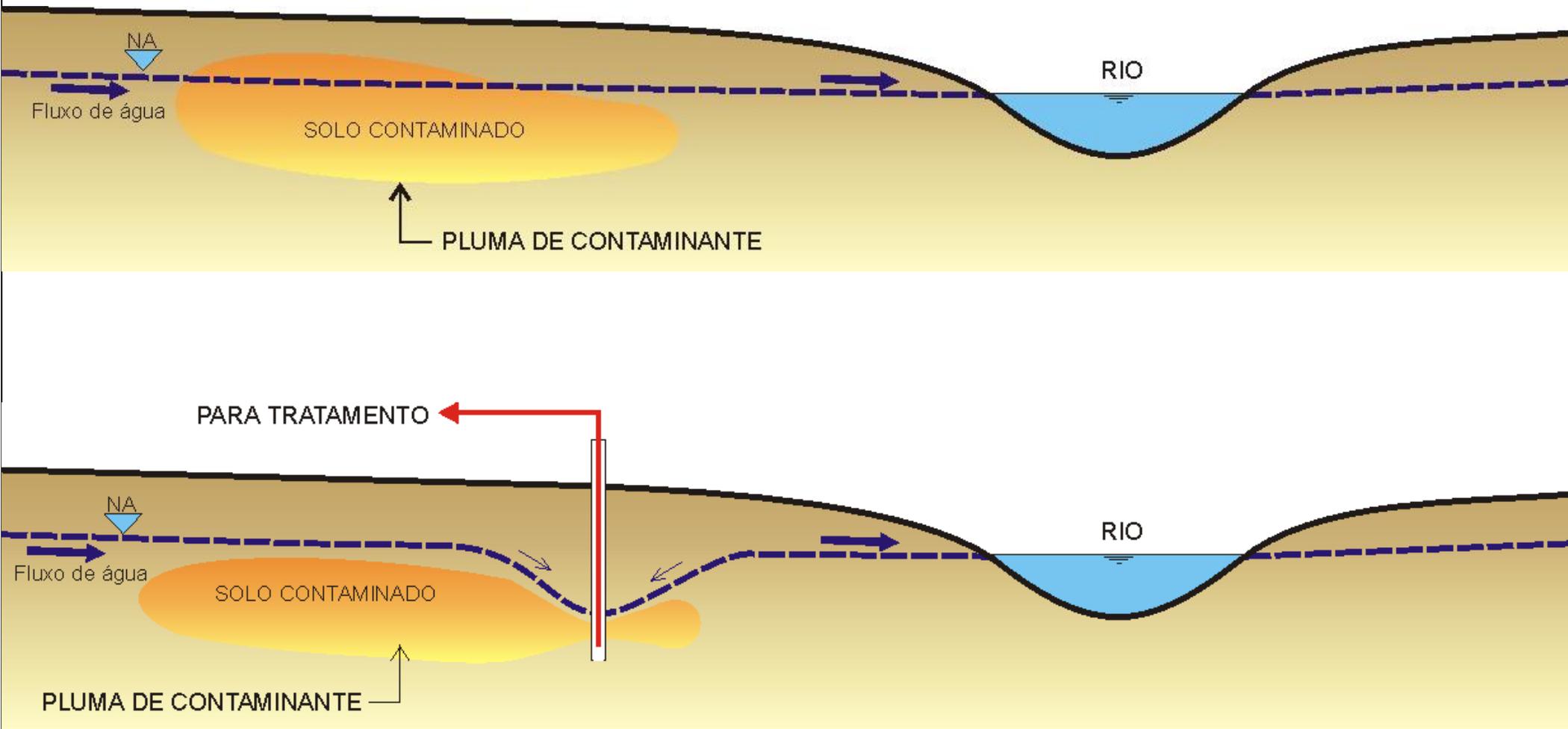
## **BOMBEAMENTO E TRATAMENTO**

- ❖ Aceleração da remoção dos contaminantes do aquífero por meio de injeção de surfactantes ou de cossolventes, e complexação de agentes que favoreçam a dessorção ou dissolução.
- ❖ Alto custo, pouca eficiência.
- ❖ Um dos únicos processos possíveis na contenção de plumas a grandes profundidades.
- ❖ Geralmente utilizado com outras técnicas.

# BARREIRAS HIDRÁULICAS

- ❖ Impedir avanço da pluma a partir de determinado ponto e fazer regredir uma determinada pluma que já esteja quase em contato com algum rio ou nascente.
- ❖ Princípio do funcionamento: executar um bombeamento das águas subterrâneas contaminadas, encaminhando-as para tratamento em uma Estação de Tratamento de Efluentes, e posterior descarte e/ou devolução ao lençol através de injeção ou simples infiltração.

# Princípio de funcionamento de barreiras hidráulicas

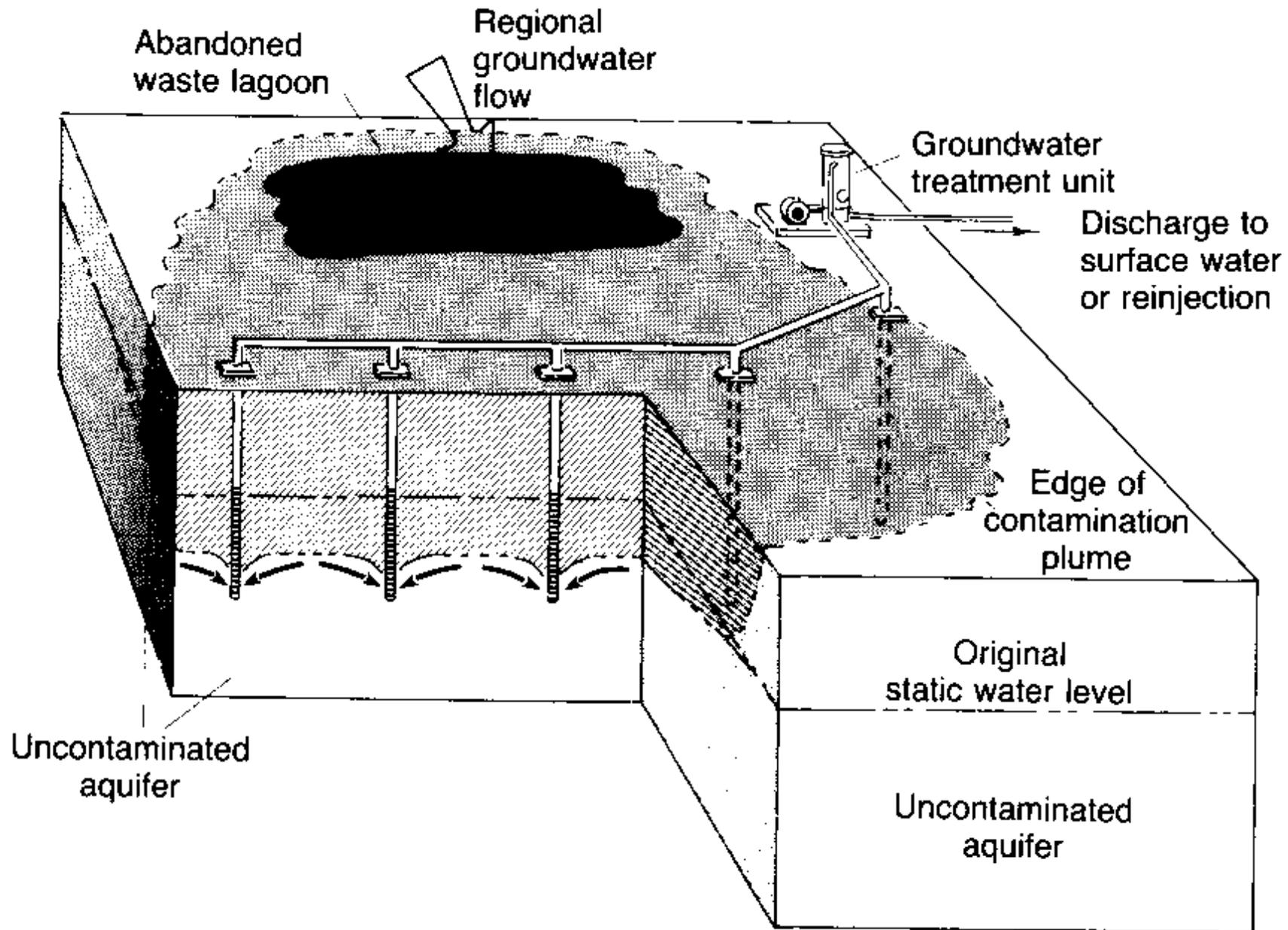


(Campos, 2003)

# BARREIRAS HIDRÁULICAS

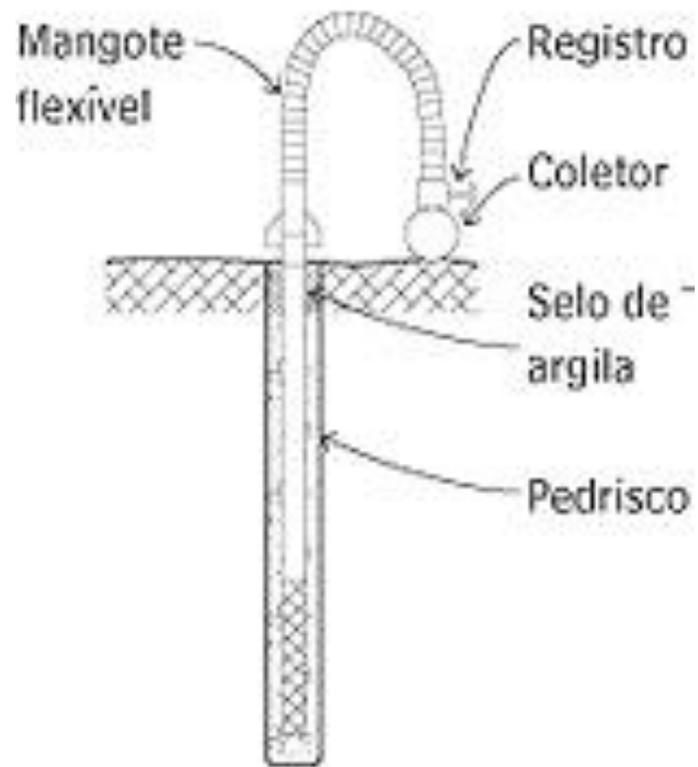
- ❖ Ponteiros filtrantes a vácuo
- ❖ Drenos escavados
- ❖ Poços de bombeamento de pequeno diâmetro
- ❖ Poços de bombeamento de grande diâmetro
- ❖ Drenos horizontais profundos (DHP)

# Pump and treat



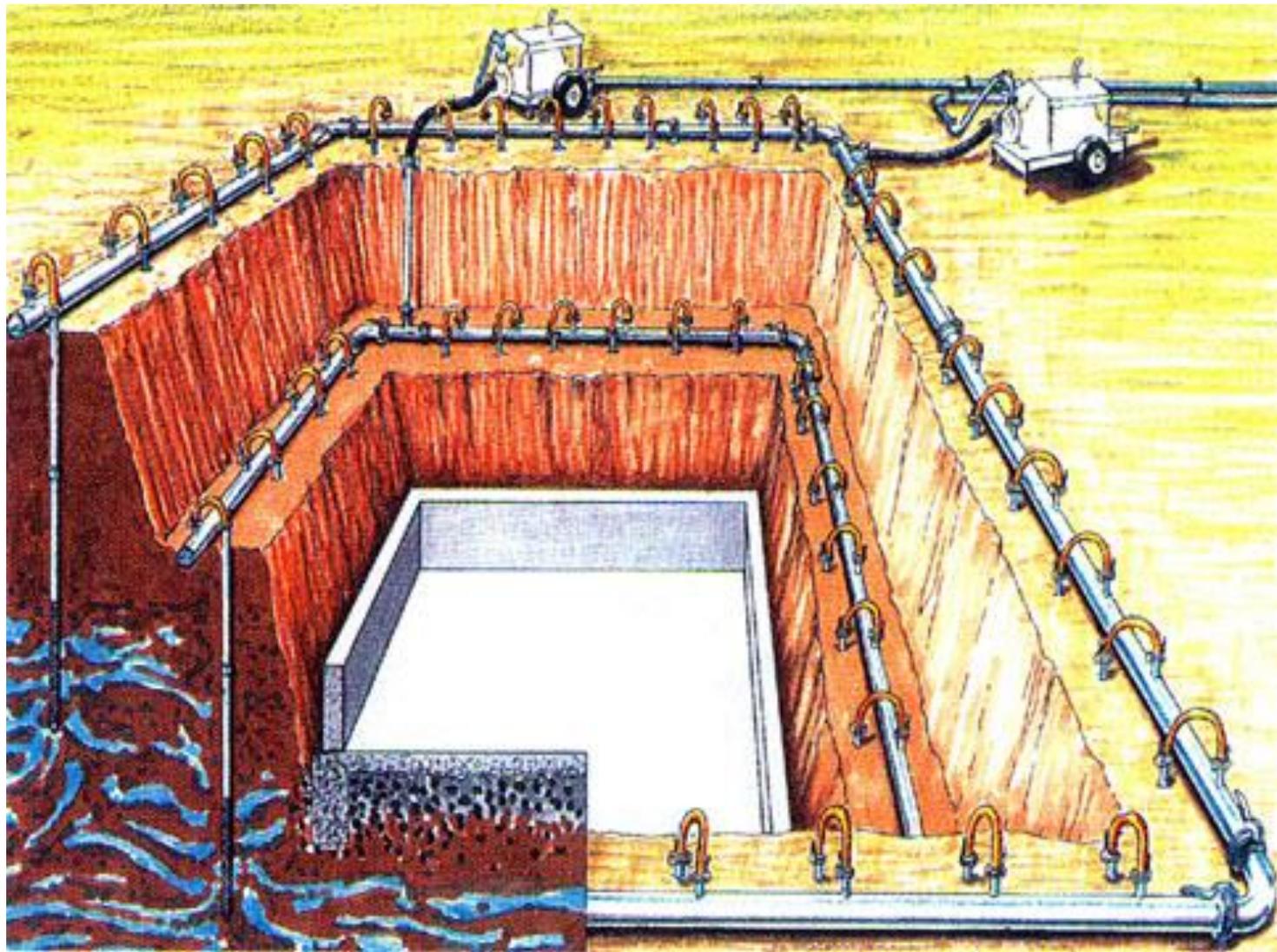
(Daniel, 1993)

### Esquema básico

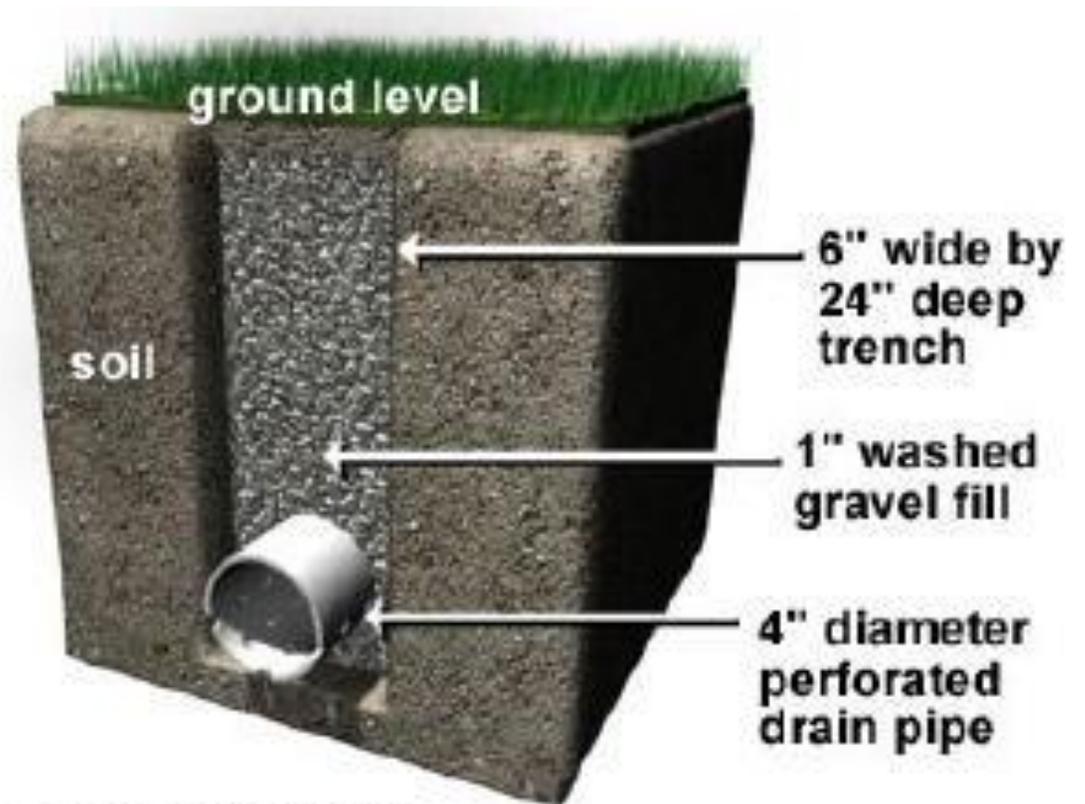


### Processo de perfuração



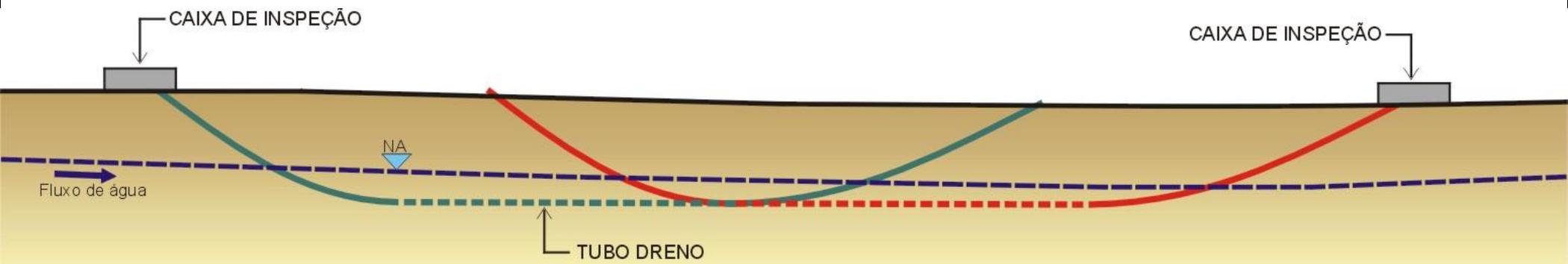
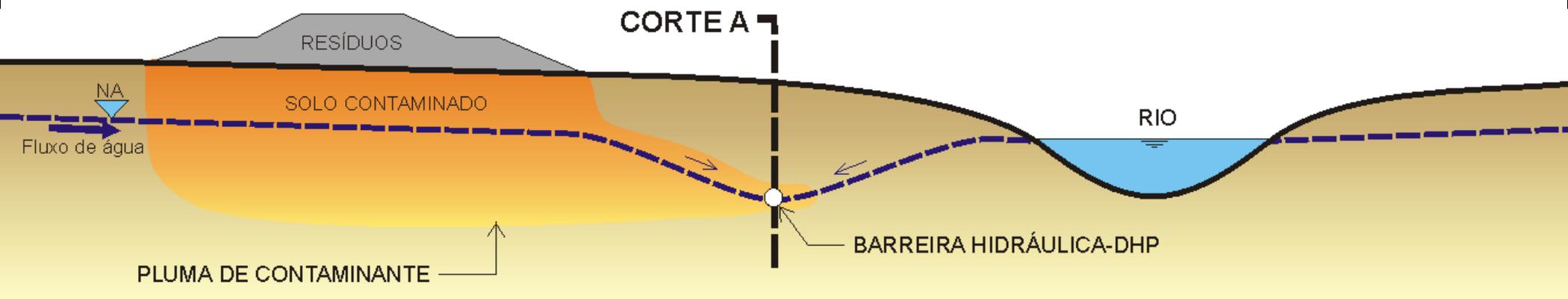


# Drenos escavados ou trincheiras drenantes

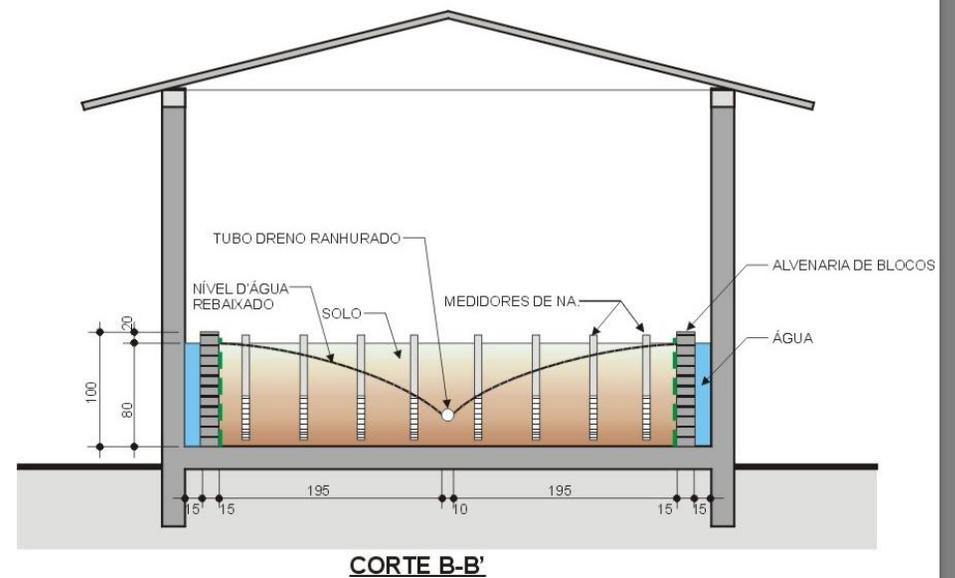
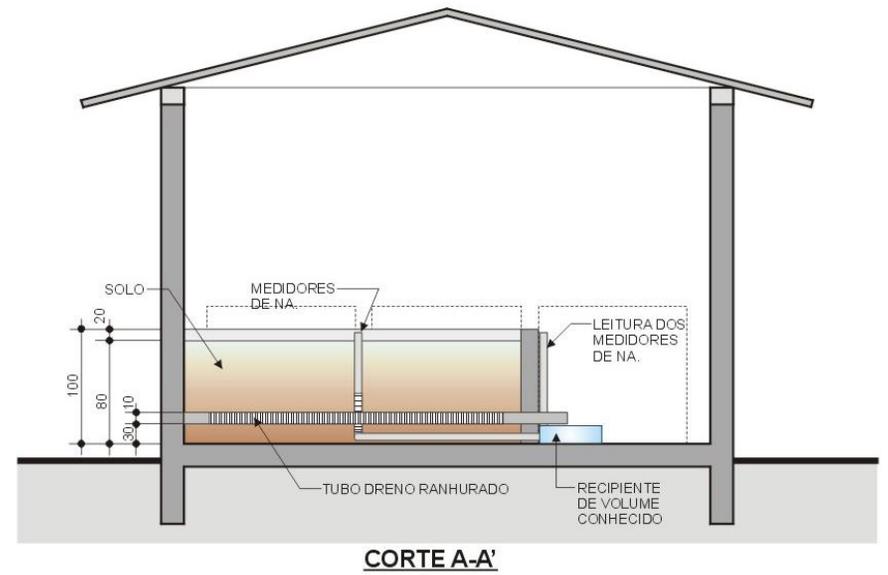
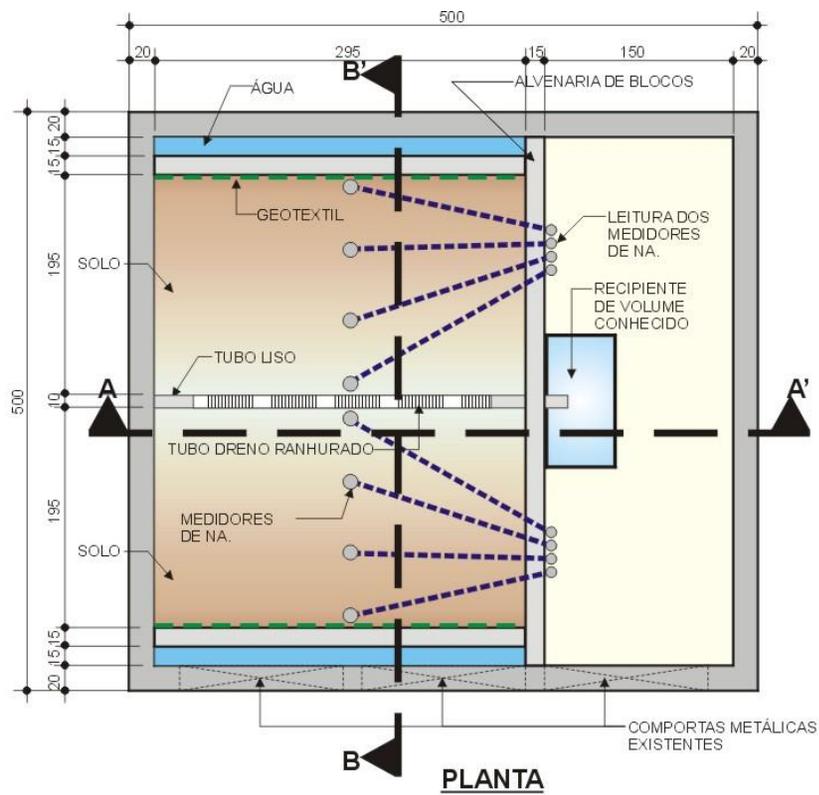


3D art by Marty Hovey





Barreira hidráulica por DHP  
(Campos, 2003)

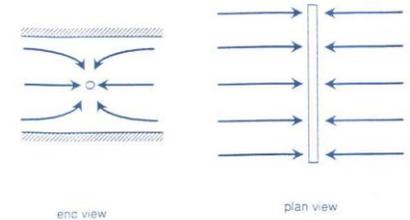


(Mello, 2003)

## Kawecki, 2000

Fluxo linear primário em um aquífero livre :

$$h_e - h_w = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \times \frac{2Q}{LK_x(D_0 + h_e)} \sqrt{\frac{(D_0 + h_e)K_x t}{2S_y}} + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} (\sigma_z + \sigma)$$



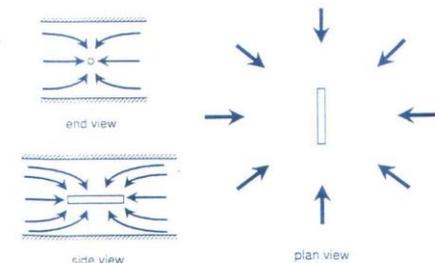
Fluxo pseudorradial:

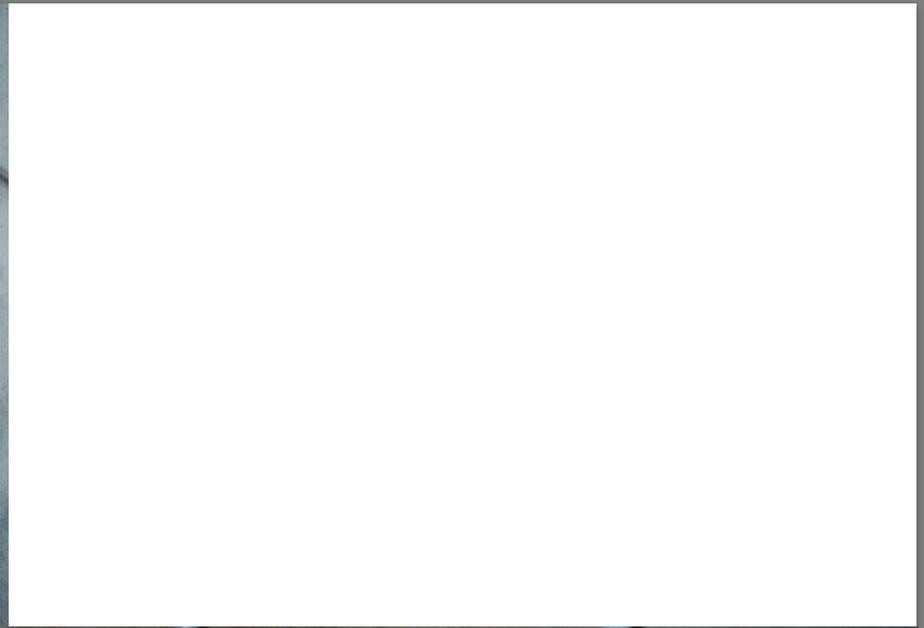
$$h_e - h_w = \frac{Q}{\pi K_h (D_0 + h_e)} \ln \left( \frac{1.5 \sqrt{(D_0 + h_e) K_y t / 2S_y}}{L/4} \right) + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} (\sigma_z + \sigma)$$

onde

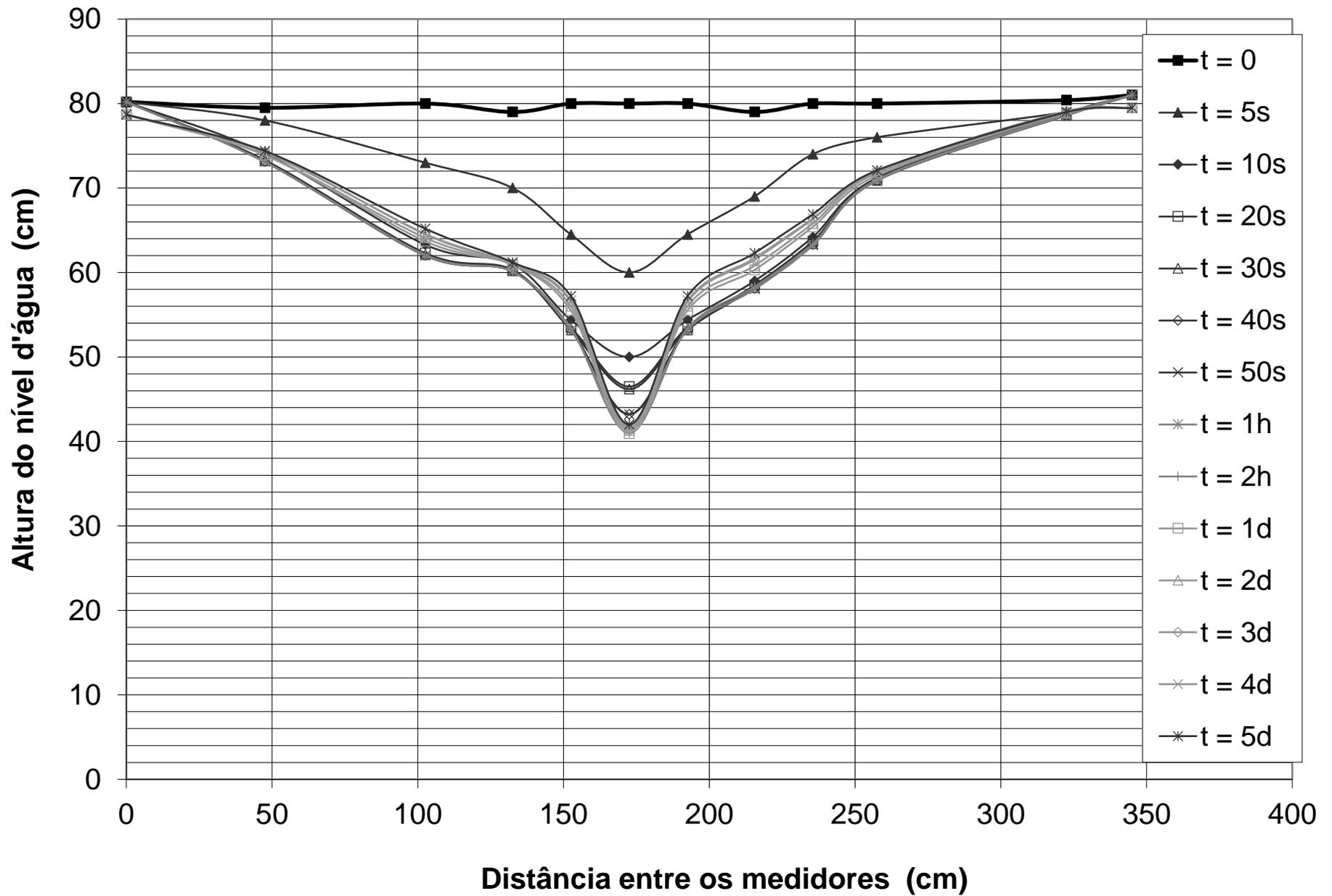
$$D_0 = h_w + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{K_x K_z}} (\sigma_z + \sigma)$$

$$\sigma_z = \ln \left( \frac{D_0}{2\pi r_w} \right) + 0.25 \ln \left( \frac{K_x}{K_z} \right) - \ln \left( \text{sen} \frac{180^\circ z_w}{D_0} \right)$$

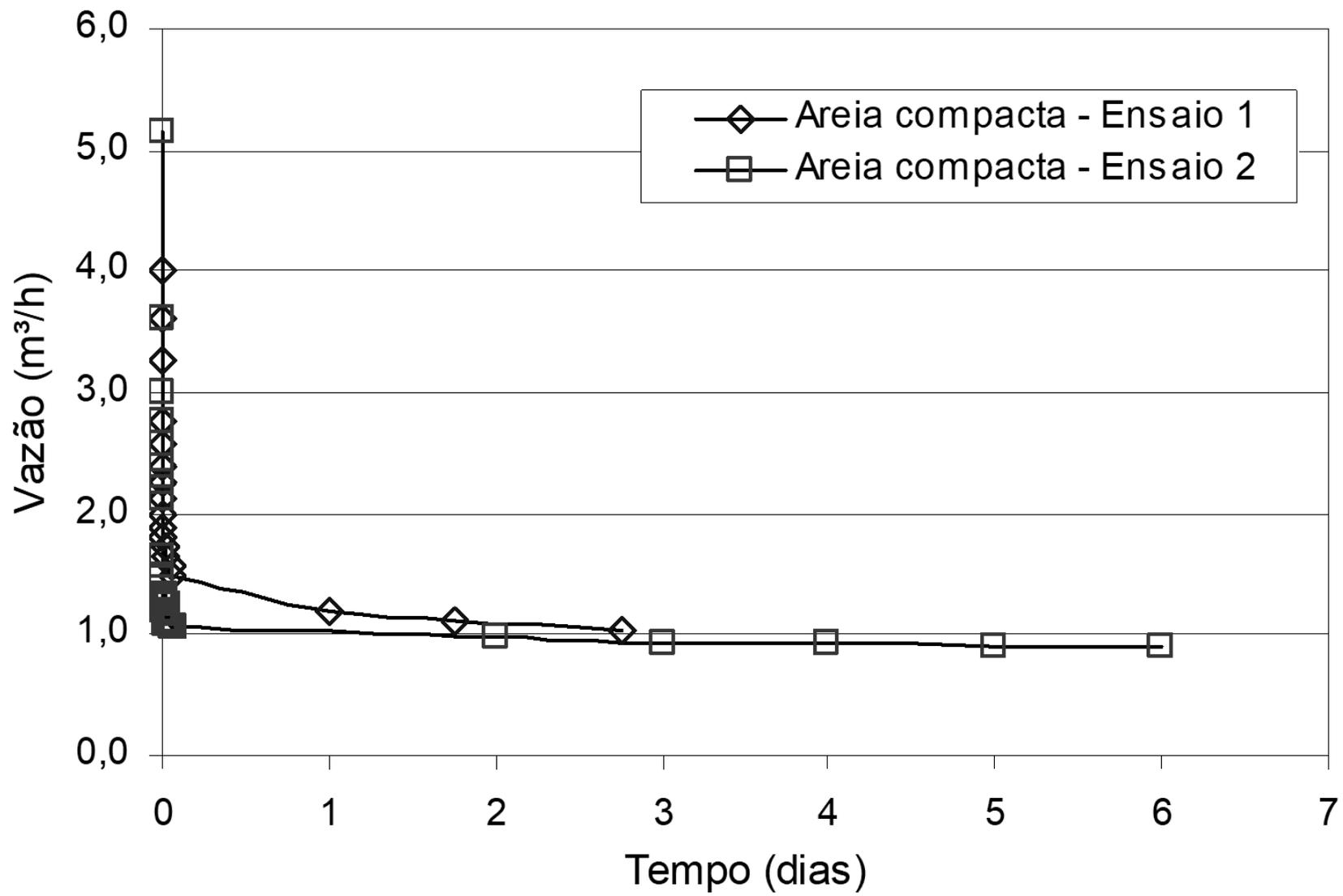




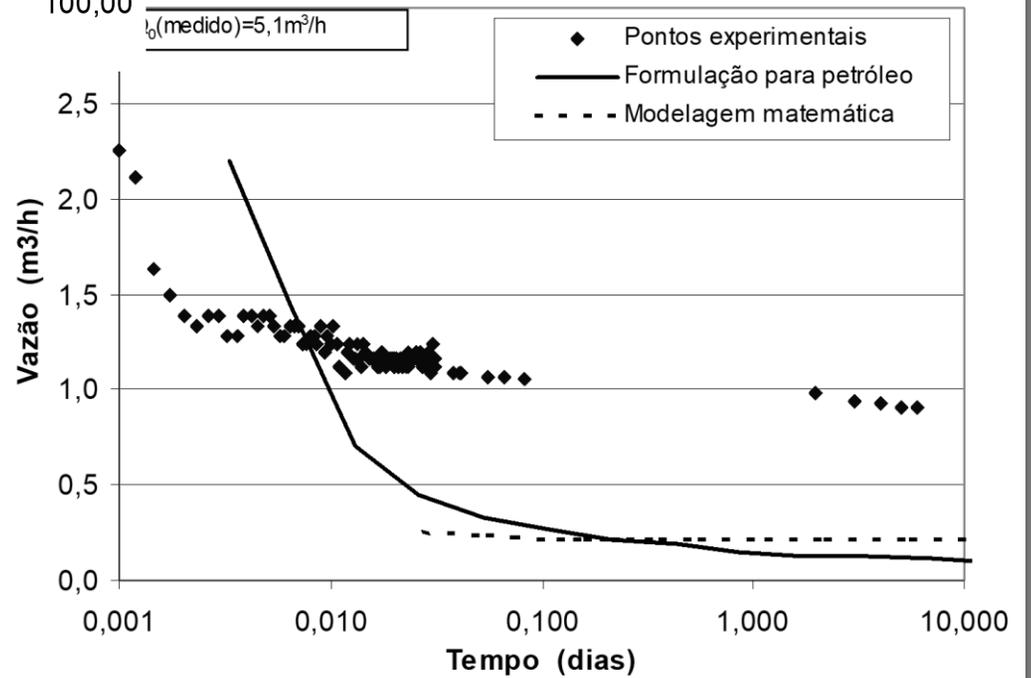
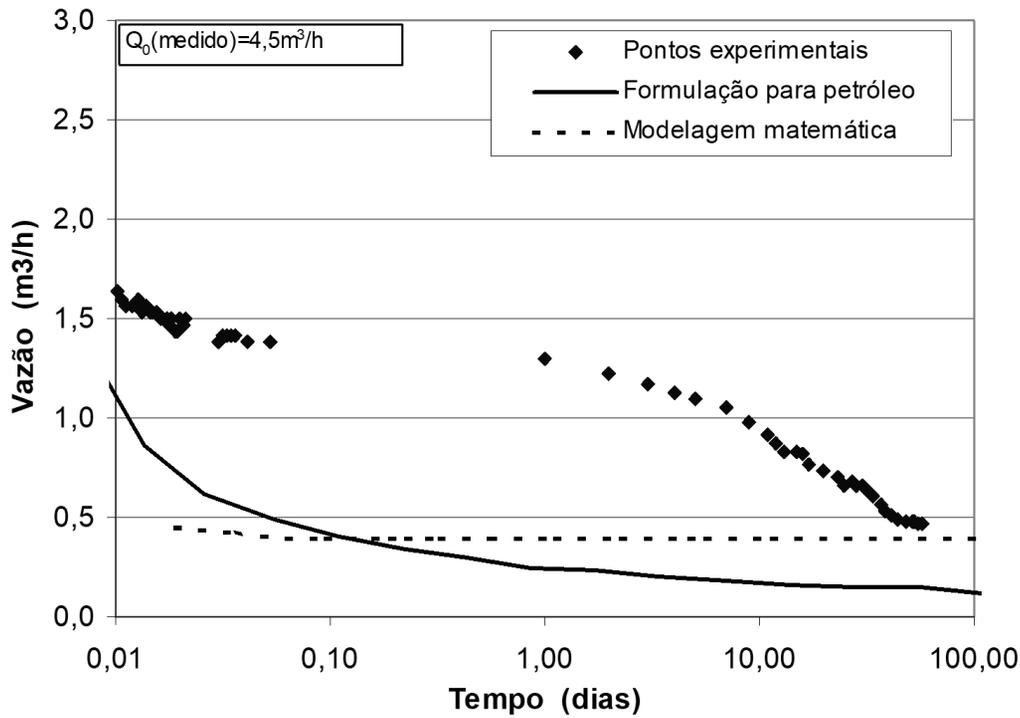
(Mello, 2003)



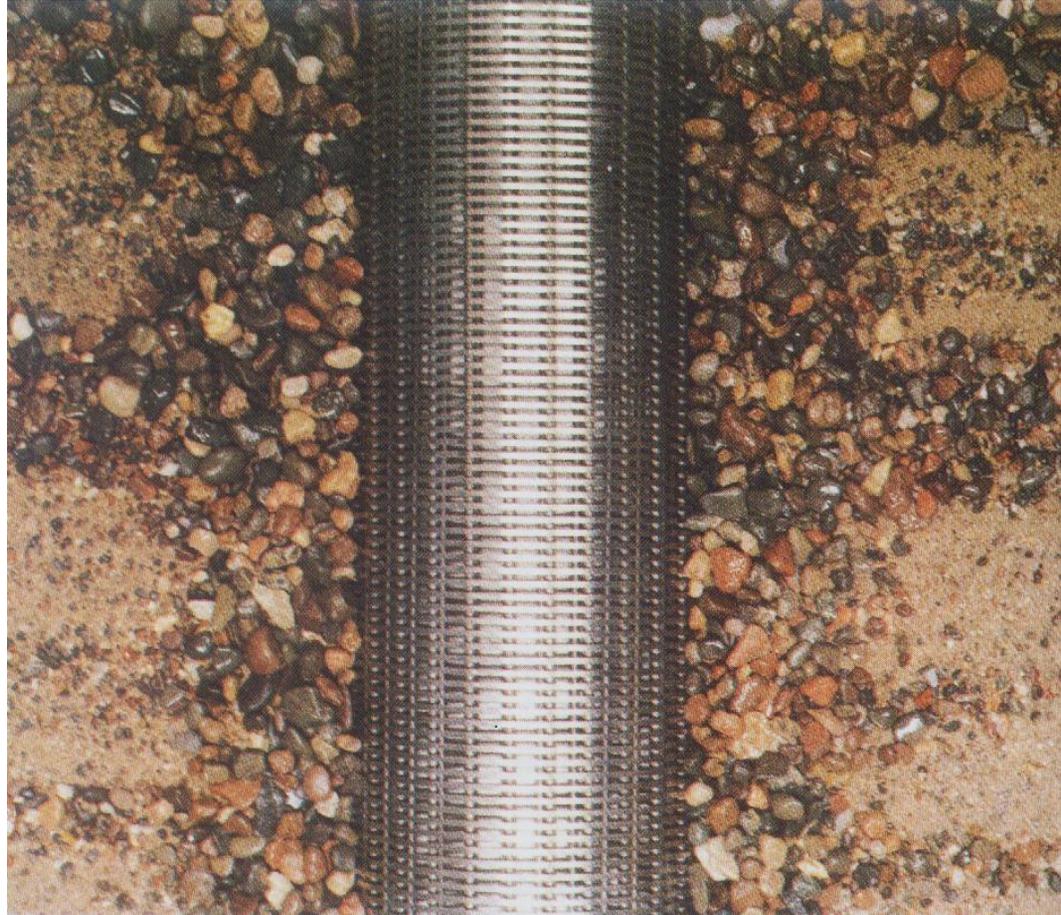
(Mello, 2003)



(Mello, 2003)



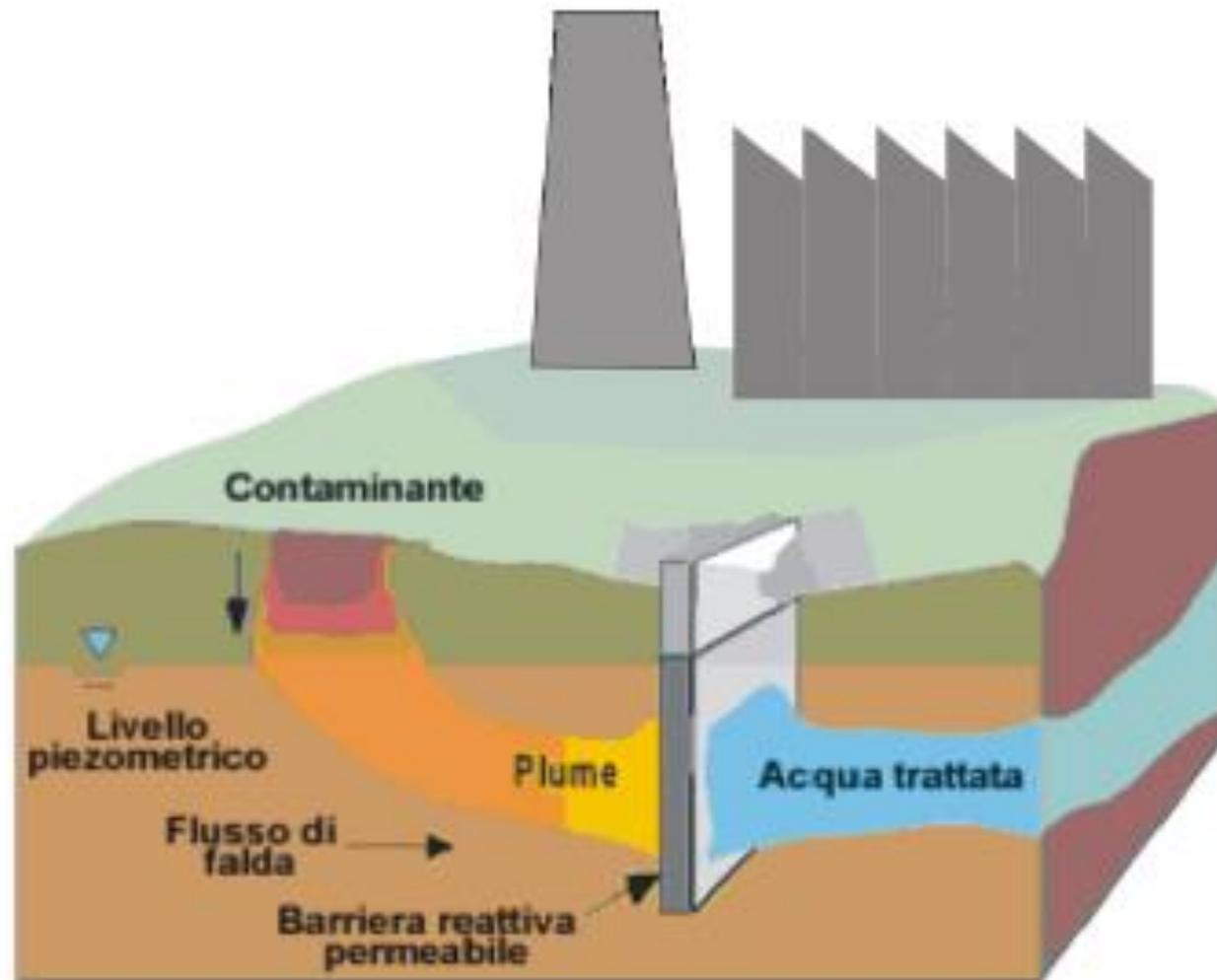
(Mello, 2003)



(Mello, 2003)

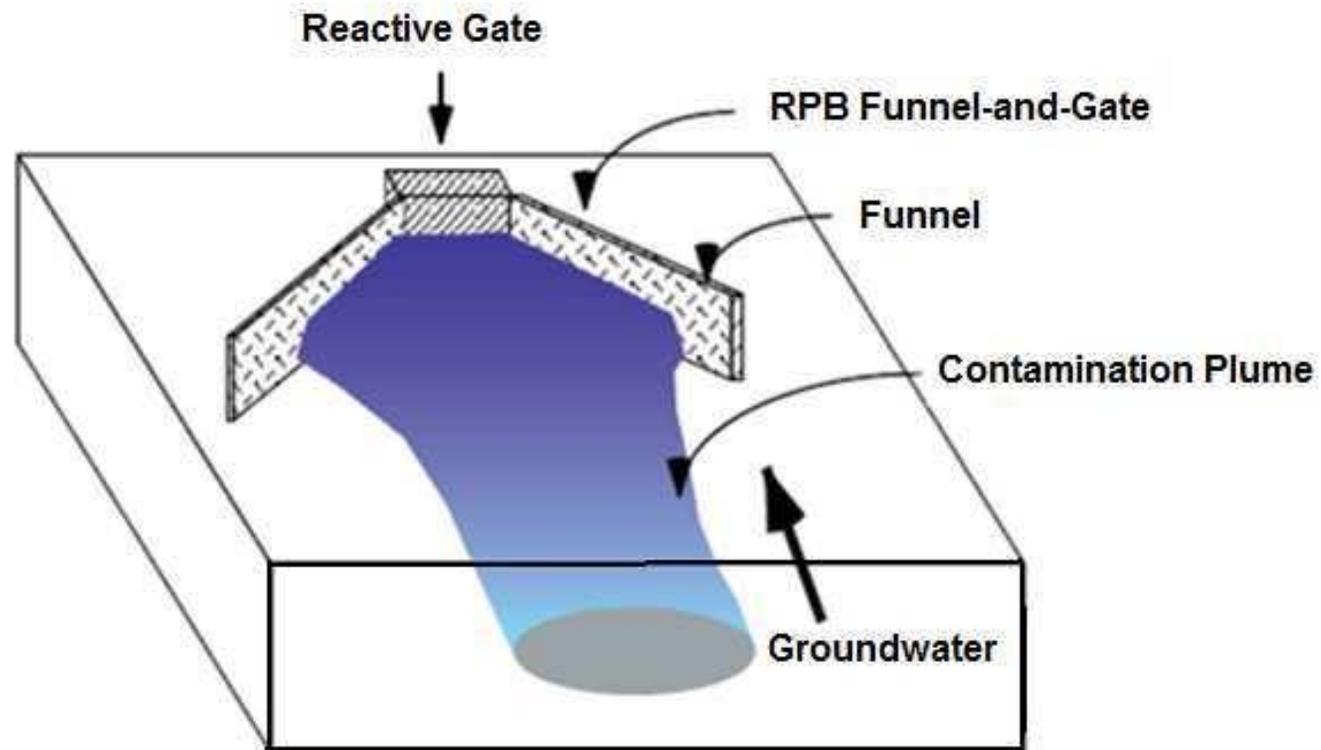
# BARREIRAS PERMEÁVEIS REATIVAS

- ❖ Tratamento passivo *in situ* dos contaminantes
- ❖ Barreira permeável (reator) no caminho da pluma de contaminação; à medida que a água percola através do reator, os contaminantes vão sendo degradados
- ❖ A degradação pode envolver processos físicos, químicos e biológicos



(Di Molfetta e Sethi, 2003)

# FUNNEL AND GATE



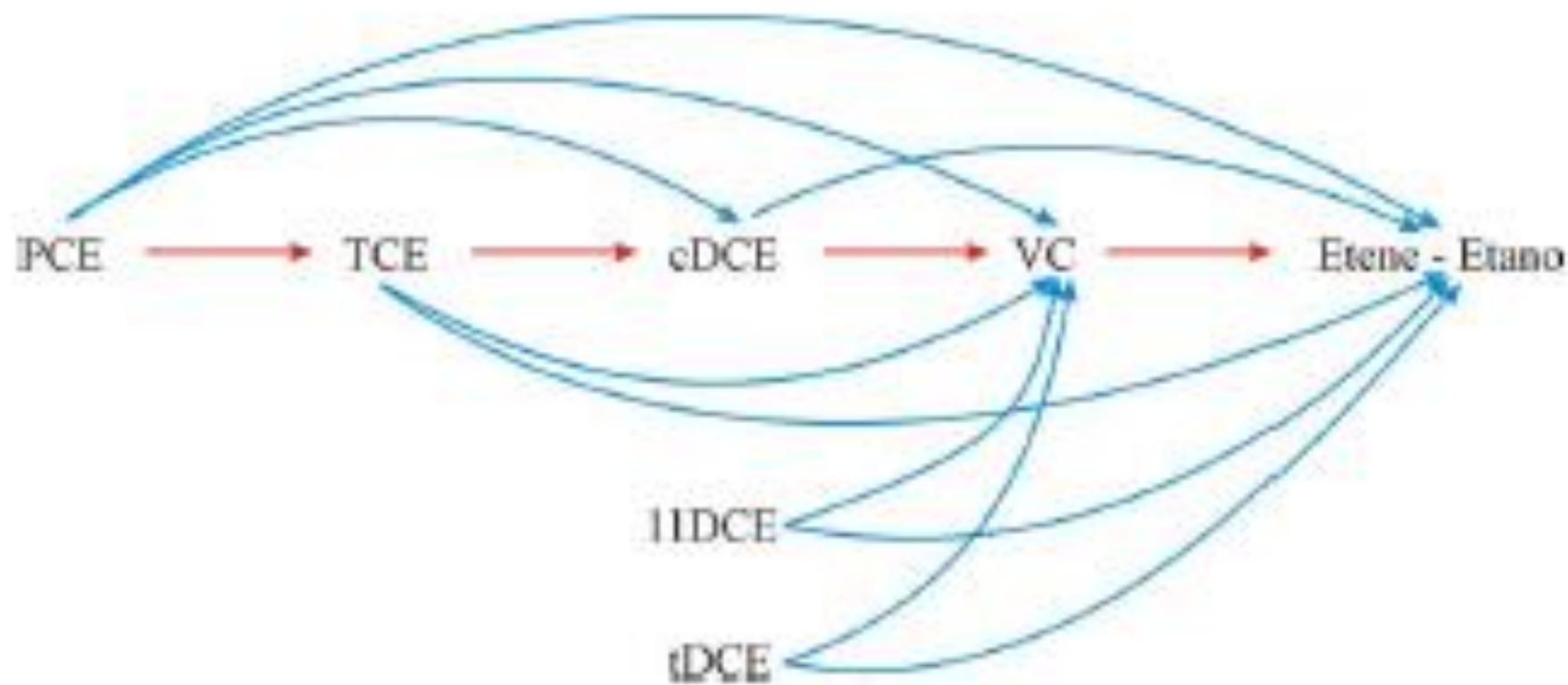


Fig. 10: Percorsi di degradazione a rete di alcuni eteni clorurati.

(Di Molfetta e Sethi, 2003)

# Ferro granular de valência zero



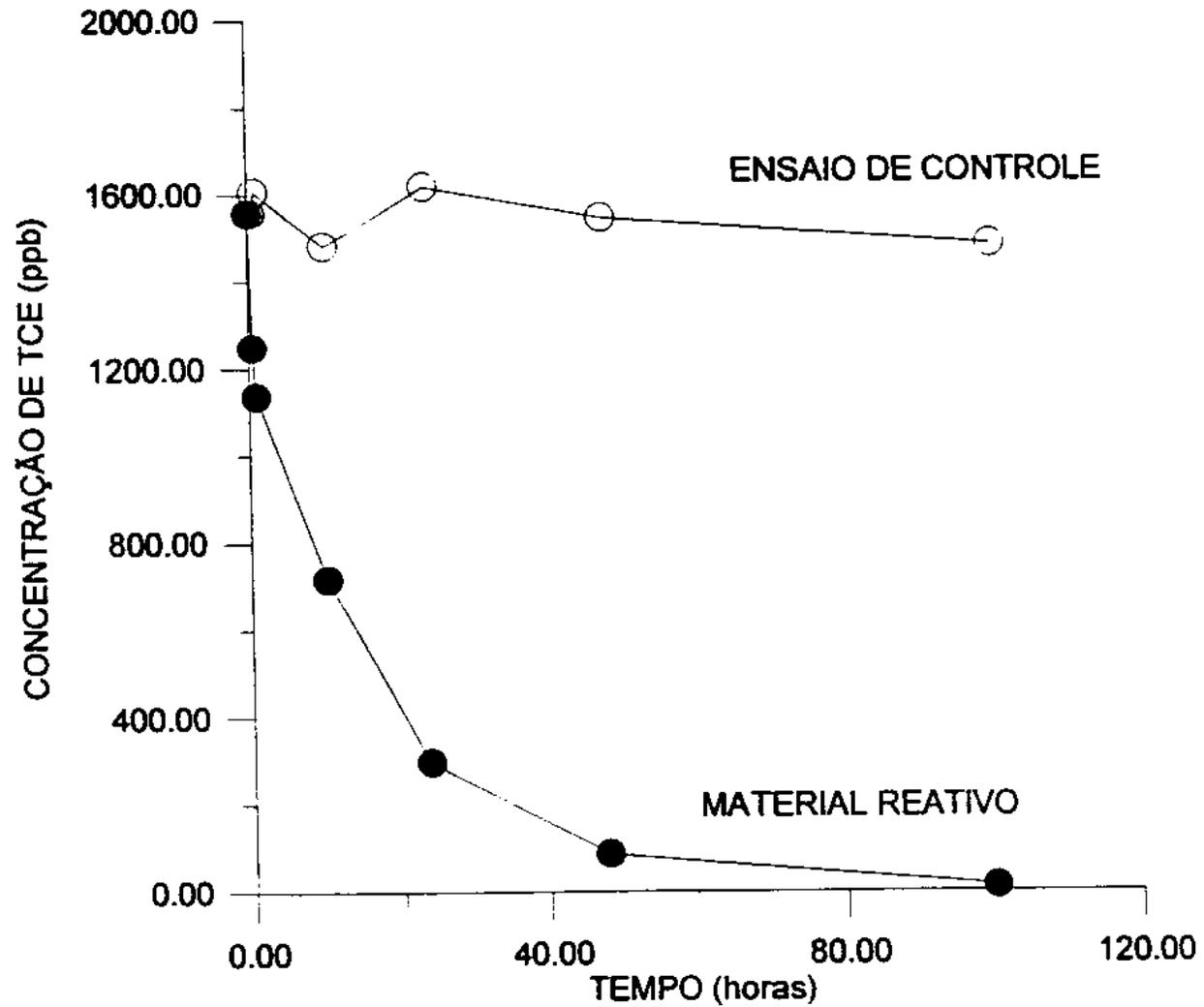
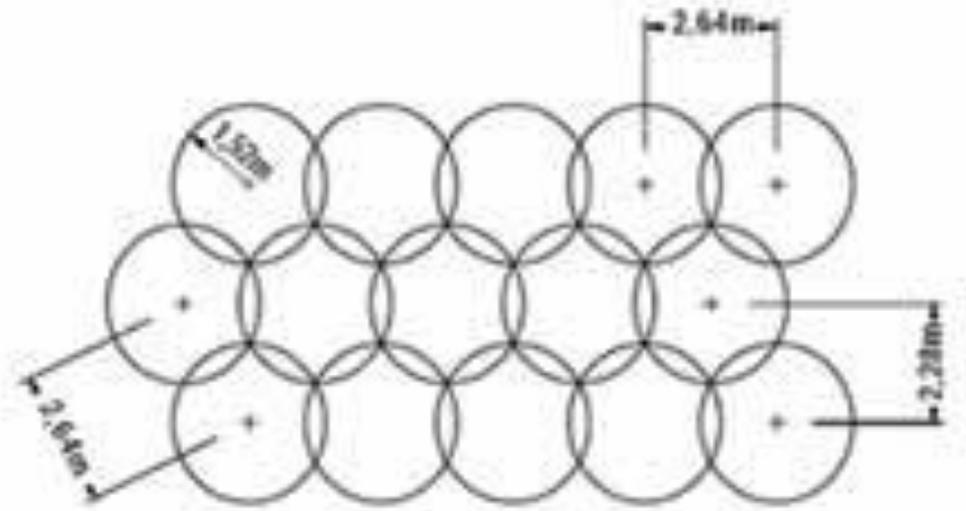


Fig. 3.9: Degradação do TCE na Presença de Ferro Granular (Gillham et al., 1993).

# Problemas de projeto

- ❖ Estimativa da taxa de degradação dos contaminantes
- ❖ Seleção de um material reativo
- ❖ Avaliação da vida útil do reator
- ❖ Localização
- ❖ Configuração
- ❖ Permeabilidade do reator
- ❖ Espessura do reator em função das taxas de degradação dos contaminantes e da velocidade de fluxo

# HÉLICE DE GRANDE DIÂMETRO



# EXTRAÇÃO DE VAPOR

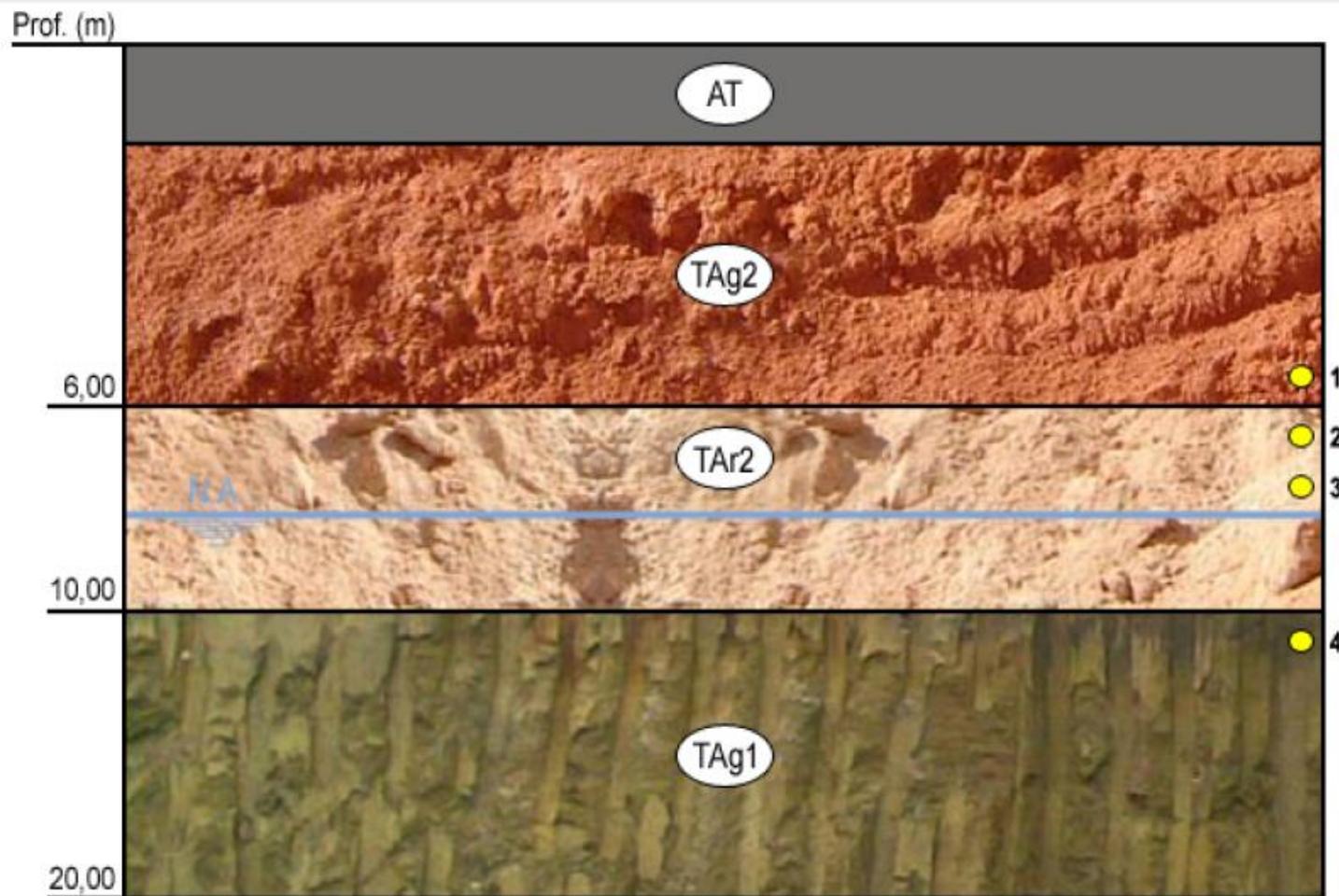
- ❖ VOC – *volatile organic compound*
- ❖ Zona vadosa (solo não saturado)
- ❖ Manufatura de pesticidas, plásticos, tintas, produtos farmacêuticos, solventes e têxteis
- ❖ Solventes sintéticos e constituintes do petróleo

# EXTRAÇÃO DE VAPOR

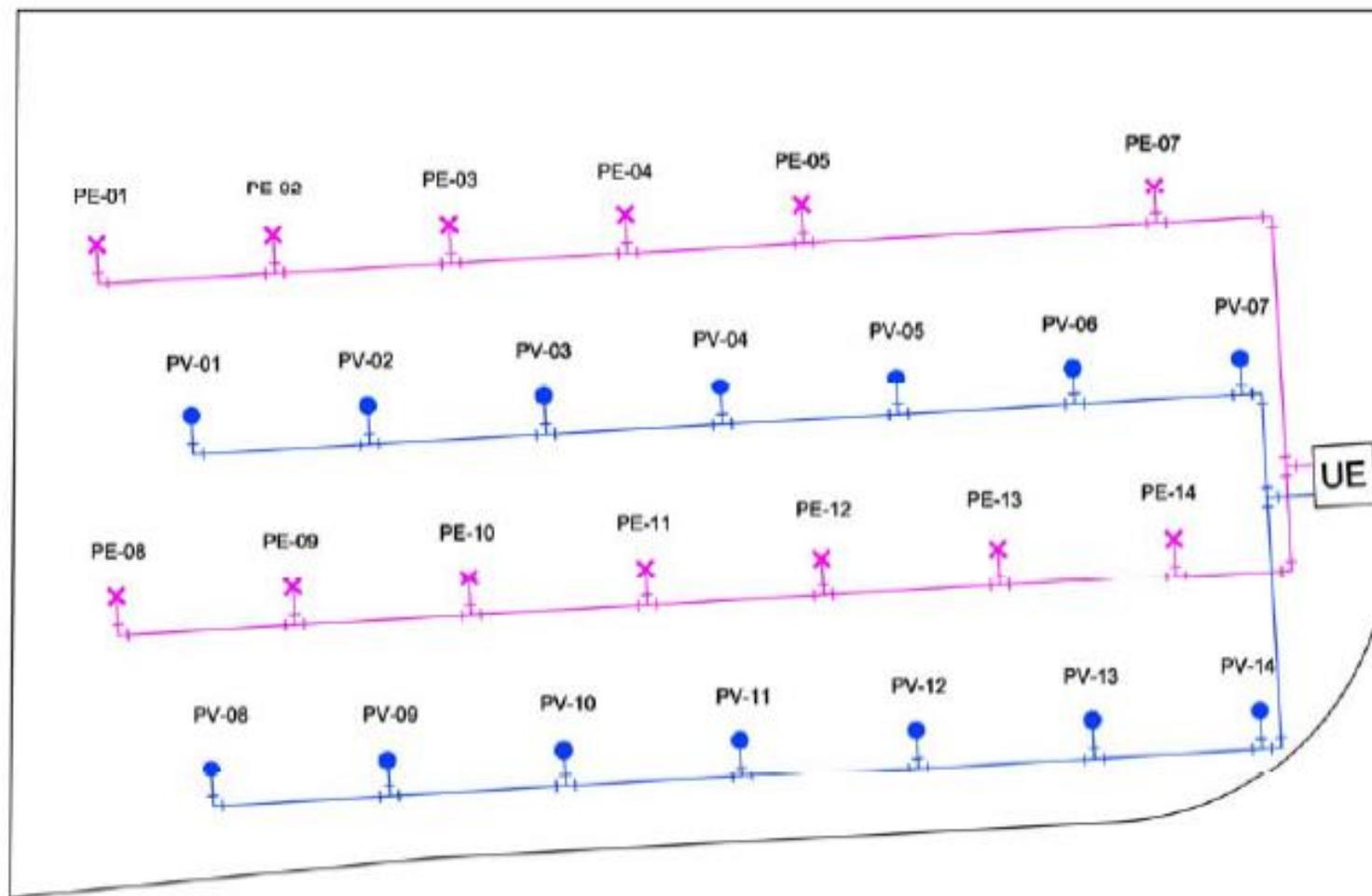
- ❖ Poços de extração de vapor na área contaminada com aplicação de vácuo
- ❖ O fluxo de ar retira os VOCs do solo
- ❖ O ar extraído é descartado na atmosfera, após tratamento, através de uma chaminé.
- ❖ À medida que vão sendo retirados, mais VOCs passam para a fase de vapor.
- ❖ Remoção do gás, promoção de volatilização, dessorção de VOCs dos sólidos do solo, aumento da biodegradação dos compostos não extraídos devido à aeração.

# Extração de vapor (Sanchez, 2009)

- ❖ Posto de serviço, lavador de autos, estacionamento de veículos e oficina mecânica
- ❖ 17 sondagens com coleta de 42 amostras de solo
- ❖ 17 poços de monitoramento com coleta de 17 amostras de água subterrânea
- ❖ Hidrocarbonetos de petróleo, naftaleno, benzeno e xileno no solo e águas subterrâneas, sem formar fase livre sobrenadante
- ❖ Compostos orgânicos voláteis em concentrações com alto risco de explosividade, na área dos antigos tanques, confinados na parte não saturada da camada arenosa (até 6000 ppm)



**Figura 14** – Perfil geológico típico da área: AT – aterro; Solos da Formação São Paulo: TAg<sub>2</sub> – argilas silto-arenosas, variegadas; TAr<sub>2</sub> – areia fina a grossa pouco argilosa, variegada; TAg<sub>1</sub> – argila siltosa rija, variegada.



**LEGENDA**

- ✕ PE - Poço de Extrato
- PV - Poço de Ventilação
- UE Unidade de Extração

**Escala Grafica**



**Figura 18** – Localização esquemática dos poços de extração e ventilação.

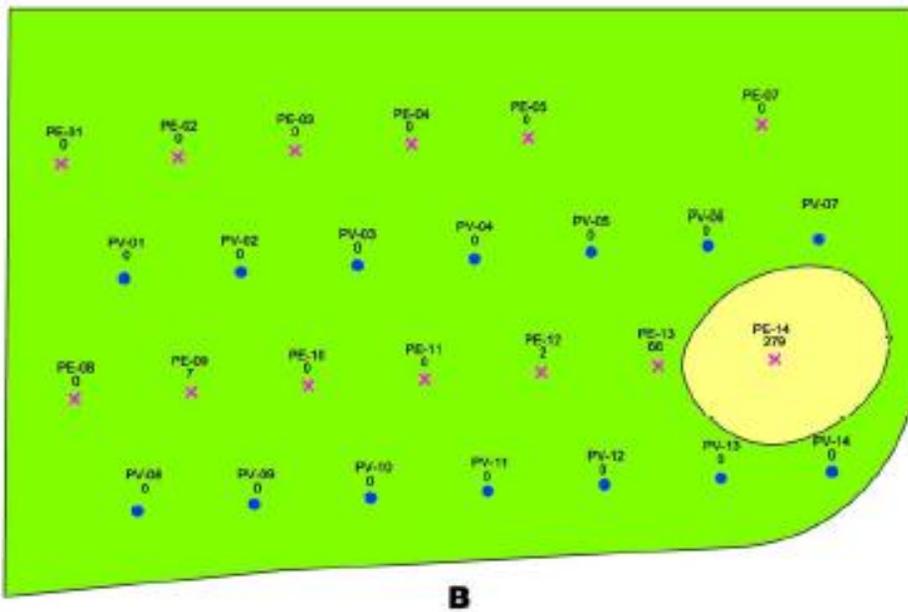
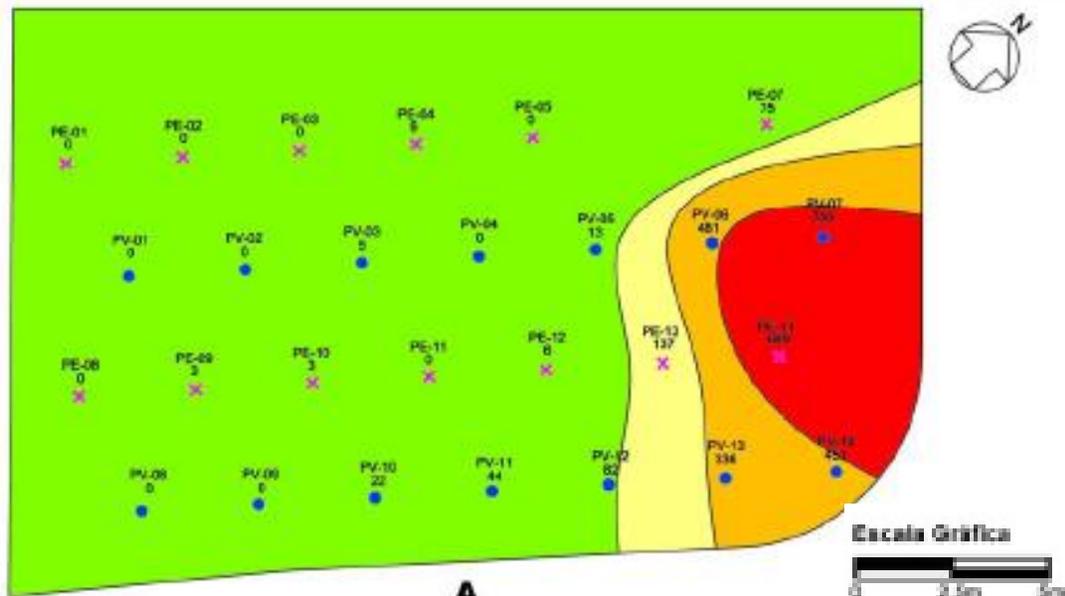


**A**



**B**

**Figura 20** – Equipamento portátil modelo *GasAlertMicro 5 PID* da *BW Technologies*: **A** – detector com sensores de fotoionização e oxidação catalítica; **B** – kit com equipamento portátil, filtro externo e sonda de amostragem. Fonte: <http://www.jjstech.com/gasalmi5pid.html>.

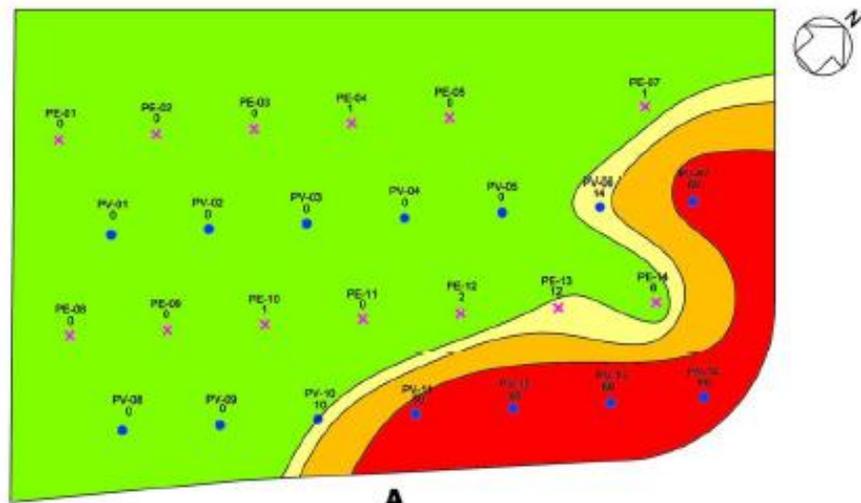


### LEGENDA

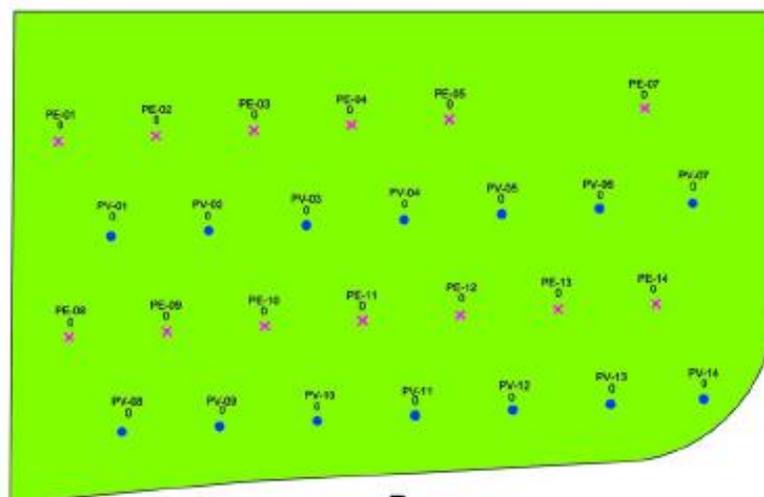
- X PE - Poço de Emissão
- PV - Poço de Ventilação

### Isoconcentrações de VOC's - gasolina

- |  |                  |              |
|--|------------------|--------------|
|  | até 100 ppm      | TLV (NIOSH)  |
|  | de 100 a 300 ppm | TLV (NIOSH)  |
|  | de 300 a 500 ppm | STEL (NIOSH) |
|  | acima de 500 ppm | STEL (NIOSH) |



**A**



**B**

**LEGENDA**

- ✕ PE - Ponto de Exatão
- PV - Ponto de Ventilação

**Isoconcentrações de % LEL - gasolina (%)**

- até 10%
  - de 10% a 26%
  - de 27% a 56%
  - acima de 56%
- Baixo risco de explosividade (OSHA)  
 — Alto risco de explosividade (OSHA)

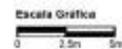
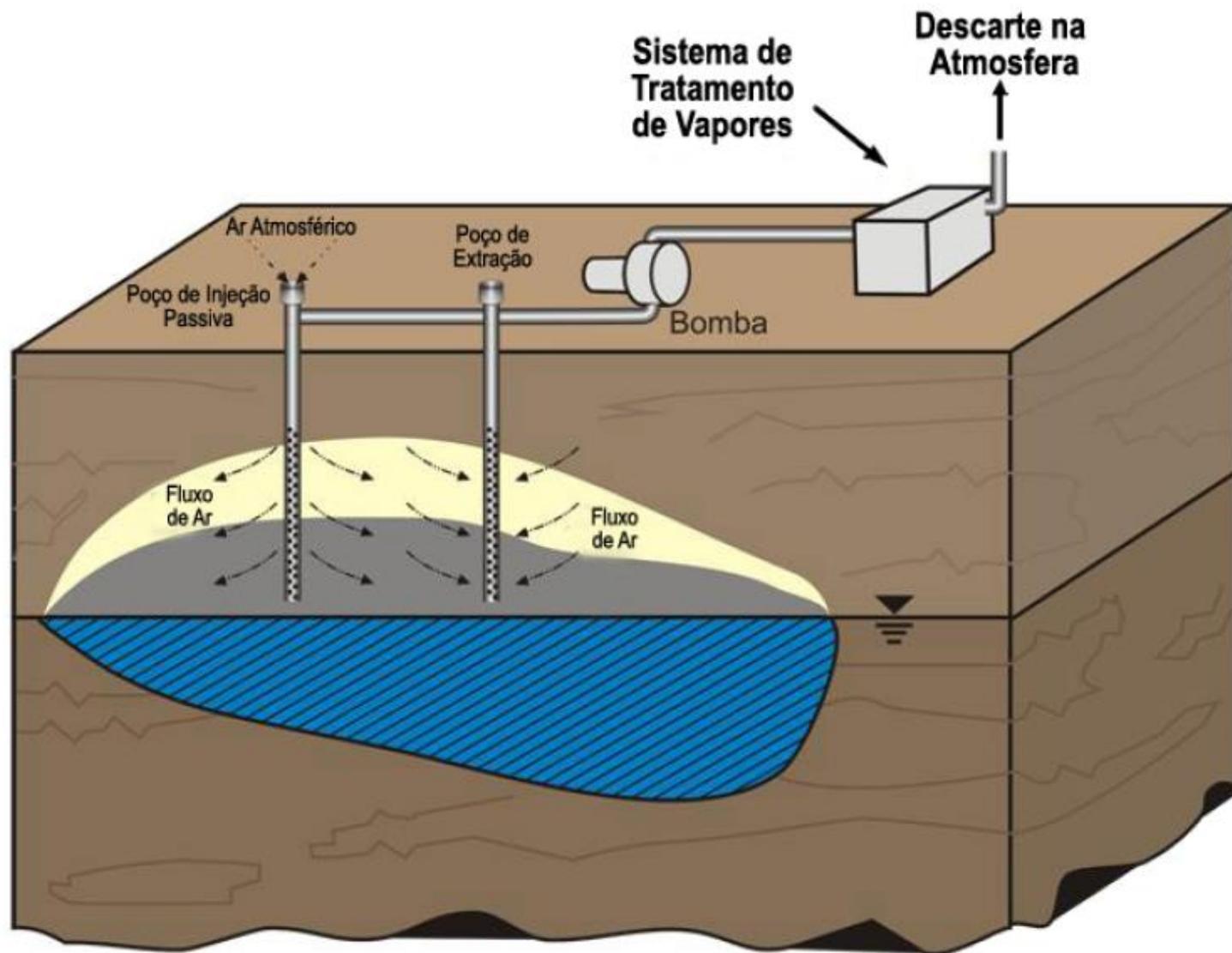


Figura 28 – Mapa de isoconcentrações de LEL: A – condição inicial (leitura de 29/05/07); B – condição final (leitura de 13/02/08).



**Legenda**

- Fase de Vapor
- Fase Sorvida
- Fase Dissolvida

# INJEÇÃO DE AR

## *(Air Sparging)*

- ❖ Indicada para VOCs
- ❖ Indução da mudança do contaminante da fase dissolvida para a fase gasosa
- ❖ Quanto maior a constante de Henry do contaminante, maior a eficiência do processo
- ❖ Há um sistema de injeção de ar e outro para coleta de vapores
- ❖ A taxa de injeção de ar deve ser otimizada para ter a eficiência requerida
- ❖ Pode haver necessidade do tratamento dos vapores coletados

# EXTRAÇÃO MULTIFÁSICA

## (MPE - *Multiphase Extraction*)

- ❖ Aplicação de alto vácuo, com simultânea extração dos vapores da zona não saturada, da fase dissolvida no lençol e da fase livre do contaminante que fica sobrenadante ao lençol freático.
- ❖ Os líquidos se acumulam em uma caixa separadora; o vapor é encaminhado a uma chaminé para tratamento e descarte na atmosfera; a água é reinjetada no solo após resfriamento e ajuste de pH; o óleo separado é coletado em tambores.

# OXIDAÇÃO/REDUÇÃO QUÍMICA *IN SITU*



# Biorremediação

- ❖ Processo de tratamento que utiliza microrganismos, como fungos e bactérias, para degradar ou transformar substâncias perigosas em substâncias menos tóxicas ou não tóxicas.

(Carrara, 2003)

# Biorremediação

- ❖ Os microrganismos digerem compostos orgânicos para produção de energia.
- ❖ Uma vez degradados os contaminantes, a população de microrganismos morre devido à falta de alimento.
- ❖ Para que as técnicas de biorremediação sejam eficientes, o meio poroso deve permitir o crescimento da população de microrganismos (biomassa), que pode ser obtido criando-se condições ambientais adequadas.

# Biorremediação

- ❖ Microrganismos nativos ou indígenas: crescimento pode ser estimulado através da adição de nutrientes, introdução de oxigênio e adequação da temperatura. Para tratamentos anaeróbicos, deve ser feita a remoção do oxigênio dissolvido e outros aceptores de elétrons da água ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) antes da entrada no reator.
- ❖ Microrganismos exógenos: inoculação.

# Pilot scale reactor for infiltrations test



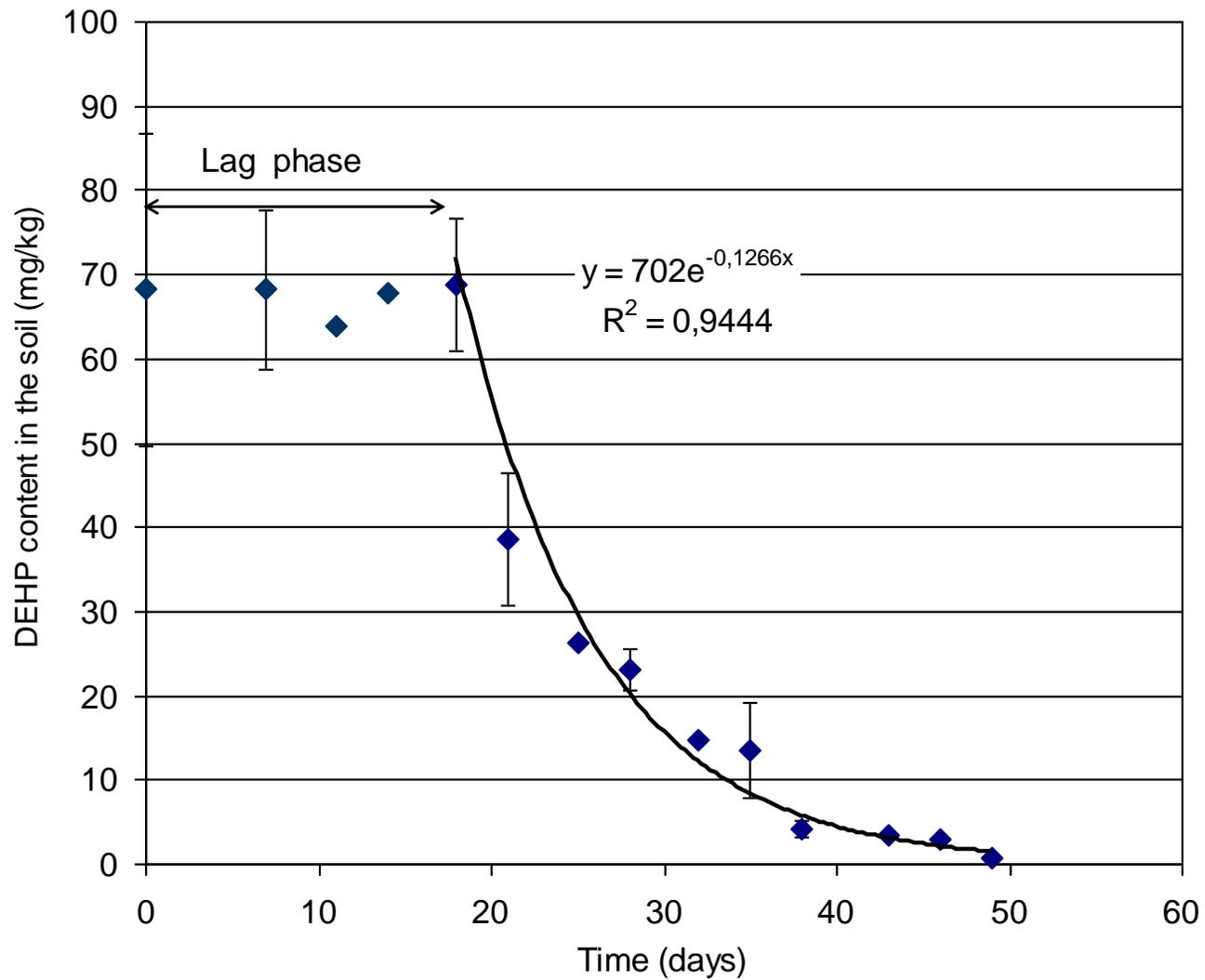
in a cement mixer.

(Carrara, 2002)

# Slurry –phase test in a cement mixer



(Carrara, 2002)

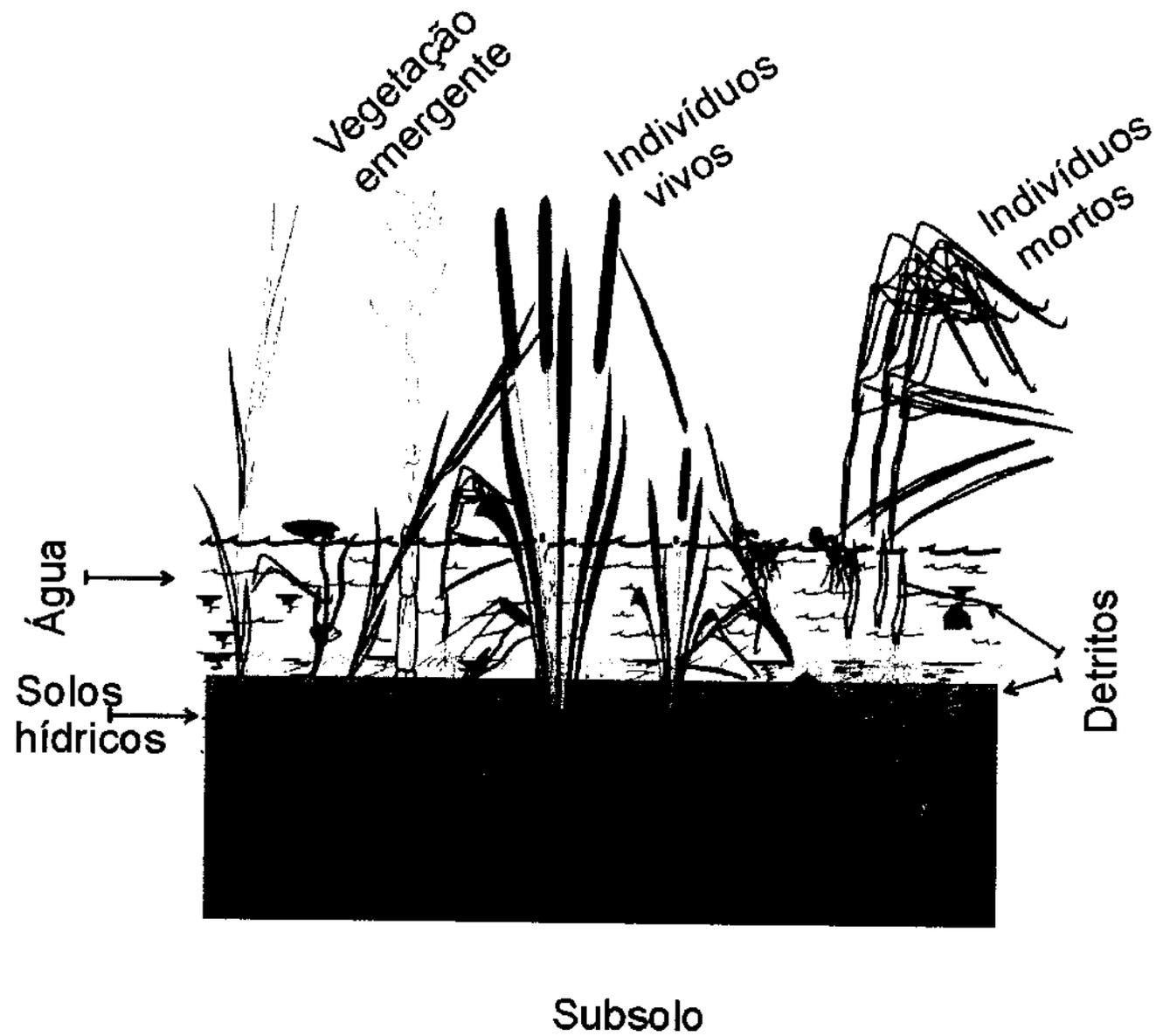


Evolution of DEHP concentration in the soil in the slurry-phase experiment.

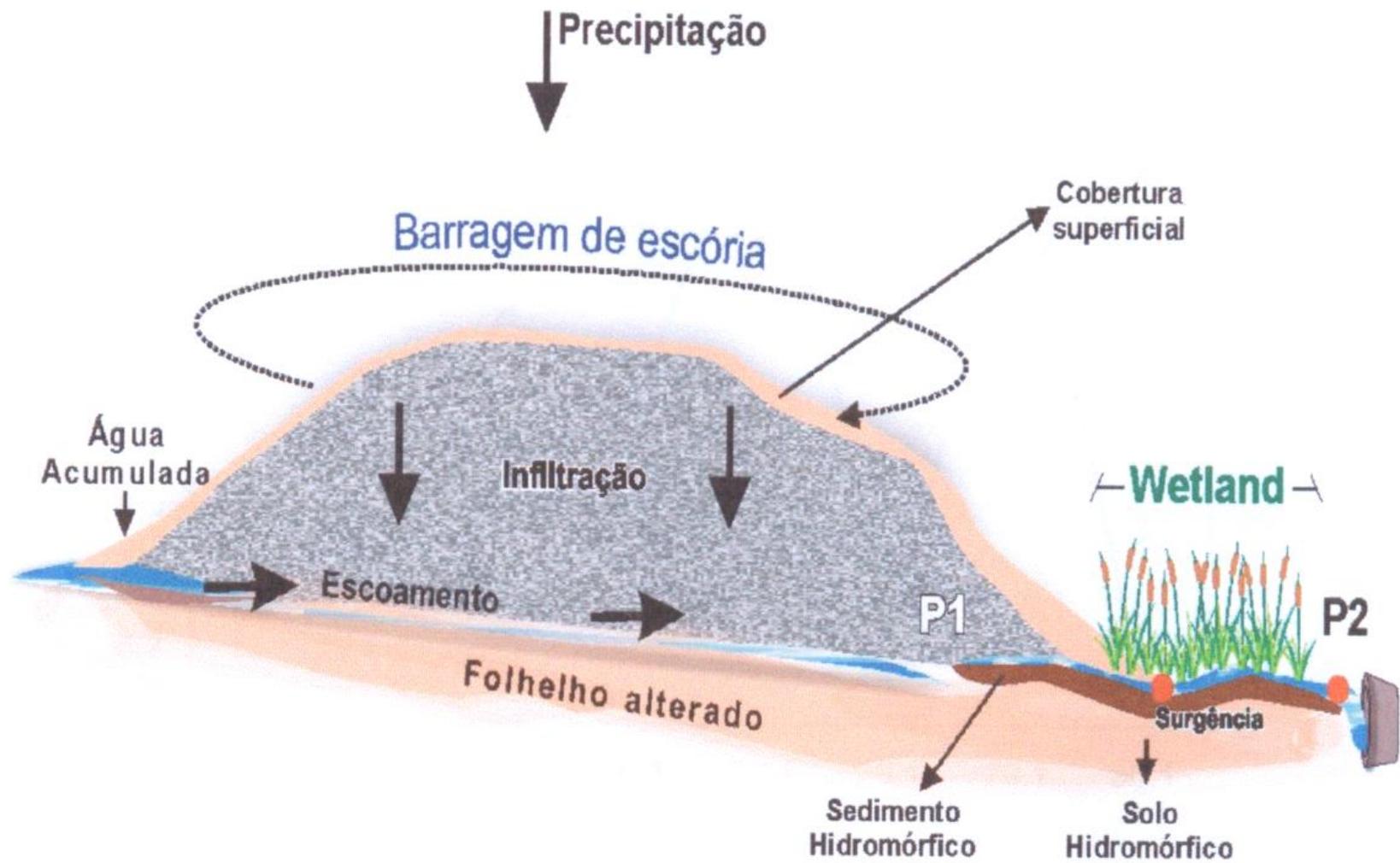
(Carrara, 2002)

# Zonas alagadiças (“wetlands”)

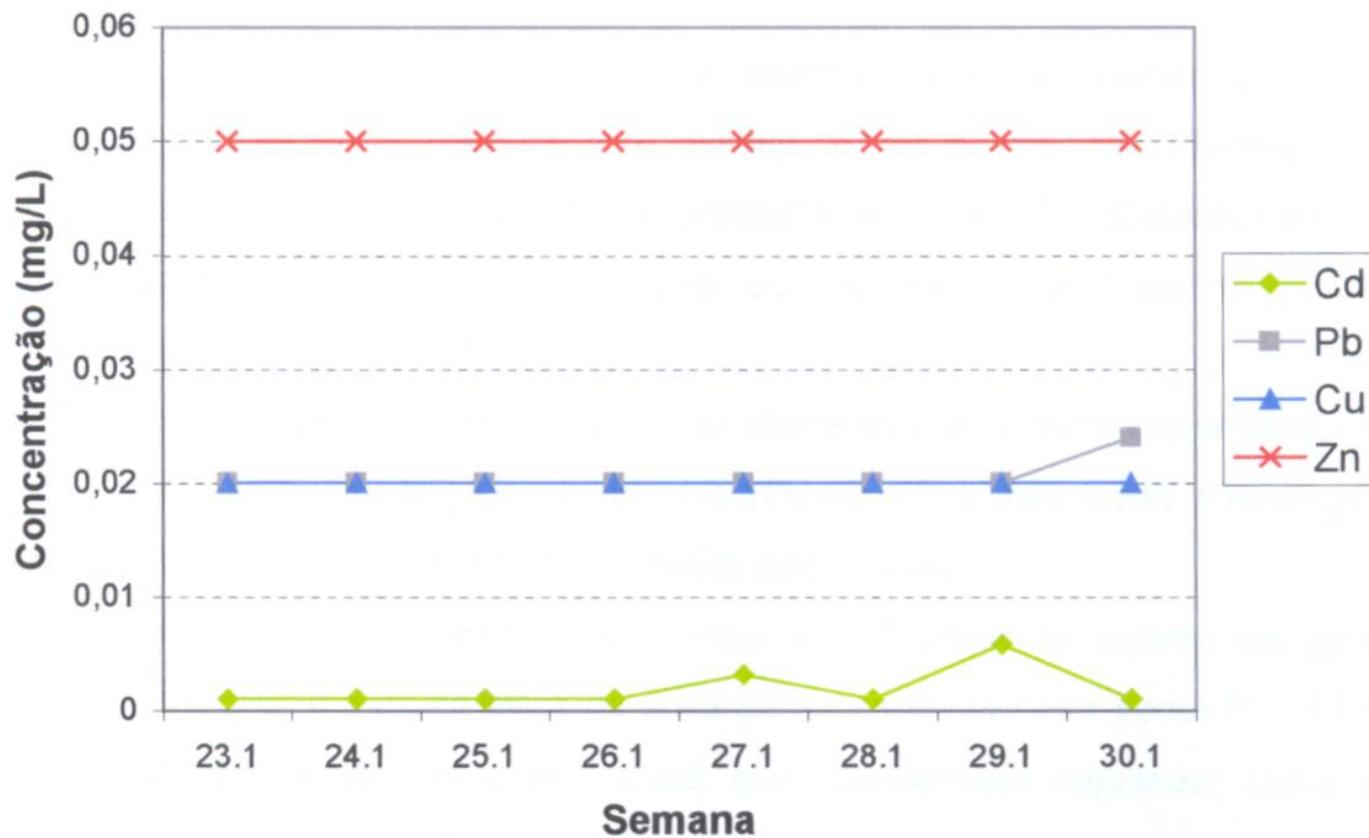
- ❖ Ambientes de transição entre ecossistemas terrestres (emersos) e aquáticos (submersos)
- ❖ Retenção/remoção de contaminantes: mecanismos de natureza física (filtração, sedimentação, adsorção, volatilização), química (precipitação, oxidação-redução, hidrólise) e biológica (metabolismo bacteriano, adsorção radicular de substâncias, liberação de exsudados específicos)
- ❖ 6,4% da área total de terras do planeta ( $8,6 \times 10^6$  Km<sup>2</sup>)



(Dias e Boavida, 2001)

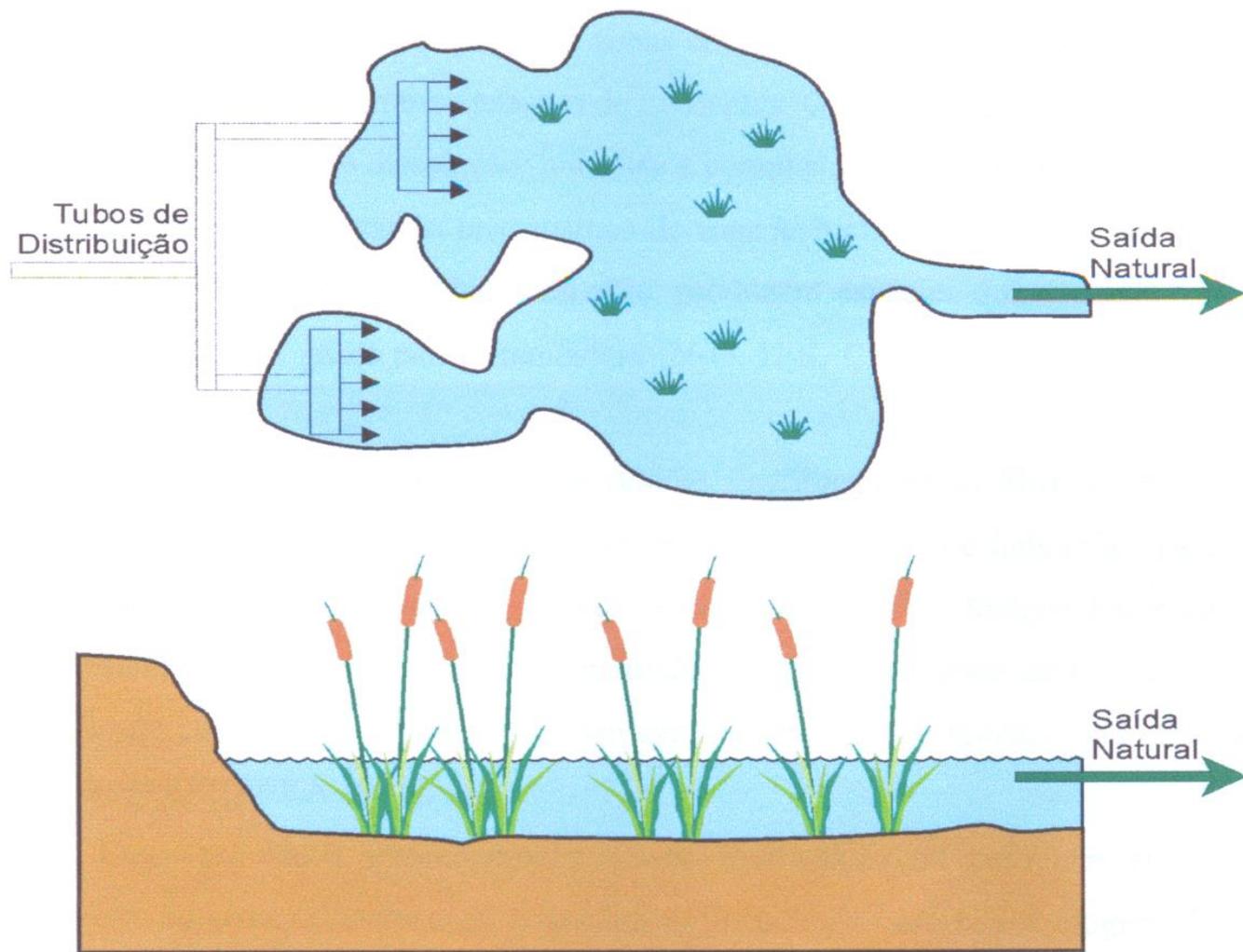


(Anjos, 2003)



**Figura 7.31** – Metais pesados no ponto de saída da zona alagadiça.

CONAMA 01/86, Classe 2: Cd = 0,001; Pb = 0,03; Cu = 0,02; e Zn = 0,18



Fonte: KADKEC e KNIGHT (1996)

**Figura 5.3 - *Wetland* alterada**

(Anjos, 2003)