

**PHA3523 – TECNOLOGIAS DE  
REMEDIÇÃO DE ÁREAS  
CONTAMINADAS**

**Aulas 6, 12 e 13**

**Processos físico-químicos**

Prof. Mierzwa



Quais são as informações relevantes para a identificação de opções tecnológicas para remediação de áreas contaminadas?

- Características do solo:
  - Permeabilidade;
  - Transmissividade;
  - Tipo de material presente:
    - Matéria orgânica;
    - Areia;
    - Silte;
    - Argila.
  - Capacidade de troca iônica;
  - Atividade microbiológica.
- Características do aquífero:
  - Tipo de aquífero;
  - Características hidráulicas;
  - Potencial de óxido redução;
  - Características de qualidade;
- Características dos contaminantes:
  - Propriedades físico-químicas;
  - Biodegradabilidade.

# Características do solo

- **Permeabilidade:** facilidade de penetração da água ou contaminante no solo e conseqüentemente no aquífero;
- **Transmissividade:** capacidade de transporte da água e contaminantes através do solo;
- **Tipo de material presente:**
  - **Matéria orgânica:** pode complexar metais e outros contaminantes, alterando a sua mobilidade;
  - **Areia, silte e argila:** afetam as características de transporte da água e dos contaminantes;
  - **Capacidade de troca iônica:** afeta a mobilidade dos contaminantes;
  - **Atividade microbológica:** pode influenciar a degradação/mobilidade dos contaminantes.

# Tipos de Solo em Função dos seus Constituintes

## Texturas do Solo

Propriedades controladas pela textura:

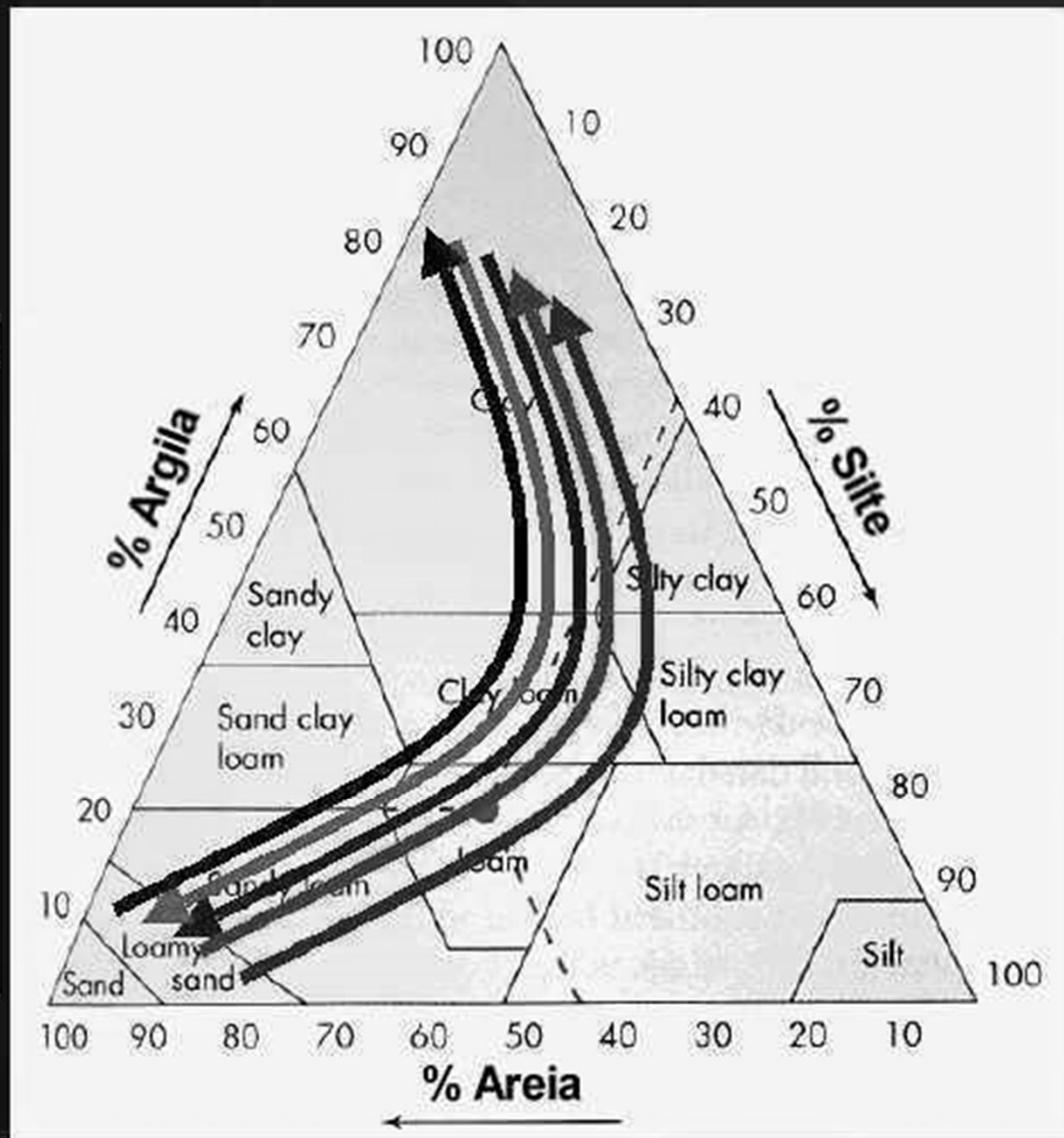
Taxa de Infiltração

Retenção de Água

Retenção de Nutrientes

Trabalhabilidade

Estabilidade



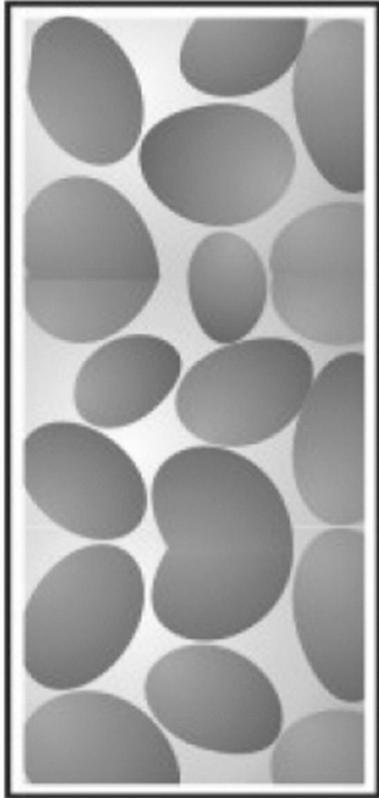
## RELEVÂNCIA DAS INFORMAÇÕES PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS (AQUÍFERO)

- Tipo de aquífero: afeta a mobilidade da água e dos contaminantes:
  - Aquífero livre ou freático:
    - Maior vulnerabilidade aos processos de contaminação.
  - Aquífero confinado ou artesiano:
    - Menor vulnerabilidade, porém a sua contaminação é um sério problema.



Tipos de aquíferos segundo a sua localização  
(BORGHETTI et al, 2004 apud ABAS, 2006)

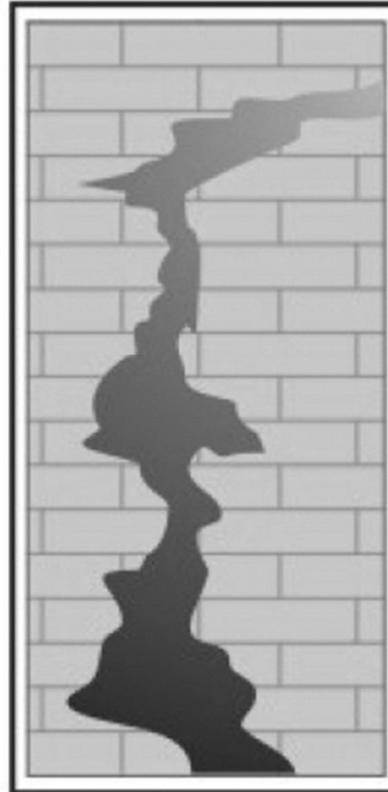
POROSO



FISSURAL



CÁRSTICO



Fonte: (BORGHETTI et al., 2004 apud ABAS, 2006)

## Aquífero

- **Potencial de óxido redução:** capacidade de solubilizar ou precipitar metais, ou oxidar/reduzir compostos orgânicos;
- **Características de qualidade:** presença de constituintes que podem reagir com os contaminantes alterando as suas propriedades.

## Contaminantes

- **Propriedades físico-químicas:** capacidade de interação com o solo, água e contaminantes e sua distribuição entre as fases sólida, líquida e gasosa;
- **Biodegradabilidade:** capacidade de sofrer degradação por processos biológicos naturais.

- Constante de dissociação ácida ( $k_A$ ): está relacionada ao grau de dissociação dos compostos orgânicos;

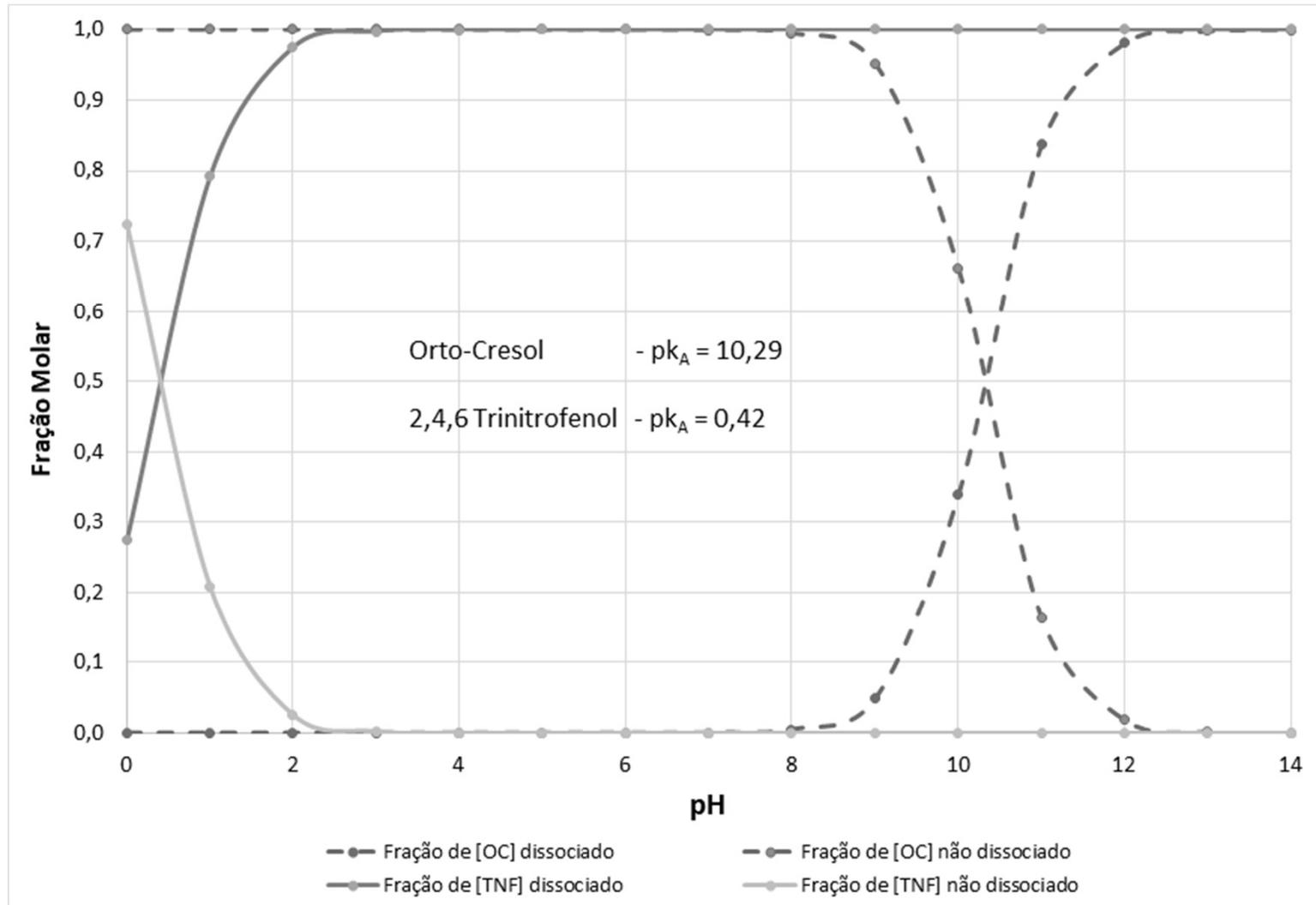


$$k_A = \frac{[H^+][R^-]}{[RH]}$$

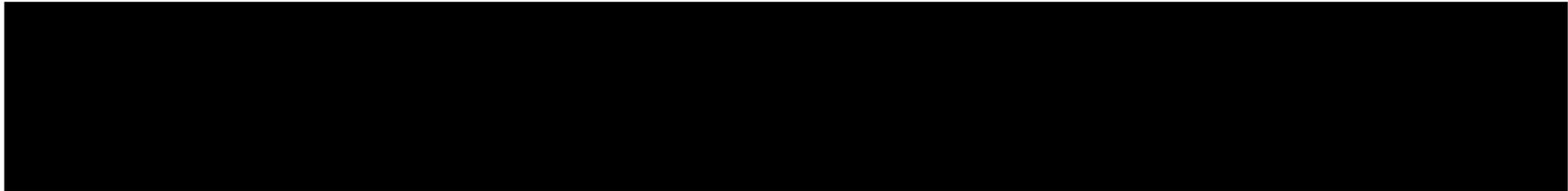
- Tomando-se o logaritmo da expressão de  $k_A$  e multiplicando-se ambos os lados da expressão por (-1):

$$\log k_A = \log[H^+] + \log \frac{[R^-]}{[RH]} \Rightarrow -\log[k_A] = -\log[H^+] - \log \frac{[R^-]}{[RH]}$$

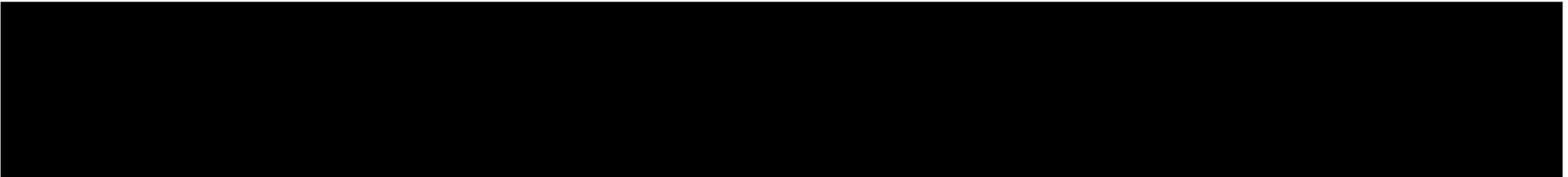
$$-\log[x] = px \quad \therefore pk_A - pH = -\log \frac{[R^-]}{[RH]} \Rightarrow pk_A - pH = \log \frac{[RH]}{[R^-]}$$

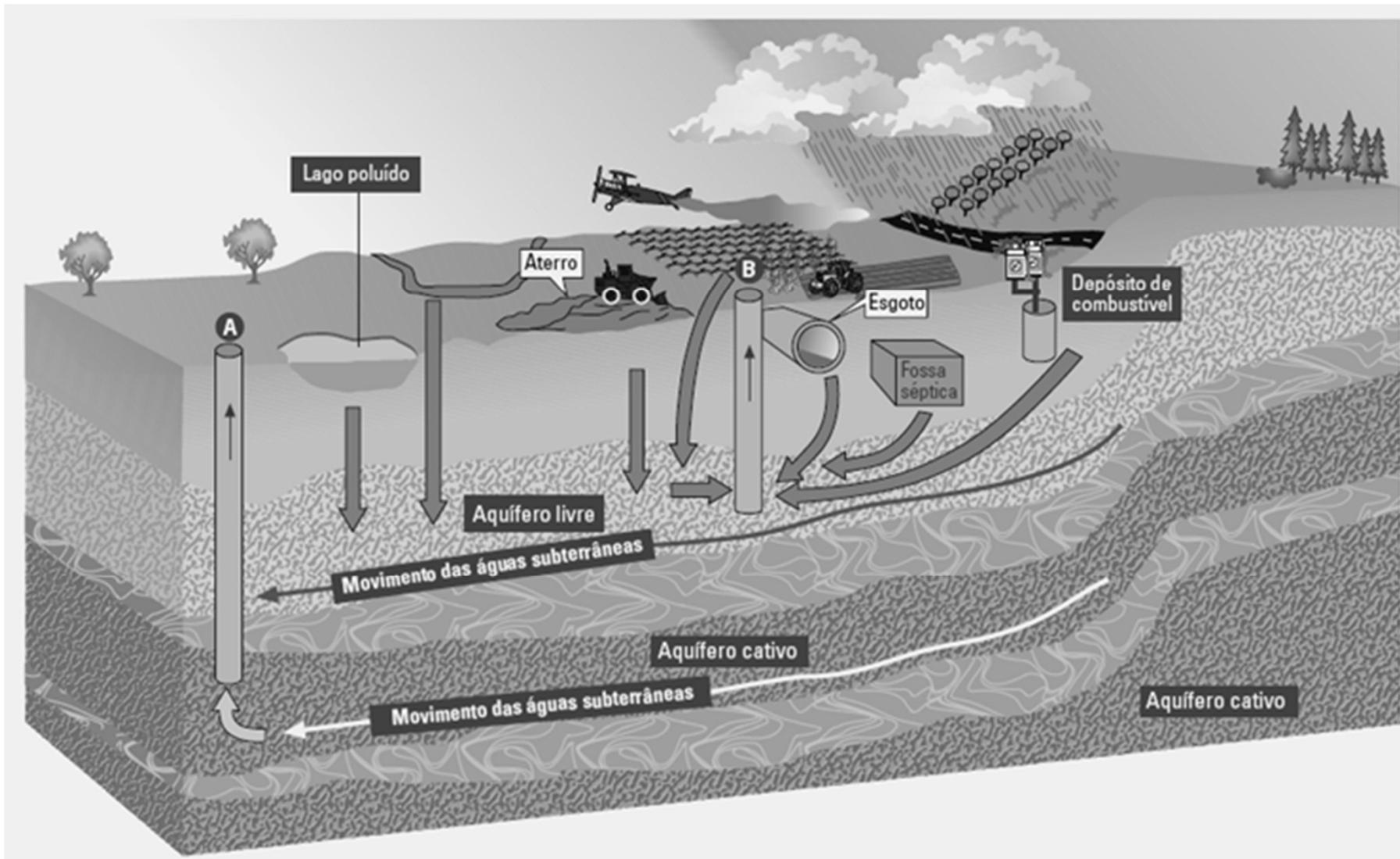


**Dissociação do Orto-cresol e 2,4,6 Trinitrofenol em função do pH**



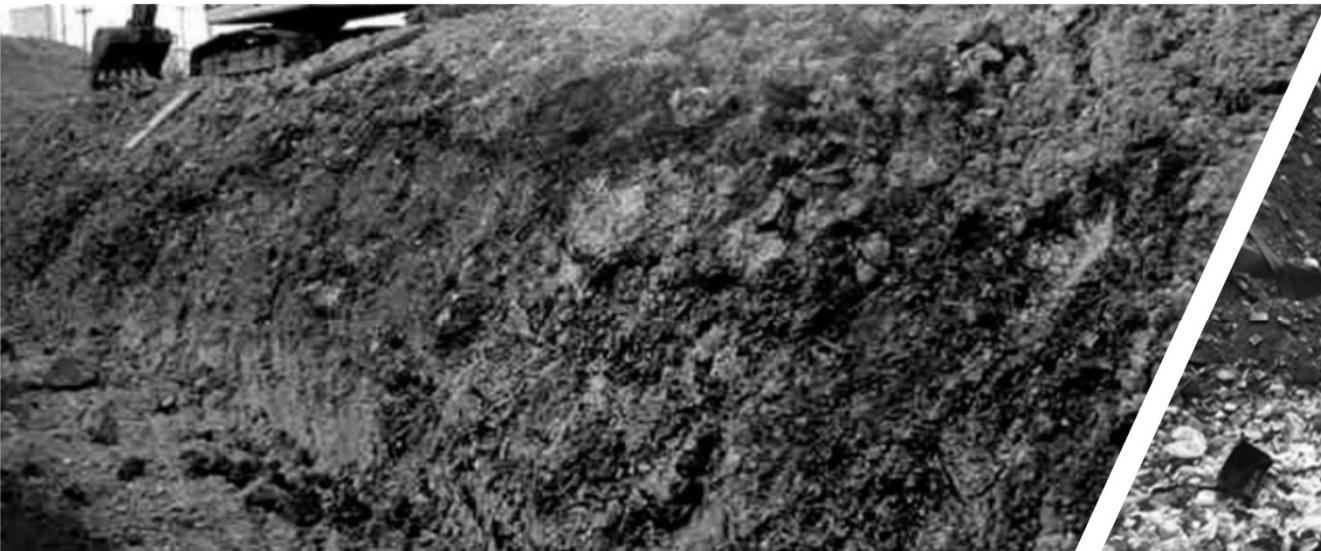
<b>Orto-cresol</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Massa molar	108	g/mol
Massa específica	1,046	g/cm <sup>3</sup>
Solubilidade em água	20	g/L (20°C)
Log do Coeficiente de partição (o/w)	1,95	--
Pressão de vapor	24	Pa (20 °C)
pK <sub>A</sub>	10,29	--

- 
- Meio contaminado:
    - Solo;
    - Água subterrânea;
    - Solo e água subterrânea.
  - Tipo de contaminação:
    - Concentrada;
    - Dispersa.
  - Extensão da contaminação;
  - Características dos contaminantes;
  - Características do meio no qual os contaminantes estão presentes;
  - Possibilidade de remoção física do material responsável pela contaminação;
  - Necessidade de intervenção no local.



## Possíveis rotas e tipos de contaminação do solo e águas subterrâneas

(fonte: <http://ebio.ind.br/2017/05/11/vale-a-pena-mudar-minha-fossa-para-uma-estacao-de-tratamento-se-ela-nunca-deu-problema/>)



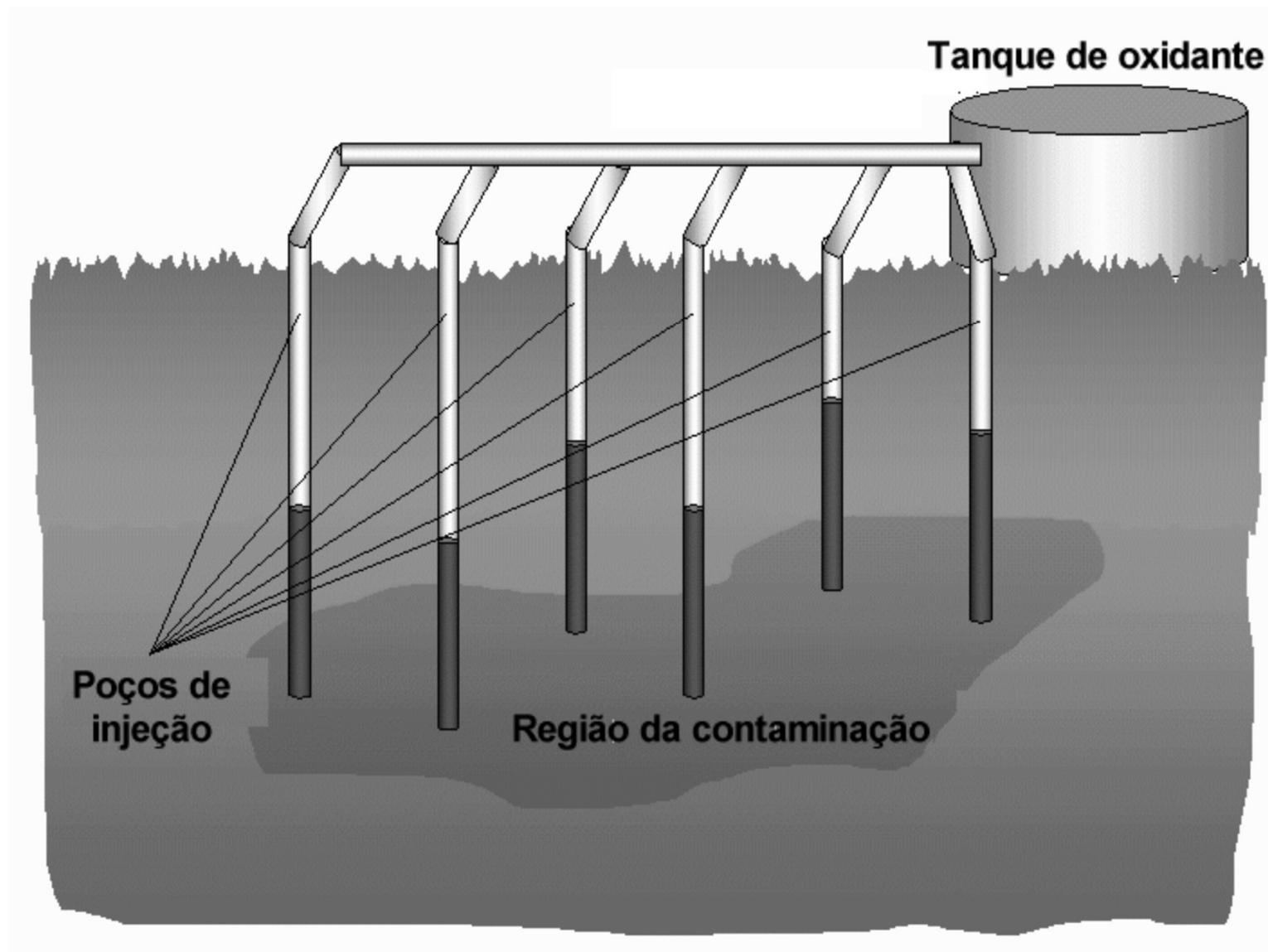


# TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance					Availability	Nonhalogenated VOC's	Halogenated VOC's	Nonhalogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
<b>Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge</b>																
<b>3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment</b>																
4.4 Chemical Oxidation	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	◇	○	○
4.5 Electrokinetic Separation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
4.6 Fracturing	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.7 Soil Flushing	●	●	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	●	○	○
4.8 Soil Vapor Extraction	●	○	○	○	●	●	○	●	●	○	○	○	●	○	○	○
4.9 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	●	○

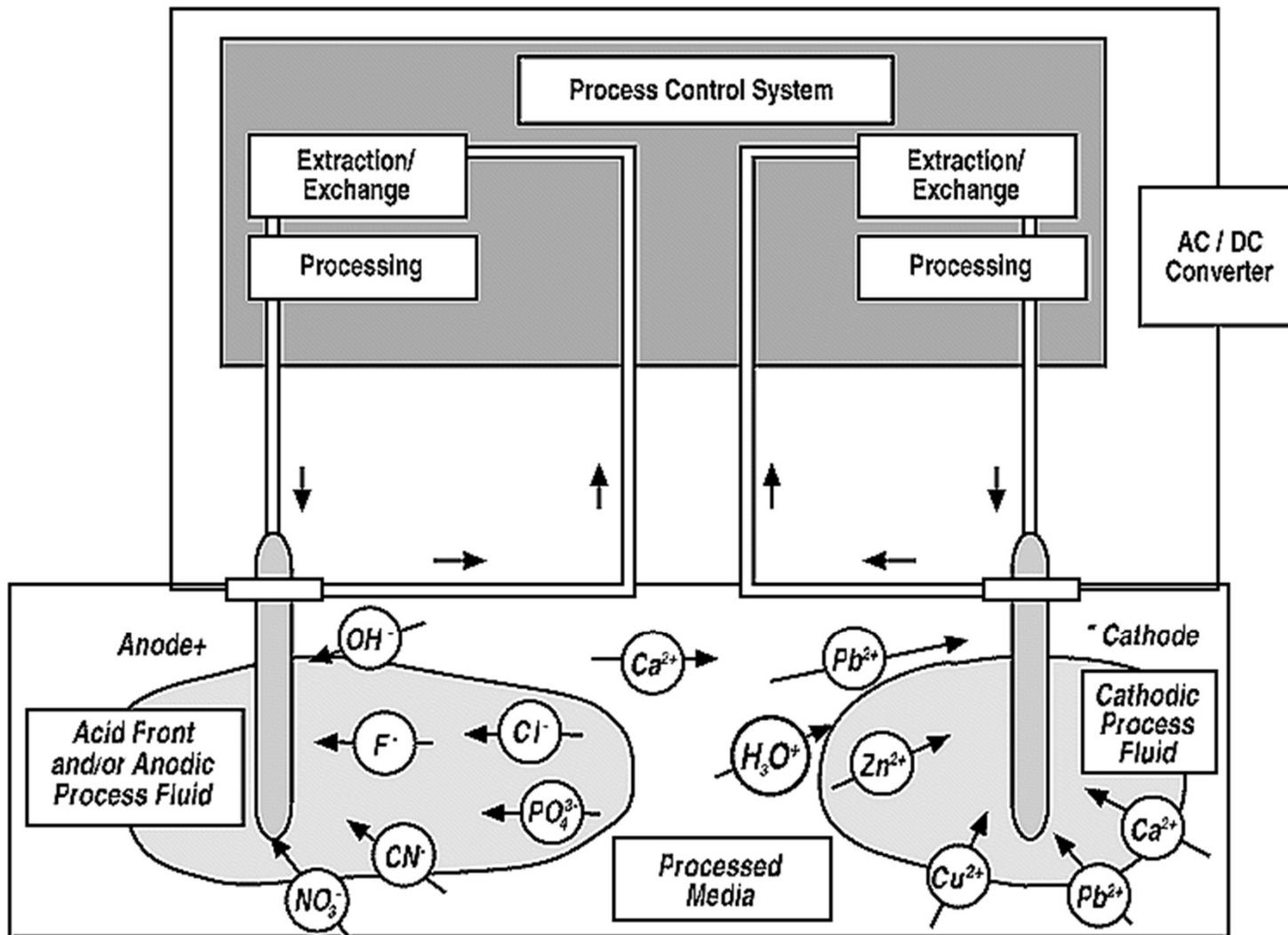
Fonte: [https://frtr.gov/matrix2/section3/table3\\_2.pdf](https://frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf)

- 
- Consiste no uso de oxidantes químicos específicos:
    - Peróxido de hidrogênio;
    - Permanganato de potássio;
    - Ozônio.
  - Efetivo para a oxidação de contaminantes orgânicos;
  - Considerações sobre o processo:
    - Requer a utilização e manipulação de grandes quantidades de produtos químicos;
    - A demanda do oxidante pode ser elevada em função da falta de seletividade e complexidade da matriz na qual é aplicado.

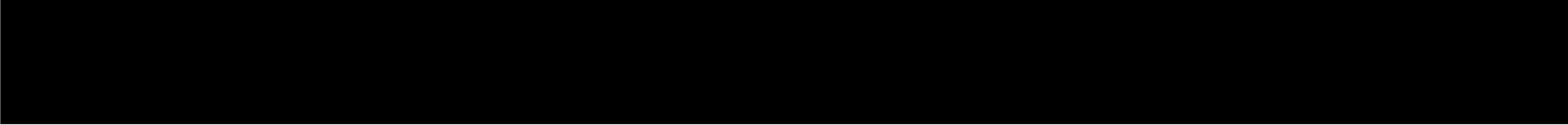


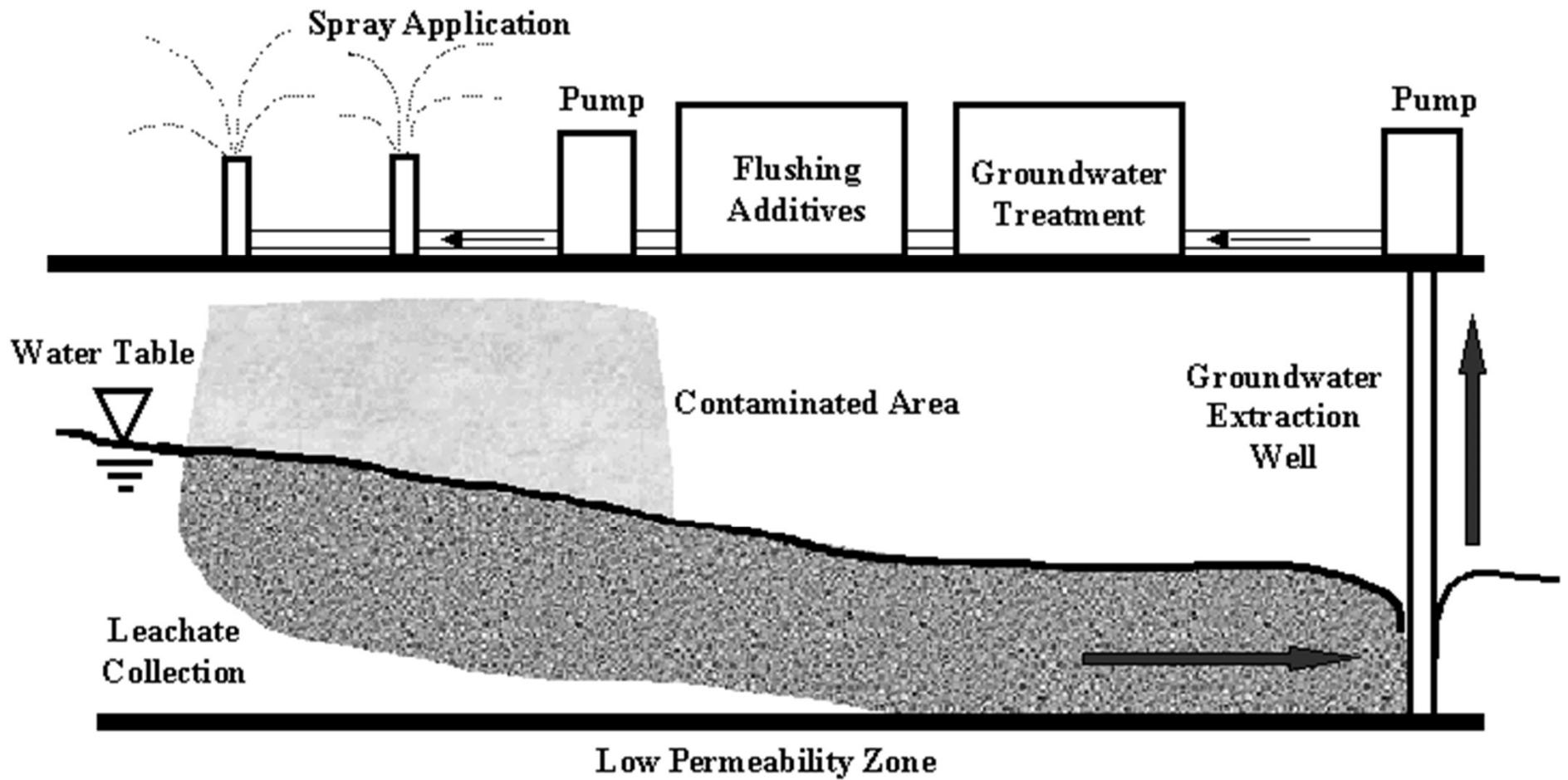
**Representação do processo de oxidação química**

- 
- Utilização de corrente elétrica e um fluido iônico para transporte e remoção de compostos iônicos presentes no solo saturado;
  - Específico para remoção de metais pesados, ânions e compostos orgânicos polares;
  - Considerações sobre o processo:
    - Eficiência reduzida para solos com umidade inferior a 10%, as melhores eficiências são obtidas para solos com umidade entre 14% e 18%;
    - Problemas de variabilidade da condutividade elétrica do solo;
    - Maior efetividade para solos com predominância de argila, em função da carga superficial;
    - Por se tratar de um processo eletroquímico, podem ocorrer reações de óxido redução indesejadas;
    - Os custos são influenciados pela extensão da contaminação, condutividade elétrica do solo e espaçamento entre os eletrodos.

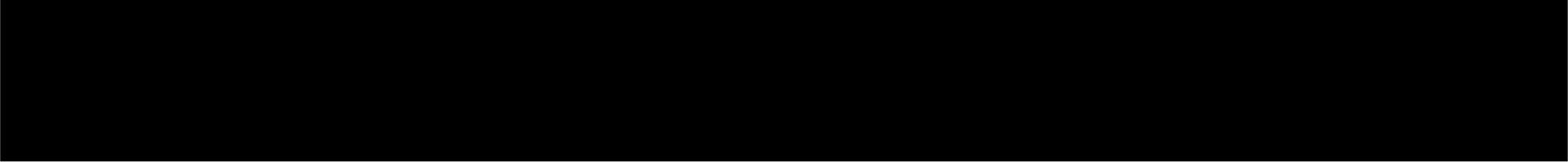


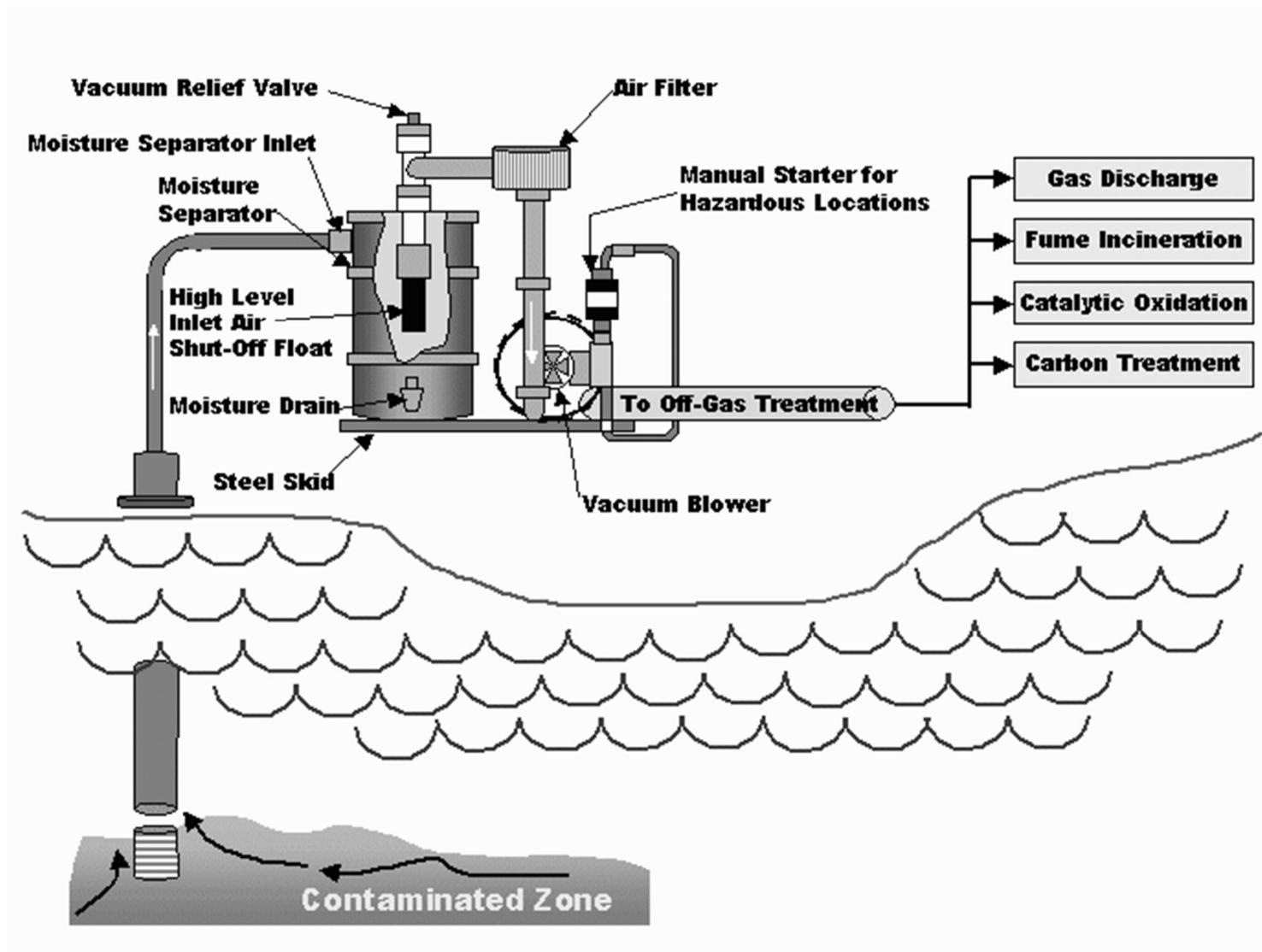
**Representação esquemática do processo de separação eletrocinética**

- 
- Utilização de uma mistura de solventes (água e um solvente miscível como etanol), para a extração de solventes orgânicos;
  - Também pode ser utilizado para a remoção de contaminantes inorgânicos, quando se utiliza um agente complexante e água;
  - Considerações sobre o processo:
    - A permeabilidade do solo pode limitar a utilização do processo;
    - Se forem utilizados surfactantes, estes podem ser adsorvidos pelo solo com consequente perda de eficiência do processo;
    - A reação do fluido de extração com o solo pode reduzir a mobilidade dos contaminantes;
    - Existe o potencial de aumentar a mobilidade dos contaminantes, caso a recuperação do fluido de lavagem não seja efetiva;
    - Necessidade de tratamento da corrente de lavagem após a sua remoção do solo.

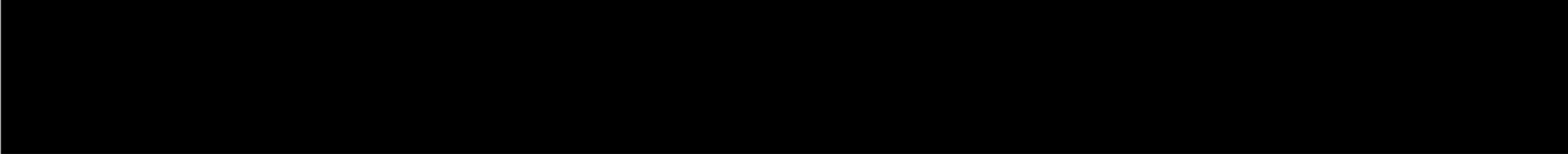


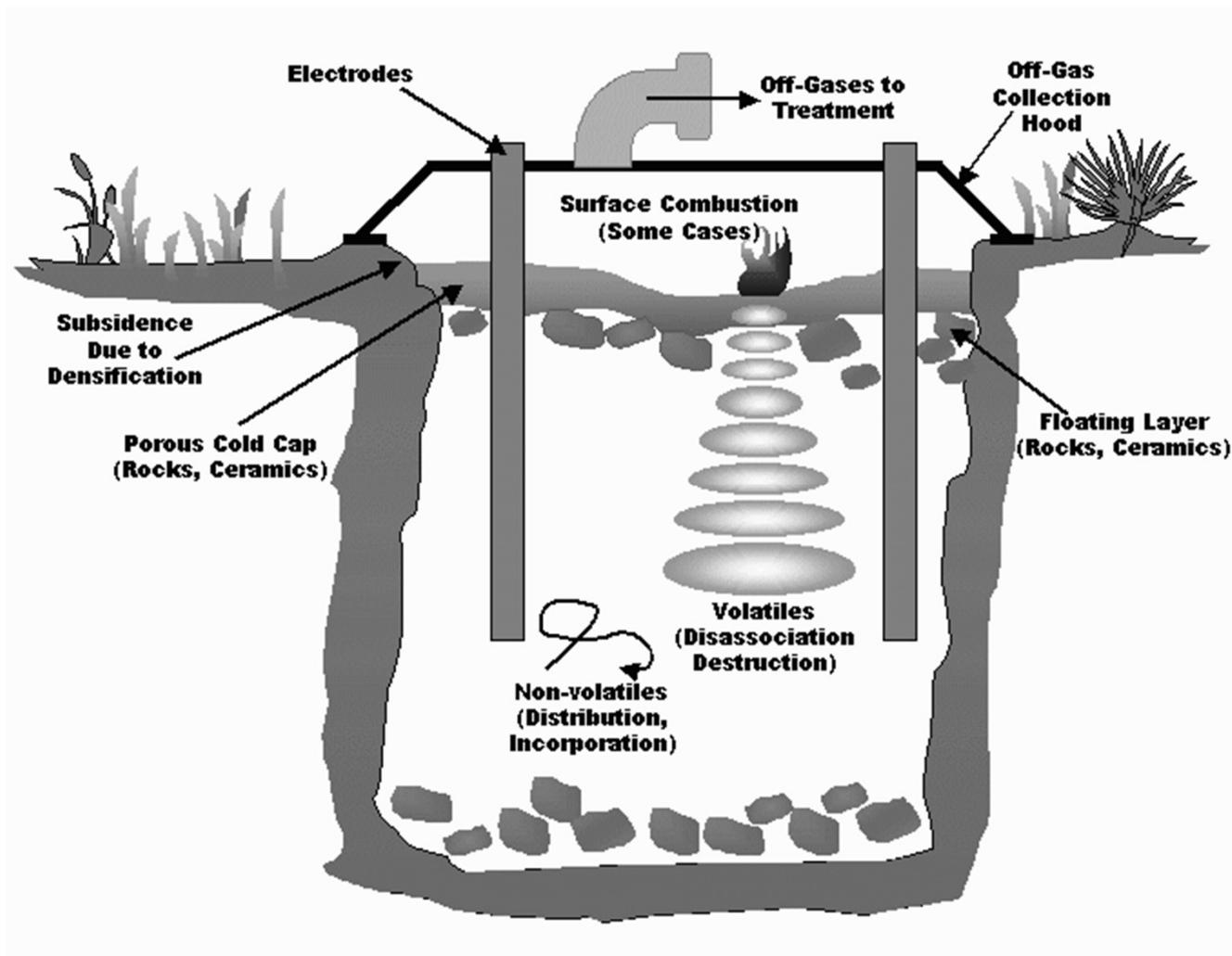
**Representação do processo de lavagem do solo/lixiviação**

- 
- Aplicado para solos contaminados com compostos orgânicos voláteis e semivoláteis;
  - Quanto maior a pressão de vapor do contaminante maior é o potencial de aplicação deste processo;
  - A utilização de ar por melhorar as características de biodegradabilidade do solo;
  - Considerações sobre o processo:
    - Solos com baixa porosidade elevado grau de saturação irão requerer maior consumo de energia para a extração;
    - Pode ser necessária uma malha com um elevado número de poços de extração em função da variação das características morfológicas do solo;
    - Necessidade de tratamento do fluido de extração;
    - Não é eficiente para extração de contaminantes da zona saturada do solo, o que pode ser resolvido com o rebaixamento do nível do lençol freático.



**Representação esquemática do processo de extração com ar**

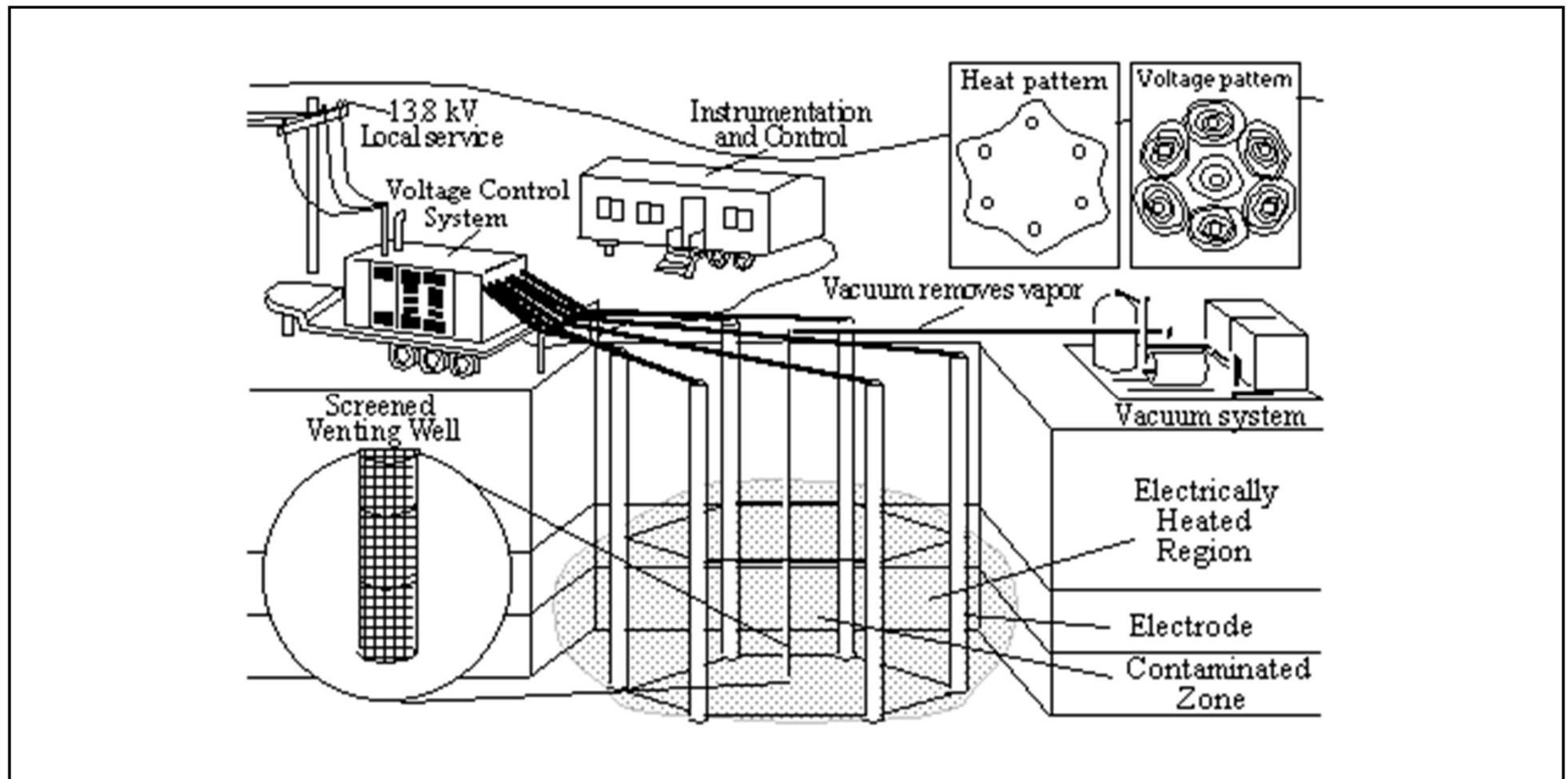
- 
- Processo utilizado para reduzir a mobilidade dos contaminantes por meio de processo físico-químicos;
  - Necessidade da realização de testes de lixiviação após a aplicação do processo de solidificação/estabilização;
  - Utilização de barreiras ativas para adsorver/fixar os contaminantes;
  - Também é possível utilizar uma corrente elétrica para a vitrificação do solo;
  - Considerações sobre o processo:
    - Aplicação limitada em função da profundidade em que os contaminantes se encontram;
    - O uso futuro do solo pode afetar o processo de imobilização, o que limita a utilização da área após o processo de remediação.



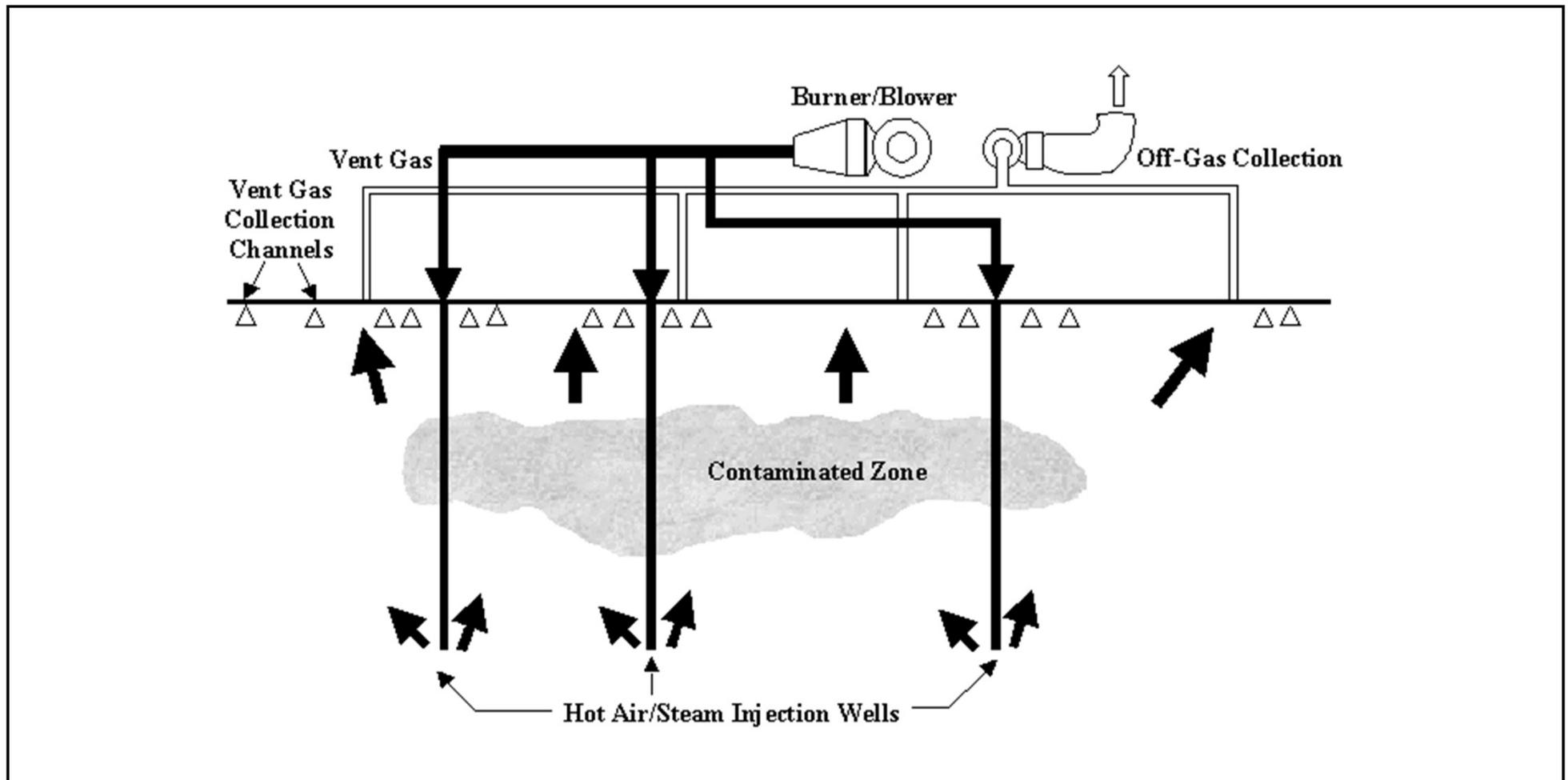
**Exemplo do processo de vitrificação no local**

- 
- Consiste no aquecimento do solo na região de ocorrência da contaminação para vaporização e extração do contaminante;
  - O aquecimento pode ser feito por resistência elétrica, rádio frequência ou injeção de ar quente ou vapor;
  - É necessária a extração dos vapores gerados por meio de aplicação de vácuo;
  - Processo aplicação para solos menos permeáveis;
  - A remoção da umidade faz com que o solo seja fraturado.

- 
- Aplicação:
    - Solos com elevado teor de umidade;
    - Remoção de compostos orgânicos semivoláteis e voláteis;
    - Alguns defensivos agrícolas e combustíveis, dependendo da temperatura que se consegue obter.
  - Considerações sobre o processo:
    - Necessidade de estrutura para a extração e tratamento dos contaminantes;
    - Não é efetivo para a remoção de contaminantes da zona saturada do solo;
    - Solos com teor elevado de matéria orgânica apresentam grande capacidade de adsorção o que reduz a taxa de extração.



**Exemplo do processo de aquecimento por resistência elétrica e extração à vácuo**

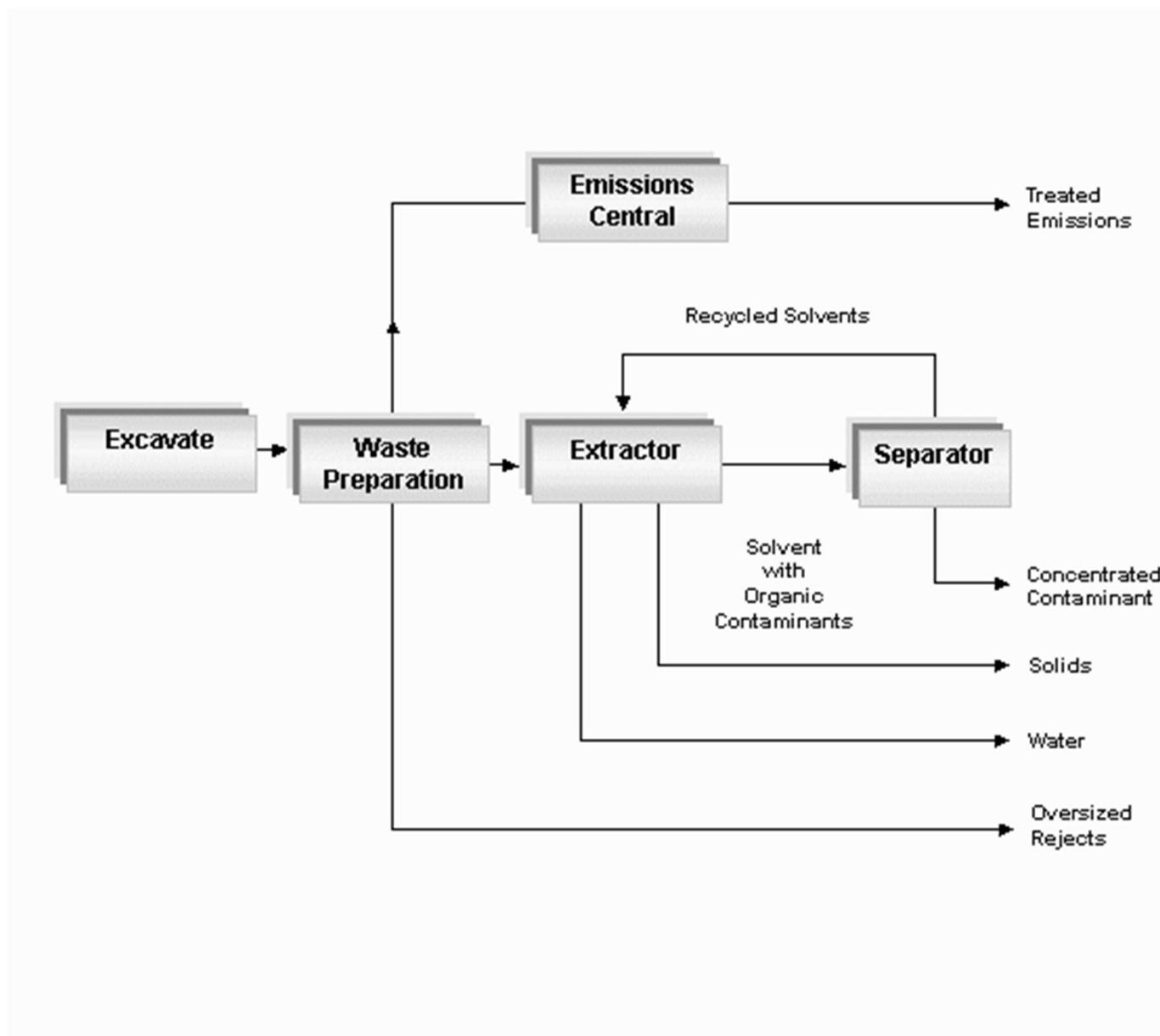


**Exemplo do processo de extração com ar quente/vapor**

# TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

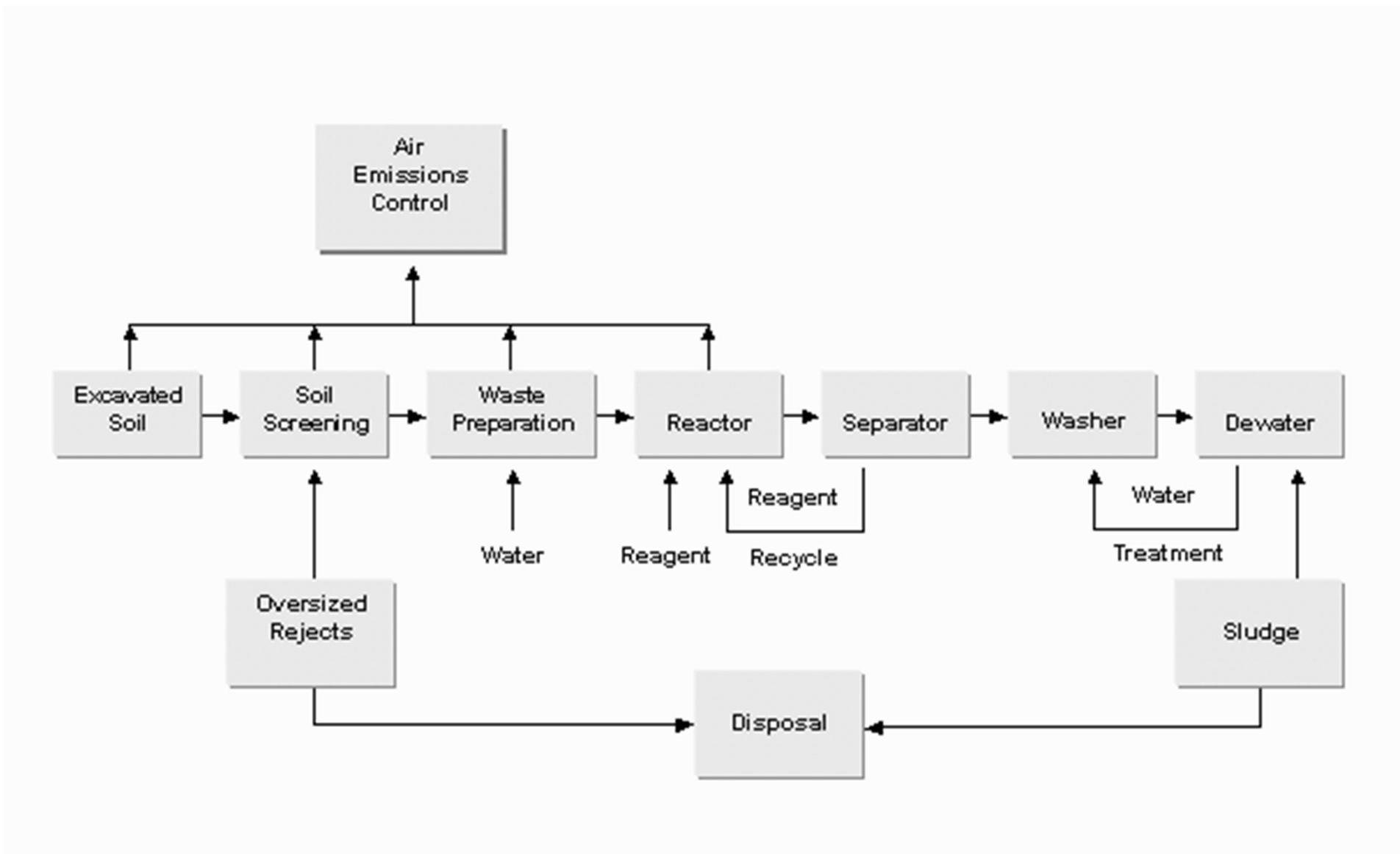
Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance					Availability	Non halogenated VOC's	Halogenated VOC's	Non halogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radio nuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
<b>Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge</b>																
<b>3.5 Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming excavation)</b>																
4.15 Chemical Extraction	●	○	○	○	○	○	○	●	○	○	●	●	○	●	○	○
4.16 Chemical Reduction /Oxidation	●	○	○	○	●	○	●	●	○	○	○	○	○	●	○	○
4.17 Dehalogenation	●	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	●	○	○	○	○
4.18 Separation	●	○	○	○	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.19 Soil Washing	●	○	○	○	●	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○
4.20 Solidification/Stabilization	●	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	●	●	○
<b>3.6 Ex Situ Thermal Treatment (assuming excavation)</b>																
4.21 Hot Gas Decontamination	○	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4.22 Incineration	●	●	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●
4.23 Open Burn/Open Detonation	●	●	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●
4.24 Pyrolysis	●	●	○	○	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○	○	○
4.25 Thermal Desorption	●	●	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●

# Processo de Extração Química

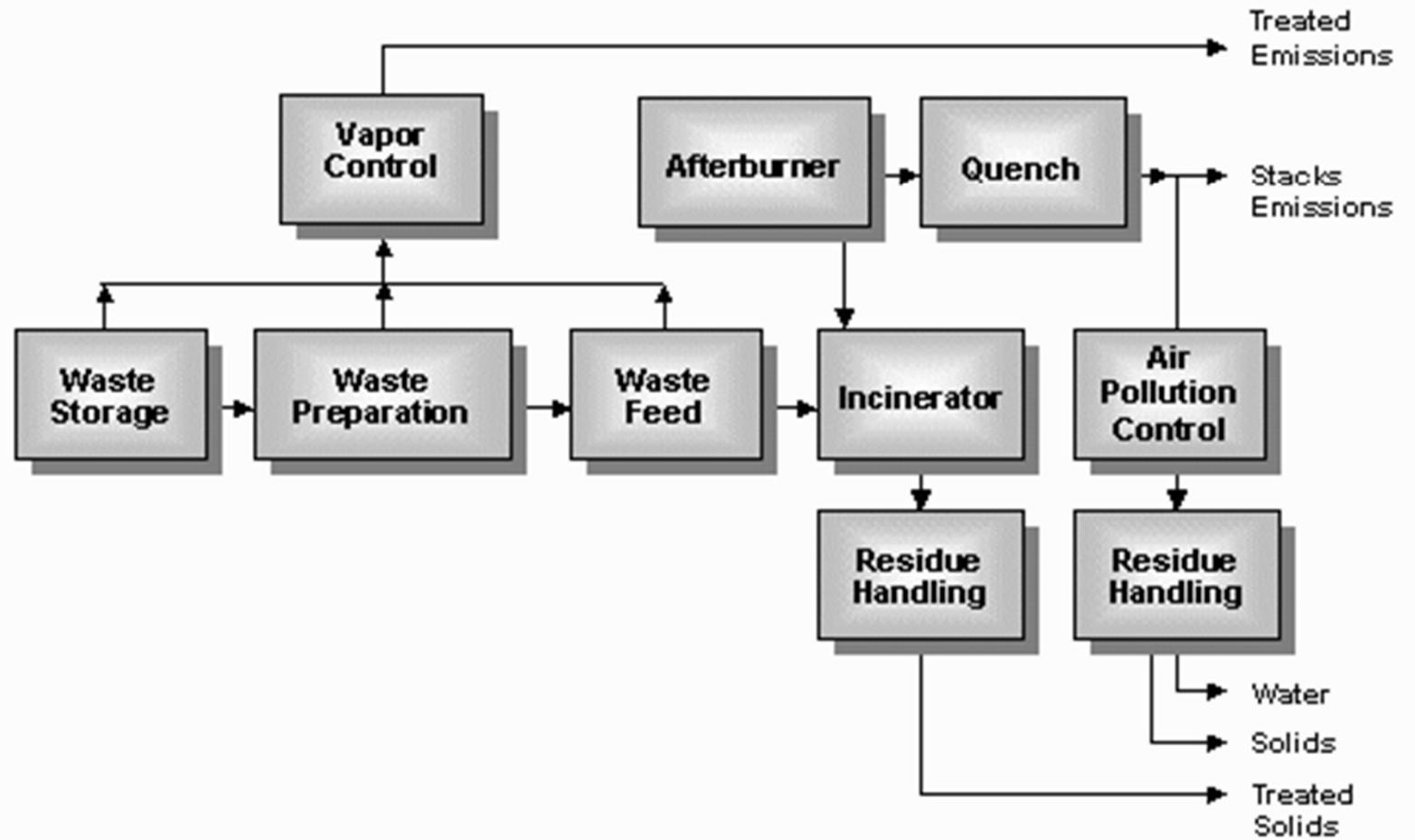


- 
- Pode ser feita por meio da utilização:
    - Solução ácida → remoção de metais;
    - Solventes → remoção de compostos orgânicos ou metais complexados.
  - Aplicação:
    - A extração por solventes pode ser utilizada para tratamento de sedimentos, lodos e solos contaminados;
    - Os contaminantes de interesse são os compostos orgânicos, como PCBs, COVs, solventes halogenados e derivados de petróleo;
    - A extração ácida é utilizada para os mesmos tipos de materias, porém contaminados com metais.

# Redução/Oxidação química



# Incineração



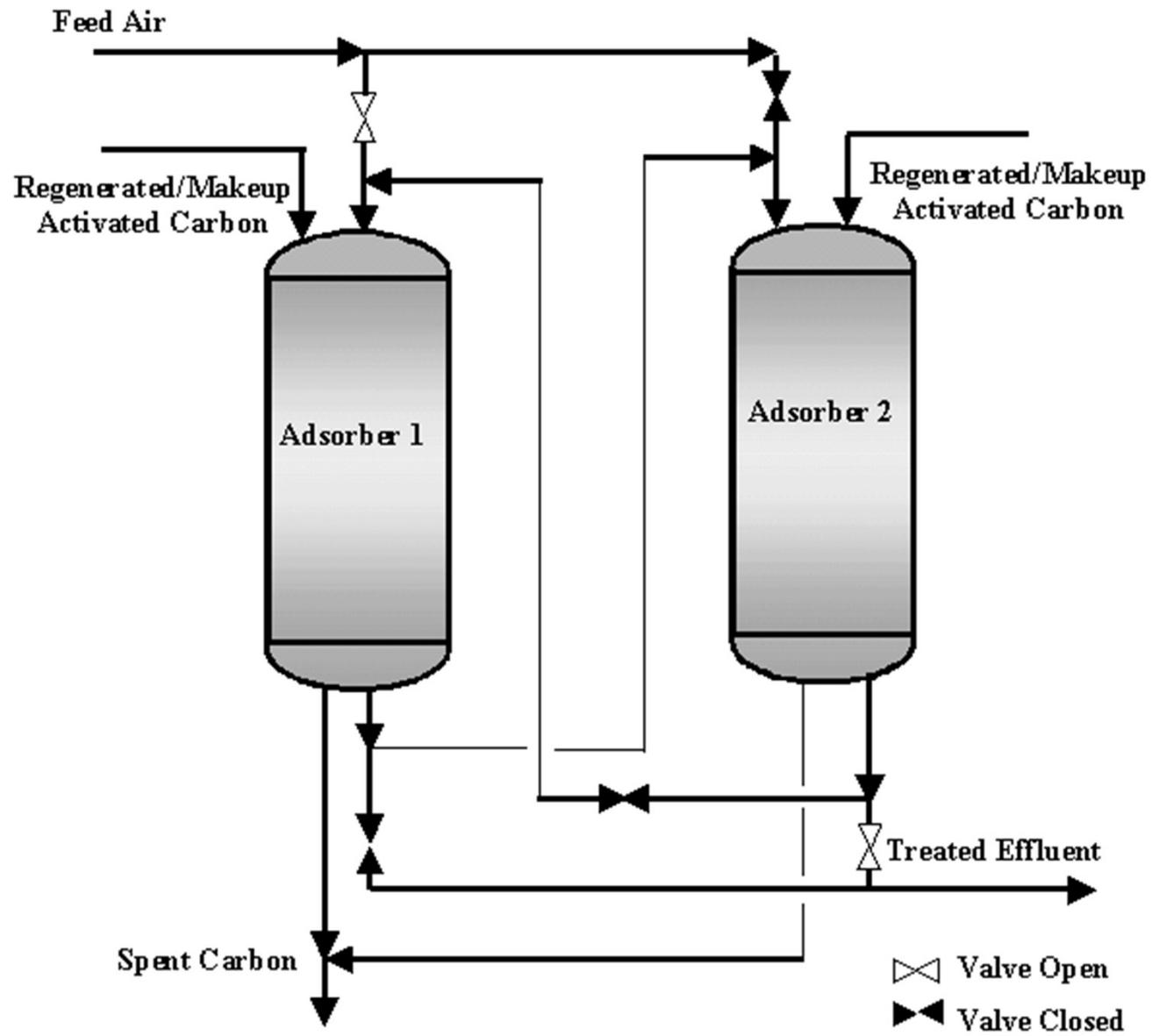
- 
- São utilizadas as mesmas técnicas que àquelas utilizadas para remediação de solos, lamas ou sedimentos;
  - A sua aplicação pode ser menos complexa, dependendo do tipo de contaminante e extensão da contaminação;
  - Deve-se ter atenção com relação aos tratamentos relacionados à extração da água contaminada dos aquíferos contaminados, o que pode exigir o seu descarte em mananciais superficiais.

- 
- Muitas tecnologias aplicadas para o tratamento de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis podem resultar em emissões atmosféricas;
  - Isto pode requerer a utilização de sistemas para o controle destas emissões.

# TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

Rating Codes ● Above Average ○ Average ○ Below Average N/A - "Not Applicable" I/D - "Insufficient Data" ◇ - Level of Effectiveness highly dependent upon specific contaminant and its application	Development Status	Treatment Train	Relative Overall Cost & Performance					Availability	Non halogenated VOC's	Halogenated VOC's	Non halogenated SVOC's	Halogenated SVOC's	Fuels	Inorganics	Radionuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
<b>3.14 Air Emissions/Off-Gas Treatment</b>																
4.54 Biofiltration	●	N/A	●	●	◇	●	●	○	●	◇	◇	◇	●	○	I/D	◇
4.55 High Energy Destruction	○	N/A	I/D	I/D	○	○	I/D	○	●	●	●	●	●	○	I/D	○
4.56 Membrane Separation	○	N/A	I/D	I/D	○	○	I/D	○	●	●	○	○	○	○	I/D	○
4.57 Oxidation	●	N/A	●	●	●	●	I/D	●	●	●	●	●	●	○	I/D	○
4.58 Scrubbers	●	N/A	○	○	●	●	I/D	●	○	○	○	○	○	●	I/D	I/D
4.59 Vapor Phase Carbon Adsorption	●	N/A	●	●	●	●	I/D	●	●	●	●	●	●	○	I/D	●

# Adsorção em carvão ativado da fase vapor



- 
- A maior parte das tecnologias utilizadas apenas transferem o contaminante de um meio para outro;
  - Necessidade de técnicas complementares para assegurar a destruição do contaminante e a disposição final do meio no qual o mesmo estava presente;
  - Após o processo de remediação é necessário monitorar o solo ou água contaminada para assegurar a sua efetiva remediação;
  - Um dos principais desafios para o projeto dos processos de remediação é o seu dimensionamento.