

PHA3523 – TECNOLOGIAS DE REMEDIÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Tecnologias de remediação: Processos físico-químicos

Prof. José Carlos Mierzwa
Prof. Rachel B. Costa

AGENDA DO DIA

- Classificação das técnicas de remediação;
- Processos físico-químicos para remediação de áreas contaminadas;
- Atividade 2

CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO

- Planejamento e implementação das técnicas exigem conhecimentos gerais e específicos multidisciplinares
- Remediação deve ser feita na fonte poluidora e na pluma de contaminação

CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO

Técnicas

Contenção

Confinamento ou isolamento deve impedir a liberação de material tóxico da área contaminada para o meio ambiente e interceptar o material já liberado

Aula
20/10

Ex situ

Envolve a remoção do material contaminado, ou seja, escavação do solo e bombeamento da água subterrânea para tratamento e/ou disposição em outro local

In situ

Tratamento do contaminante no próprio local, com aplicação de técnicas para extrair ou alterar a natureza química do contaminante para imobilizá-lo ou diminuir sua toxicidade sem movimentação do solo

CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE CONTENÇÃO

Remoção do solo	Técnica/ processos	Exemplos	Comentários
Sim (<i>ex situ</i>)	Disposição	Aterros	On site x off site Novo x existente
Não (<i>in situ</i>)	Bombeamento e tratamento	Poços verticais ou horizontais	No bombeamento e tratamento controla-se o gradiente hidráulico e coleta-se a água contaminada, o tratamento é <i>ex situ</i>
	Cobertura	Coberturas tradicionais, alternativas geoquímicas	
	Barreiras verticais	Diafragmas flexíveis, cortinas de injeção, estacas-prancha, biobarreiras, barreiras reativas	
	Barreiras horizontais	Barreiras horizontais de injeção	

CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO EX SITU

Técnica/ processos	Exemplos	Comentários
Químico	Neutralização, extração por solvente	Solo tratado pode ser disposto em um aterro ou retornado ao local
Físico	Lavagem do solo, estabilização, solidificação, vitrificação	
Biológico	Biopilhas, biorreatores	
Térmico	Incineração, dessorção térmica	

CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO IN SITU

Técnica/ processos	Exemplos	Comentários
Químico	Oxidação, redução	*Tecnologias que exigem remoção das fases líquida e/ou gasosa e tratamento <i>ex situ</i>
Físico	Lavagem*, estabilização/solidificação, vitrificação, aspersão de ar abaixo no nível freático (air sparging)*, extração de vapor do solo*, eletrocinese*	
Biológico	Atenuação natural monitorada, aspersão de ar acima do nível freático (bioventing), bombeamento de água, óleos e gases (bioslurping), aspersão abaixo do nível freático (biosparging)	
Térmico	Injeção de vapor*, aquecimento por radiofrequência*, vitrificação*	

INFORMAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS

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 oxidação/redução;
 - Características de qualidade;
- Características dos contaminantes:
 - Propriedades físico-químicas;
 - Biodegradabilidade.

RELEVÂNCIA DAS INFORMAÇÕES PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS

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 microbiológica:** pode influenciar a degradação/mobilidade dos contaminantes.

Tipos de Solo em Função dos seus Constituintes

Texturas do Solo

Propriedades controladas pela textura:

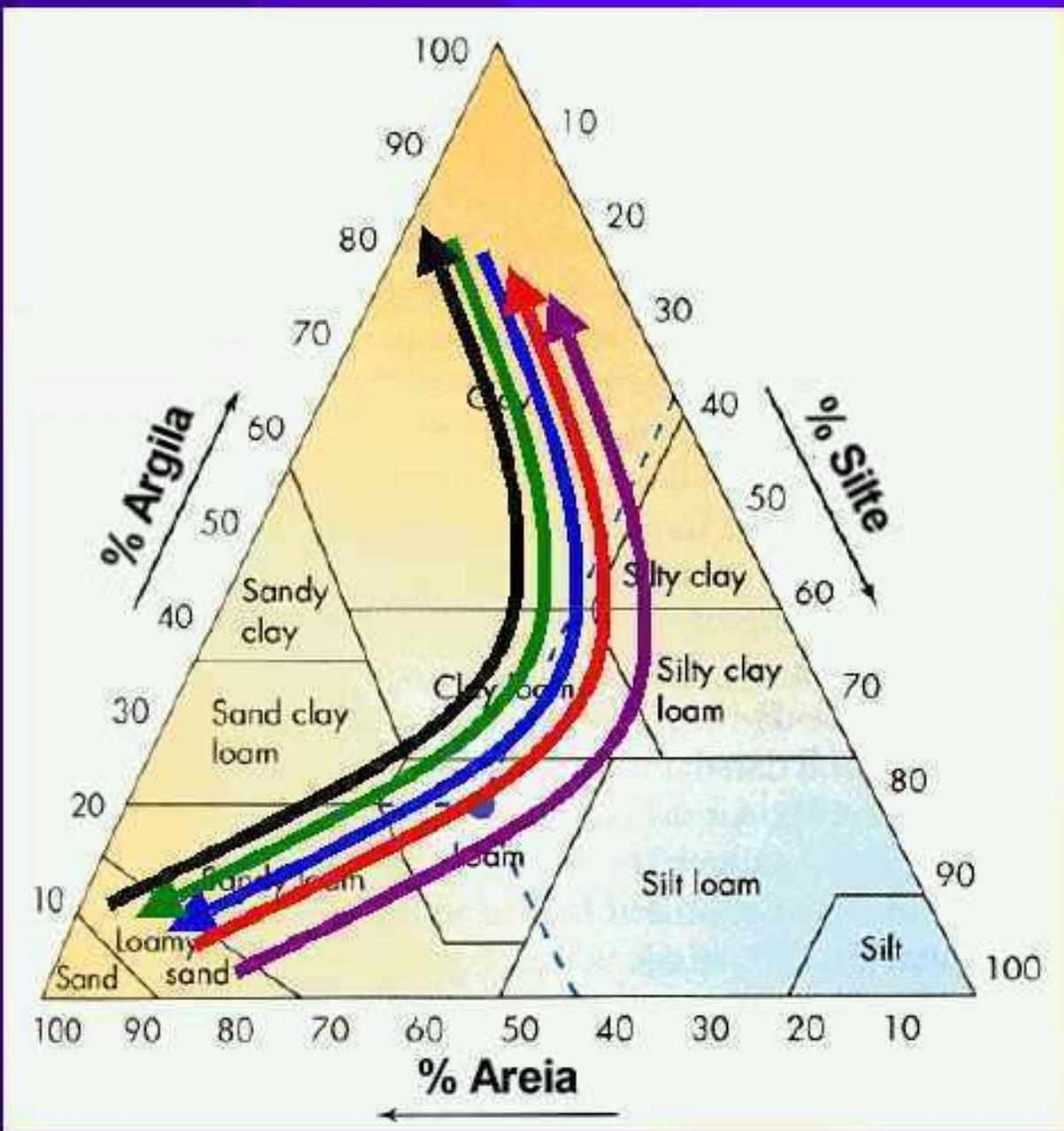
Taxa de Infiltração

Retenção de Água

Retenção de Nutrientes

Trabalhabilidade

Estabilidade



RELEVÂNCIA DAS INFORMAÇÕES PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS (AQUÍFERO)

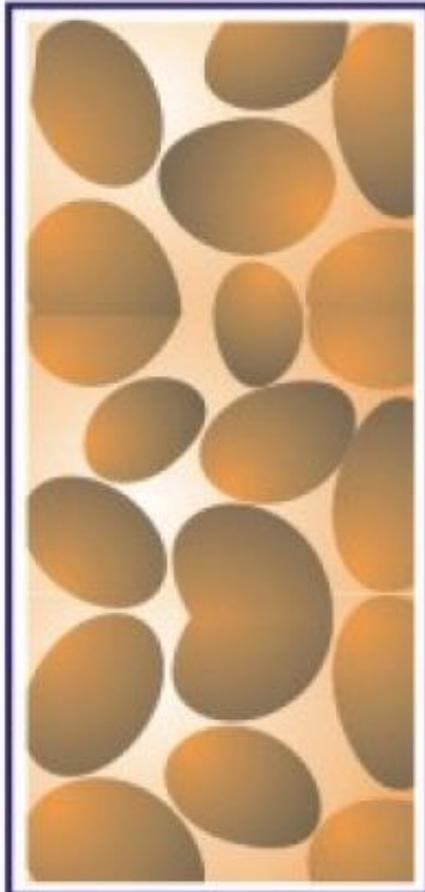
- Tipo de aquífero: afeta a mobilidade da água e dos contaminantes:
- Aquífero livre ou freático:
 - Maior vulnerabilidade aos processos de contaminação.
- Aquífero confinado ou artesiano:
 - Menor vulnerabilidade, porém a sua contaminação é um sério problema.



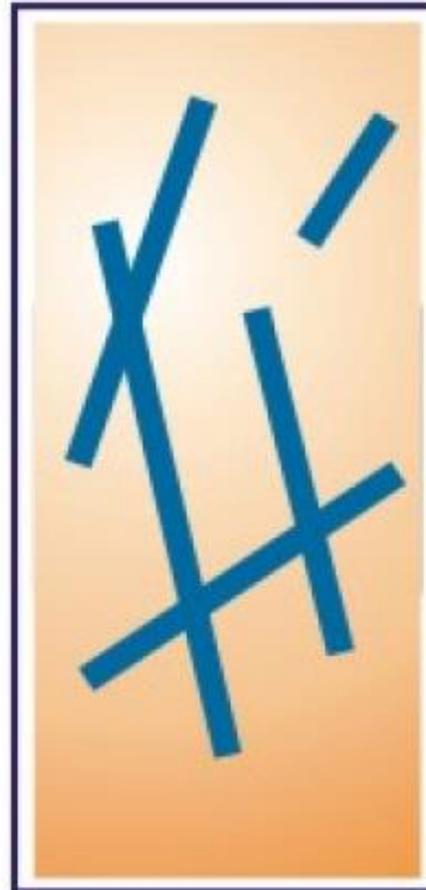
Tipos de aquíferos segundo a sua localização
(BORGHETTI et al, 2004 apud ABAS, 2006)

AQUÍFEROS DE ACORDO COM A GEOLOGIA DO MATERIAL SATURADO

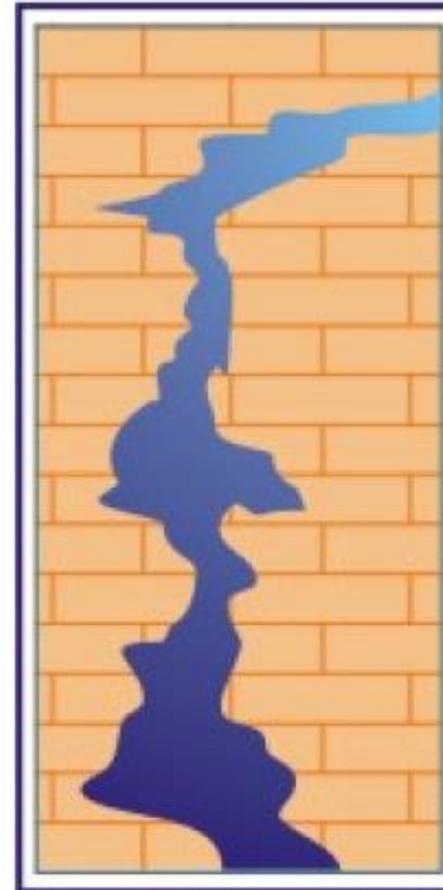
POROSO



FISSURAL



CÁRSTICO



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

RELEVÂNCIA DAS INFORMAÇÕES PARA A SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS

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

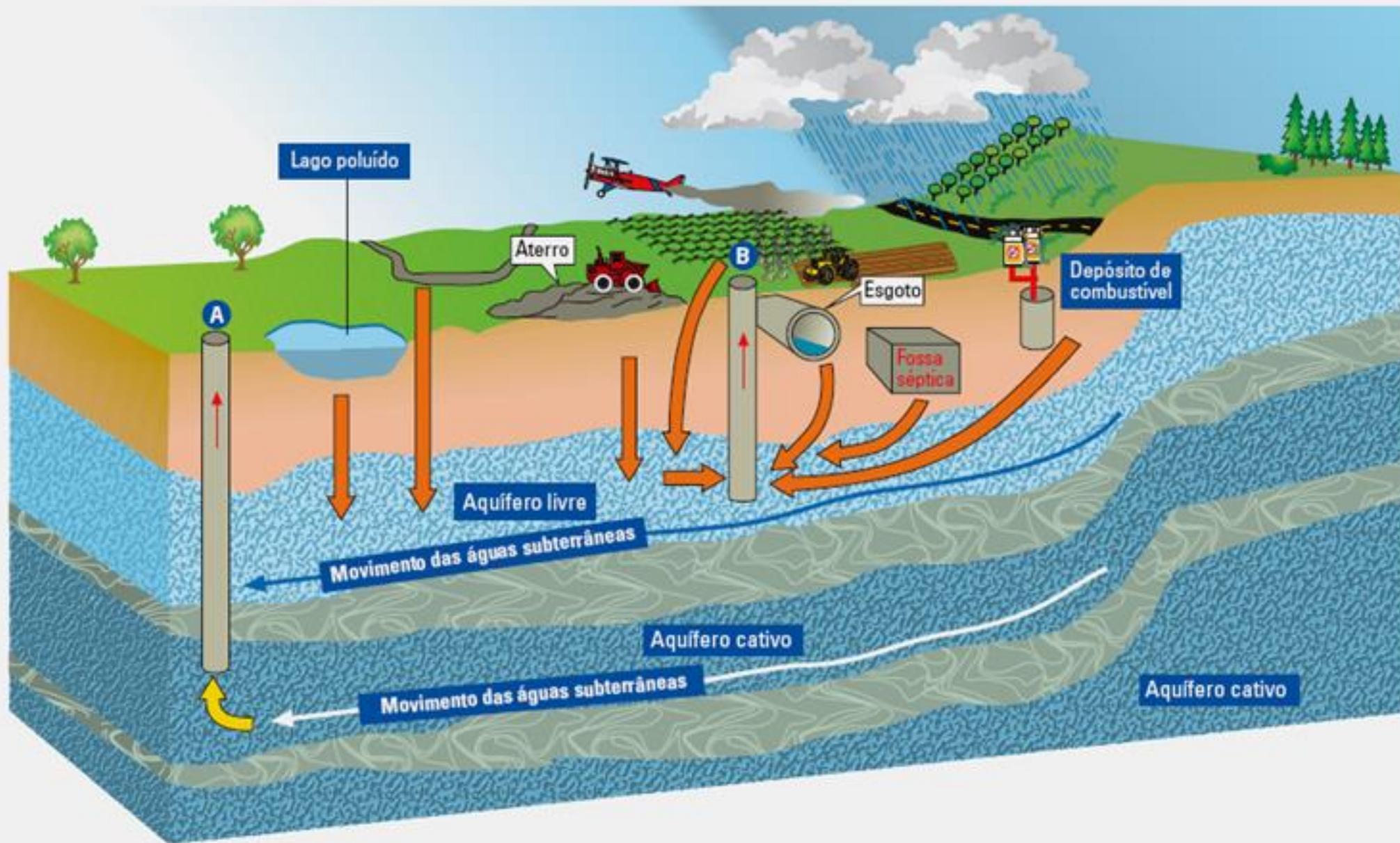
- **Propriedades físico-químicas:** capacidade de interação com o solo, água e contaminantes e sua distribuição entre as fases sólida, líquida e gasosa;
- **Biodegradabilidade:** capacidade de sofrer degradação por processos biológicos naturais.

EXEMPLOS DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS RELEVANTES

Orto-cresol		
Propriedade	Valor	Unidade
Massa molar	108	g/mol
Massa específica	1,046	g/cm ³
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 _A	10,29	--

CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

- 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/>)

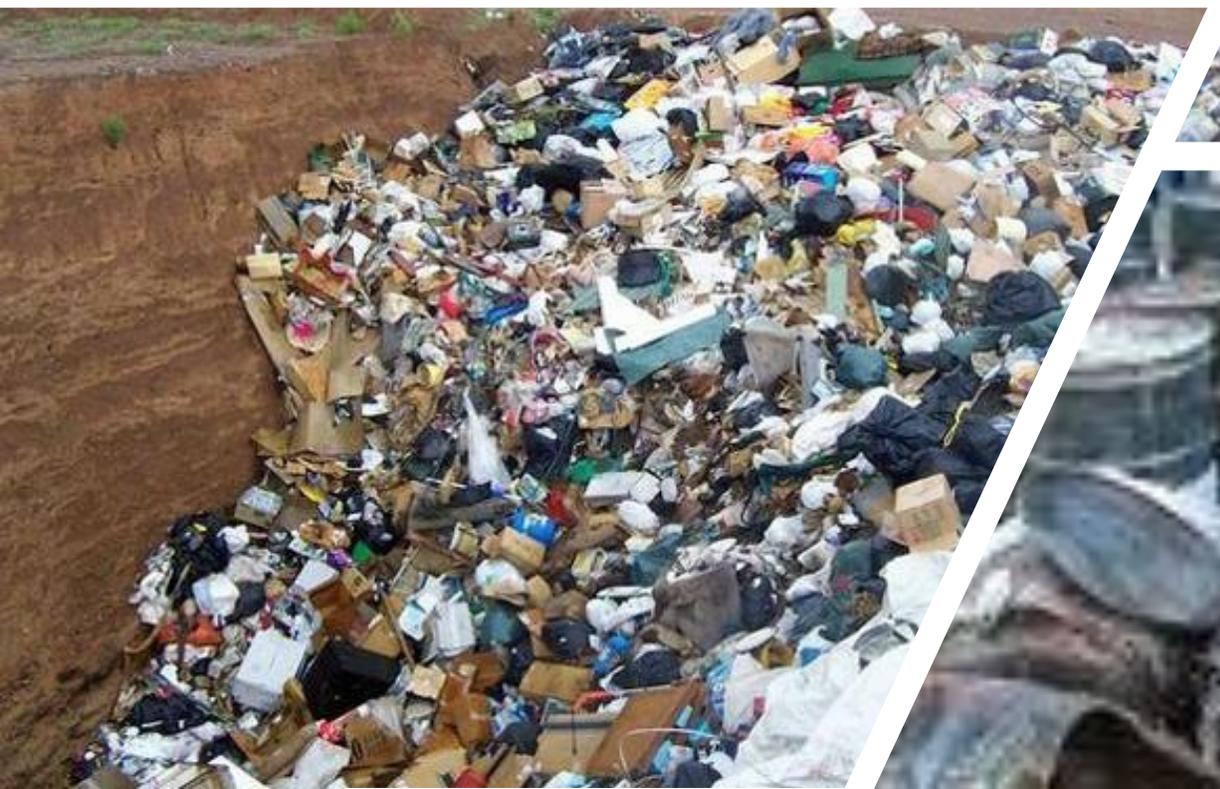




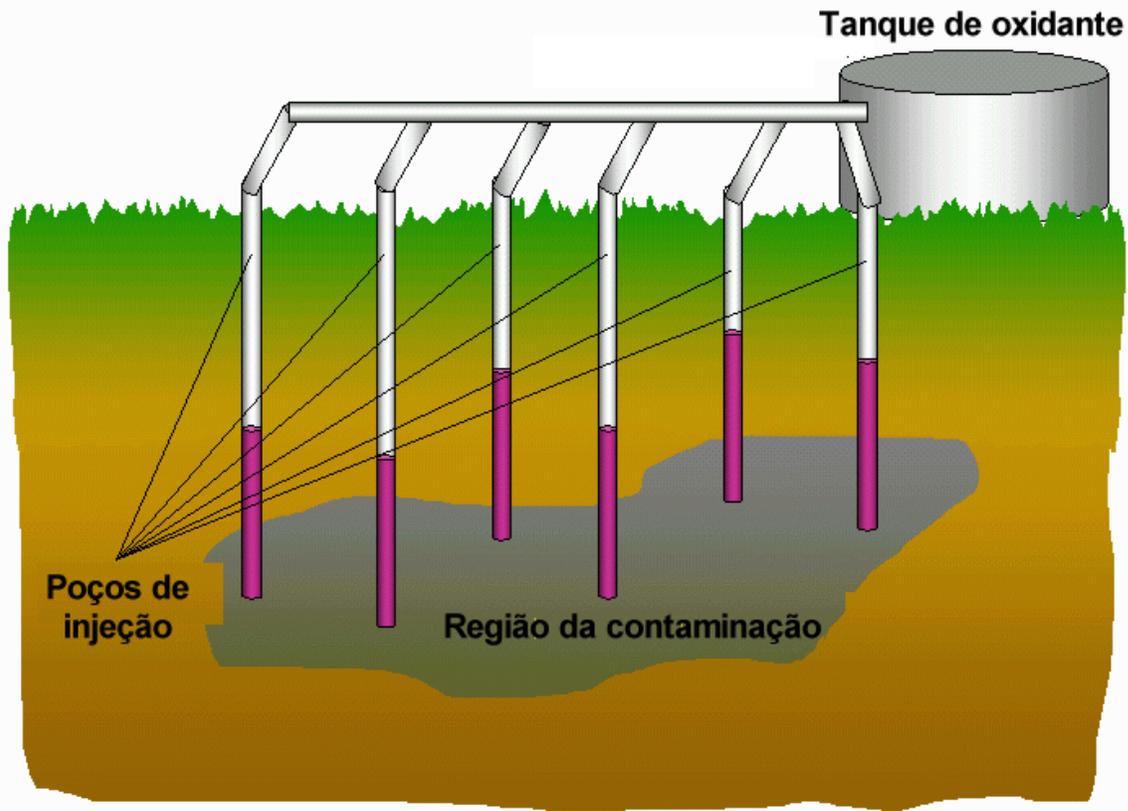
TABLE 3-2: TREATMENT TECHNOLOGIES SCREENING MATRIX

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									
Soil, Sediment, Bedrock, and Sludge																
3.2 In Situ Physical/Chemical Treatment																
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

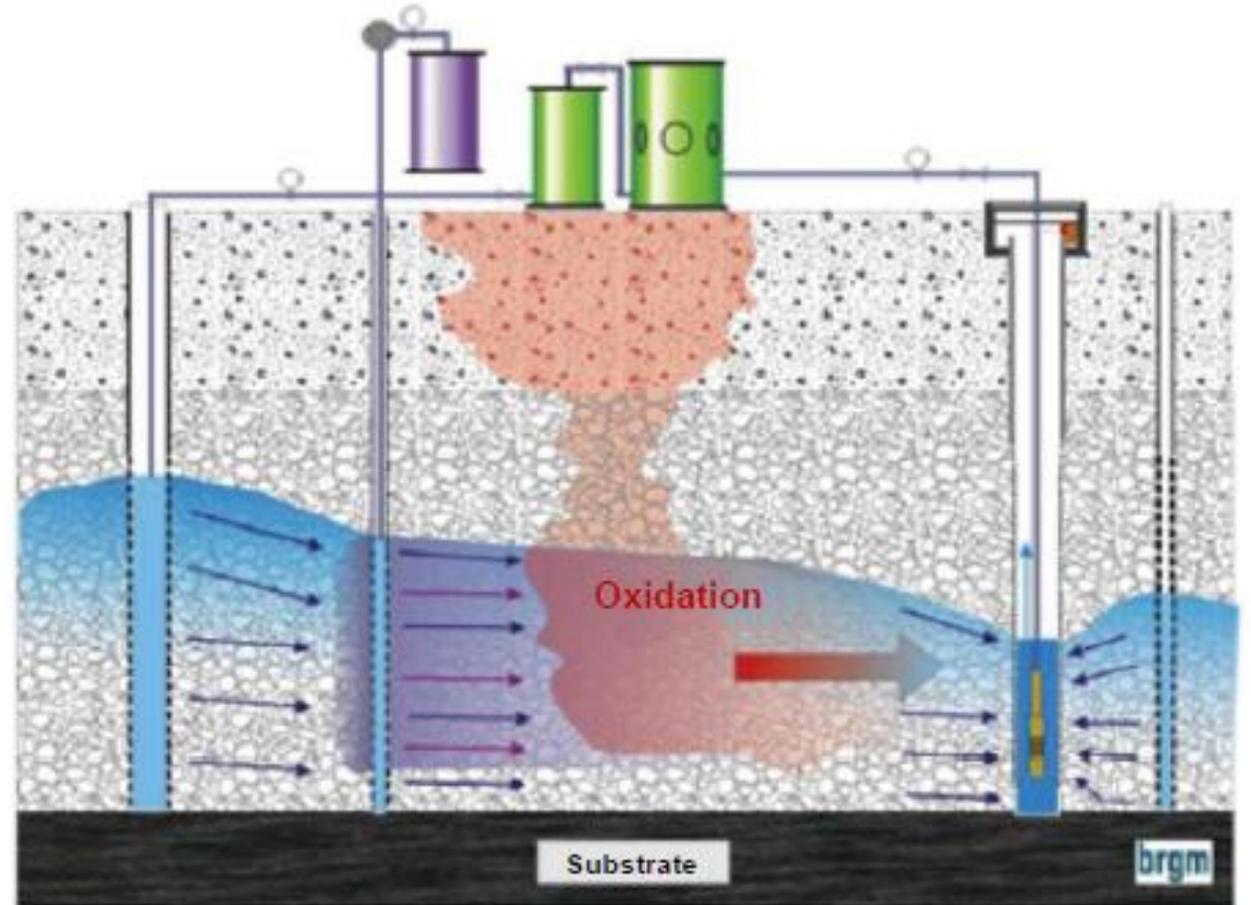
PROCESSO DE OXIDAÇÃO QUÍMICA

- 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.



Solo contaminado

Solo e água subterrânea contaminados



Representação do processo de oxidação química

COMO VERIFICAR A VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA DE OXIDAÇÃO QUÍMICA NO LOCAL

- Um aspecto relevante da oxidação química no local é determinar a eficiência do processo para as condições existentes no local;
- Que condições viabilizam a utilização do processo de oxidação de solos contaminados?
- Há a necessidade de obtenção da cinética de oxidação para que seja possível estimar o consumo do reagente e o tempo necessário para a realização do processo;
- Como obter a cinética de oxidação?
- O que deve ser considerado quando da avaliação do potencial de utilização do processo?

CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE OXIDAÇÃO QUÍMICA PARA SOLOS / ÁGUA SUBTERRÂNEA CONTAMINADOS

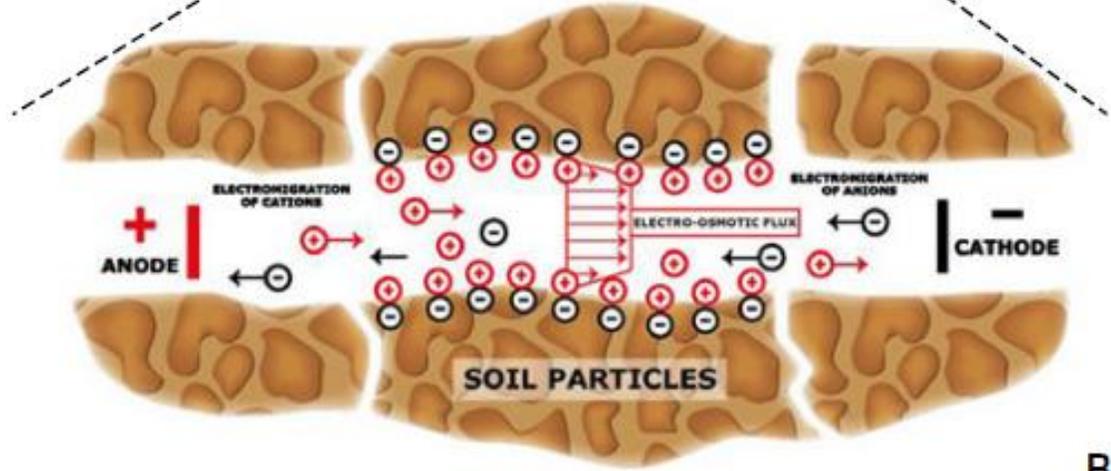
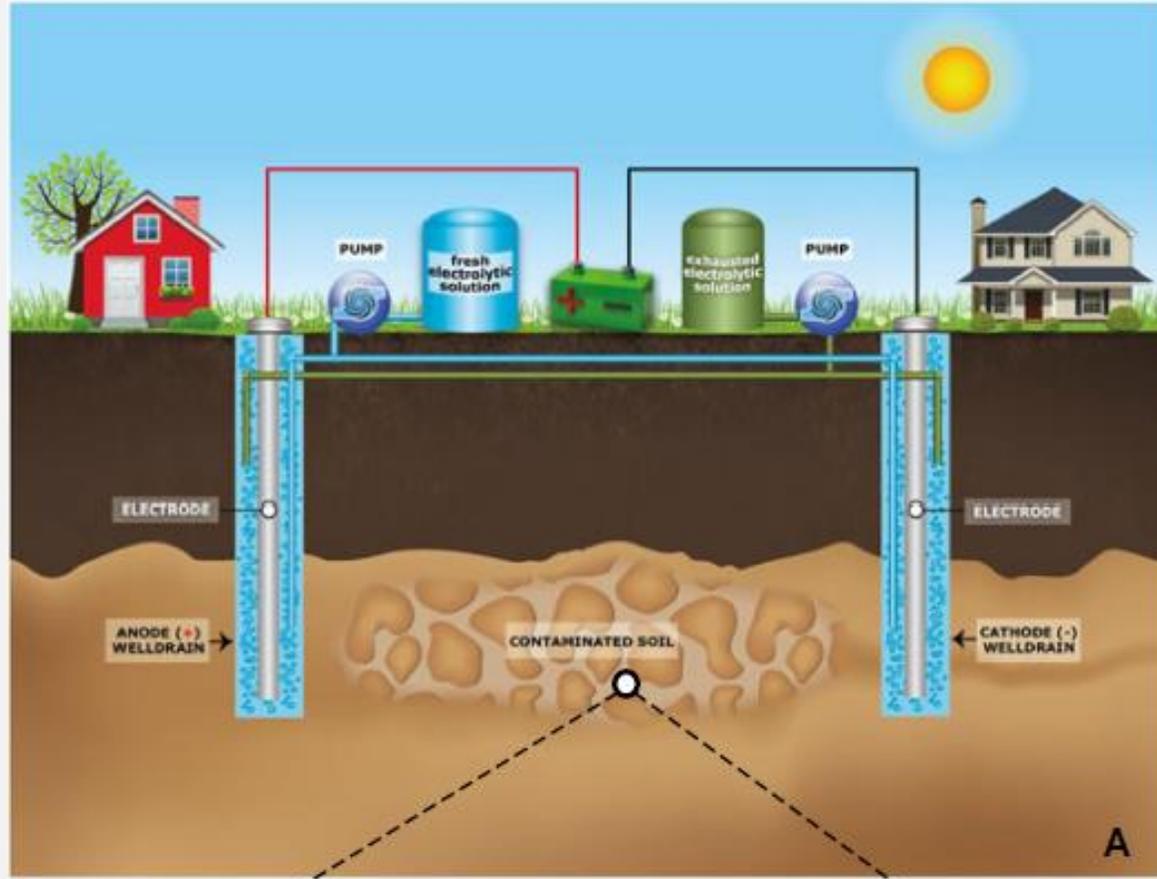
- Processo não seletivo;
- Restrição para aplicação em solos com baixa permeabilidade, caso não seja possível promover uma mistura efetiva com a matriz contaminada;
- Possibilidade de geração de subprodutos tóxicos;
- Restrições de aplicação caso a concentração de matéria orgânica seja elevada;
- Não se aplica a contaminantes inorgânicos ou orgânicos recalcitrantes;
- Processo relativamente rápido;
- Quando aplicado de forma adequada destrói o contaminante, evitando a necessidade de tratamento complementar ou disposição final.

SEPARAÇÃO ELETROCINÉTICA

- 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 oxidação e 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

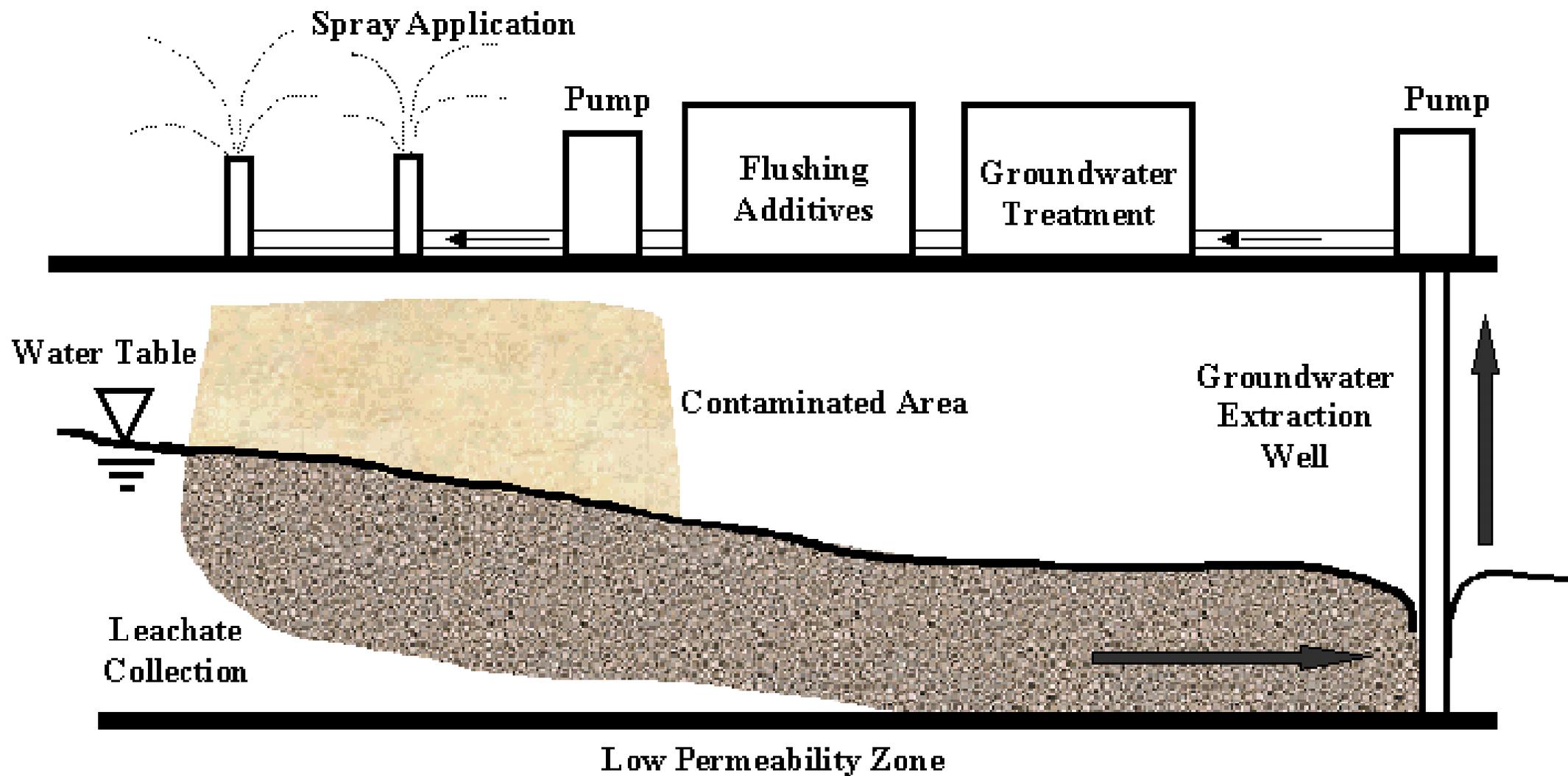
<https://www.youtube.com/watch?v=LTRGBI6kQFA>



B

LAVAGEM DO SOLO/LIXIVIAÇÃO

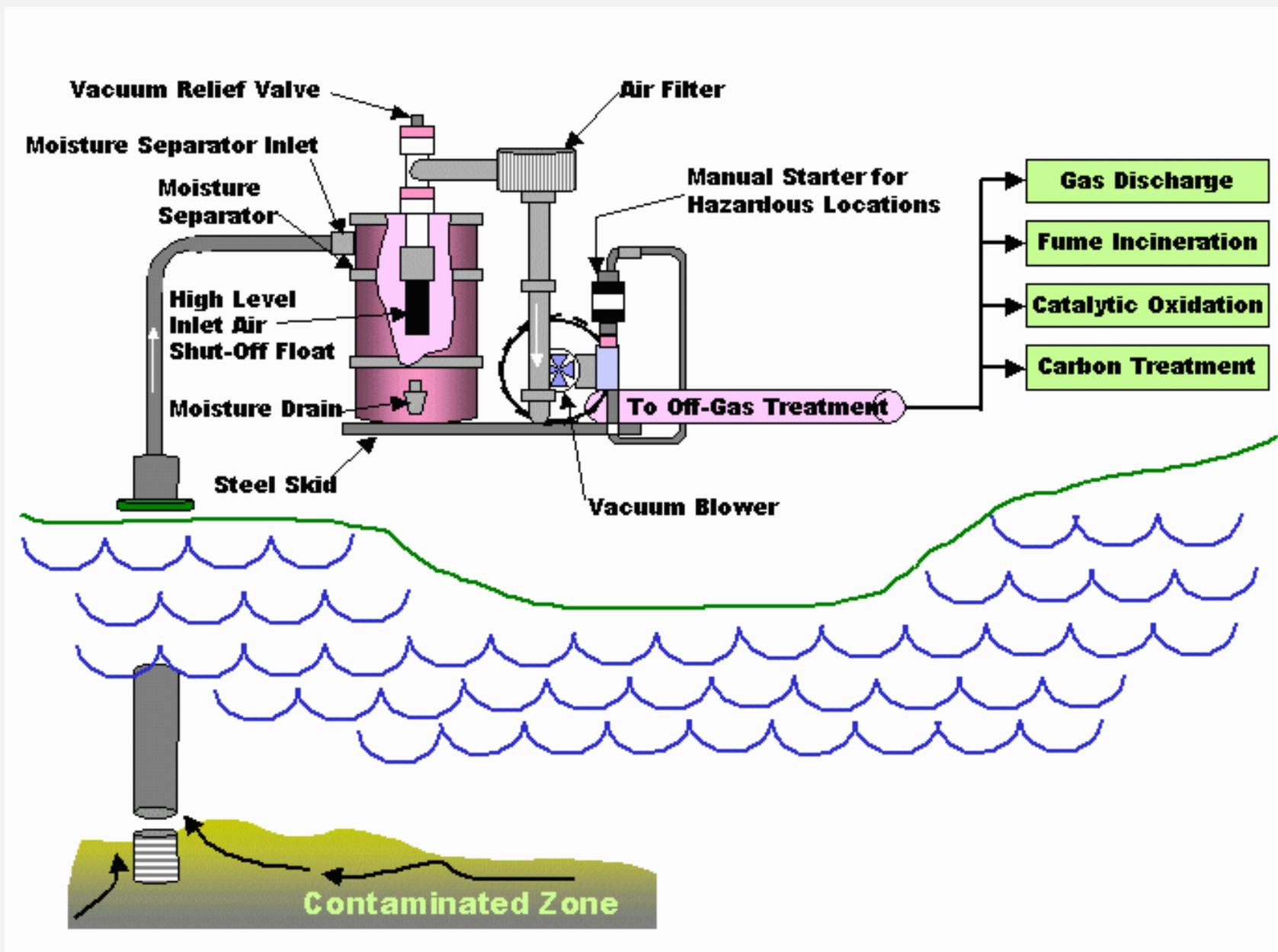
- Utilização de uma mistura de solventes (água e um solvente miscível como etanol), para a extração de solventes orgânicos;
- Também pode ser utilizado para a remoção de contaminantes inorgânicos, quando se utiliza um agente complexante e água;
- Considerações sobre o processo:
 - A permeabilidade do 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

EXTRAÇÃO COM VAPOR OU AR

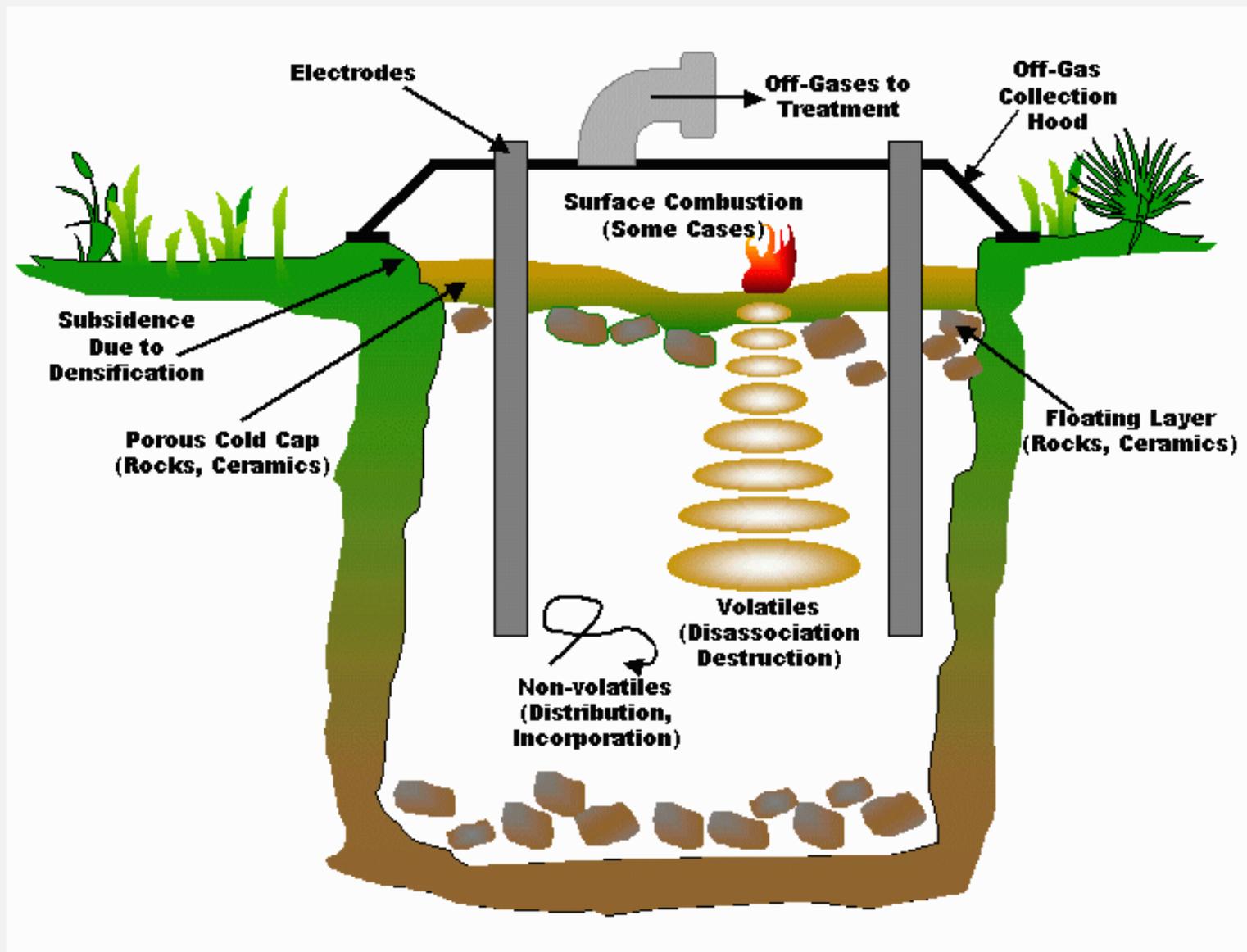
- Aplicado para solos contaminados com compostos orgânicos voláteis e semivoláteis;
- Quanto maior a pressão de vapor do contaminante maior é o potencial de aplicação deste processo;
- A utilização de ar por melhorar as características de biodegradabilidade do solo;
- Considerações sobre o processo:
 - 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.



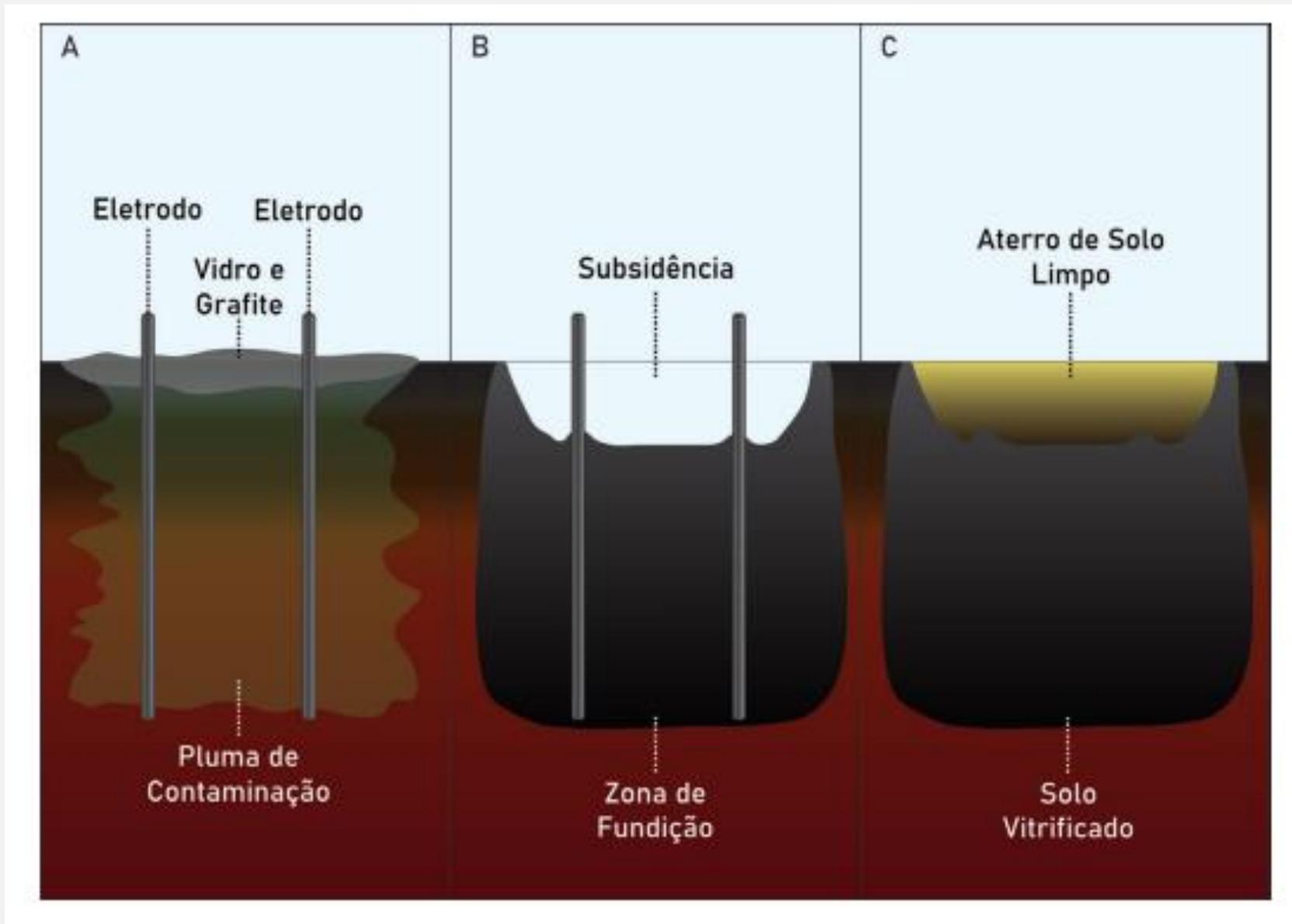
Representação esquemática do processo de extração com ar

SOLIDIFICAÇÃO / ESTABILIZAÇÃO

- 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



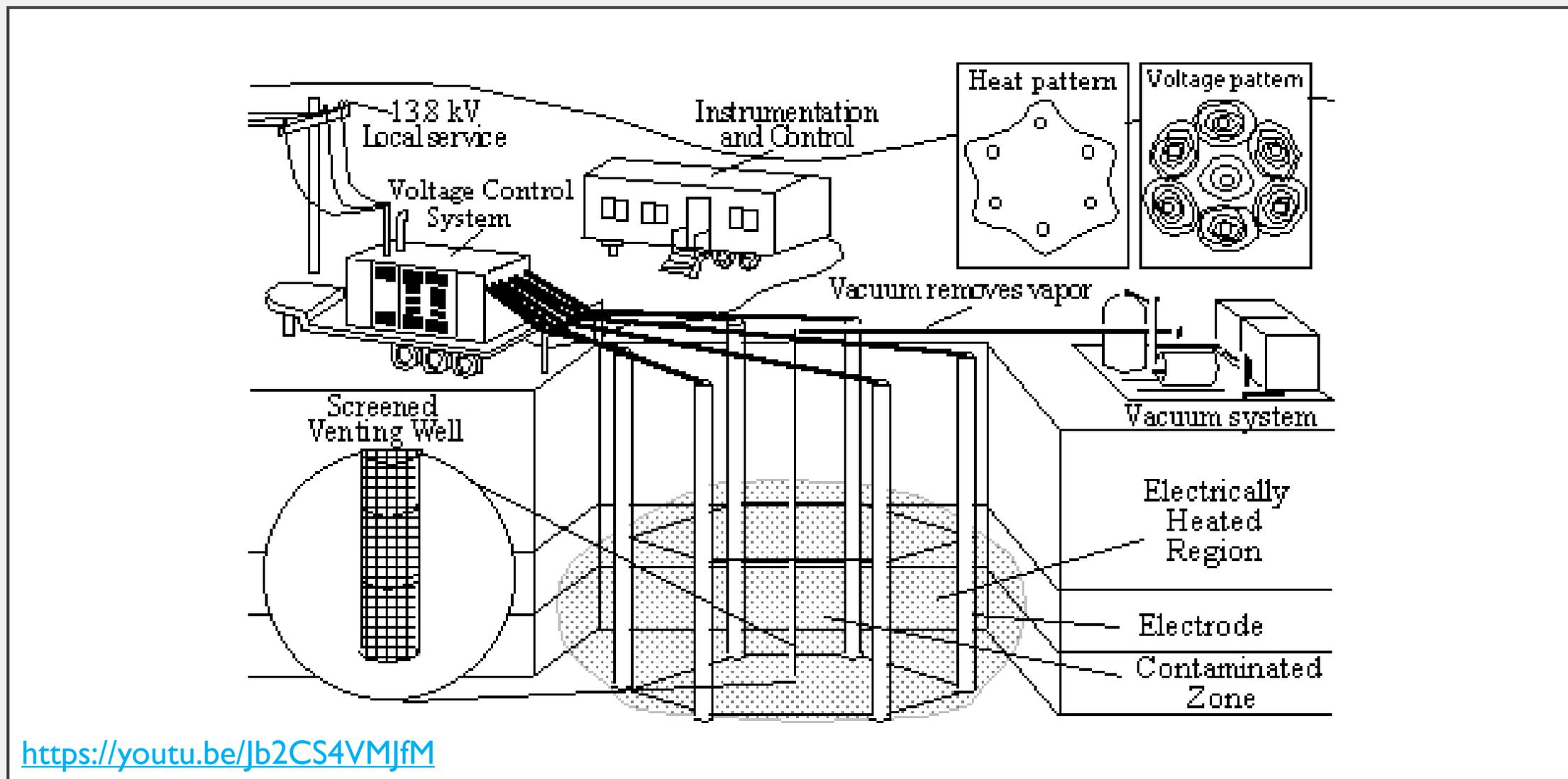
Exemplo do processo de vitrificação no local

TRATAMENTO TÉRMICO NO LOCAL

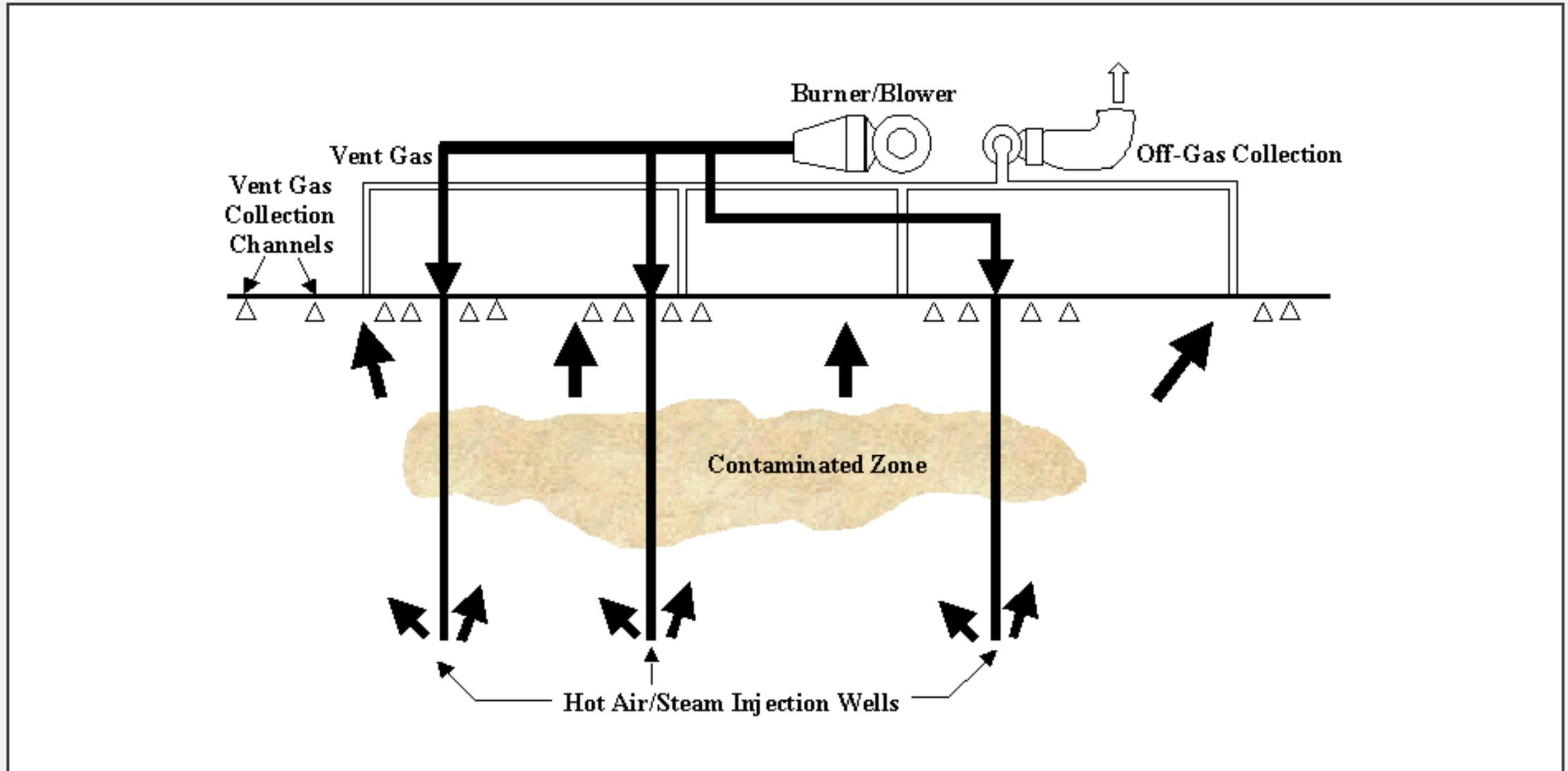
- Consiste no aquecimento do solo na região de ocorrência da contaminação para vaporização e extração do contaminante;
- O aquecimento pode ser feito por resistência elétrica, rádio frequência ou injeção de ar quente ou vapor;
- É necessária a extração dos vapores gerados por meio de aplicação de vácuo;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

TRATAMENTO TÉRMICO NO LOCAL

- 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.

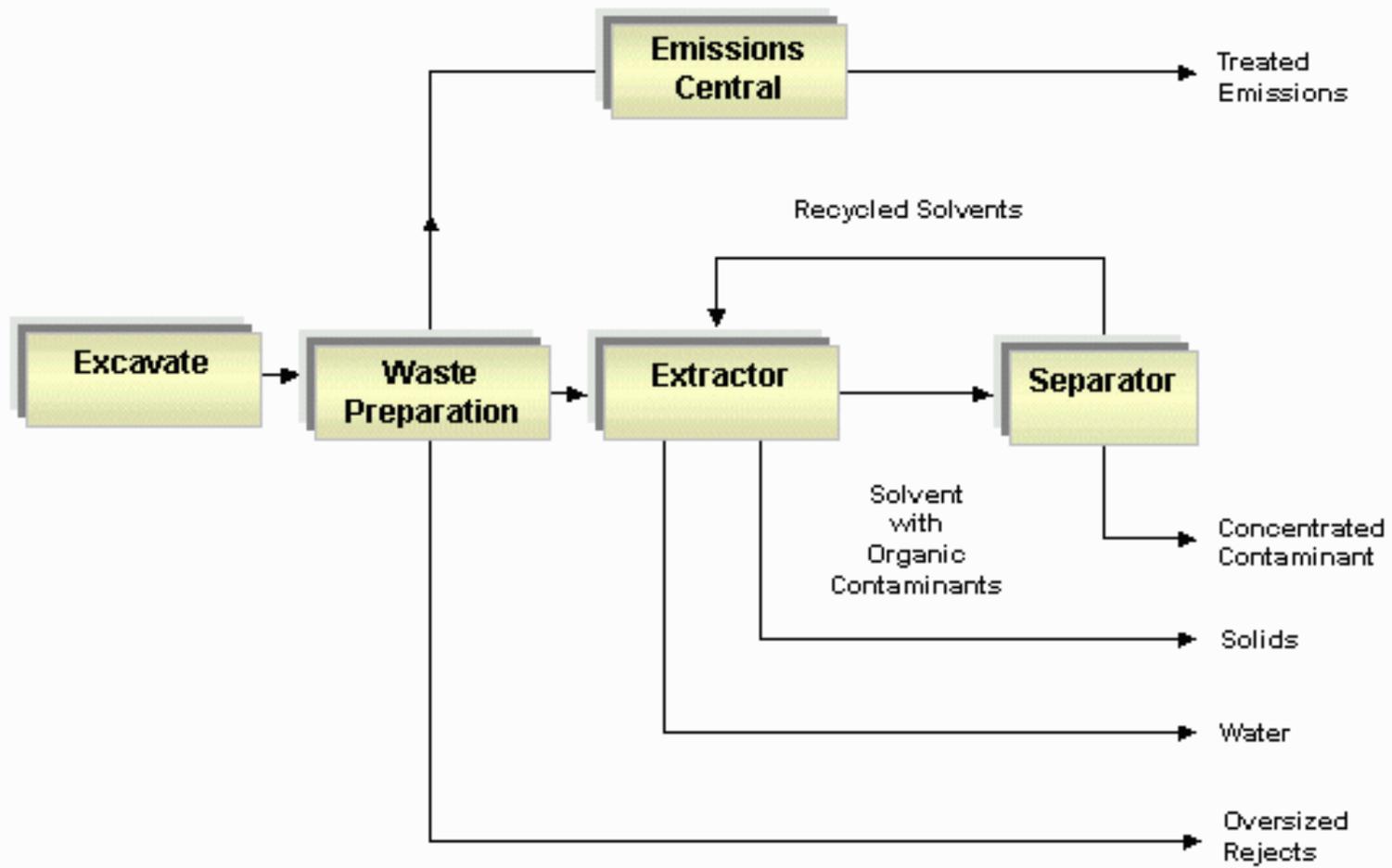


Exemplo do processo de aquecimento por resistência elétrica e extração à vácuo



Exemplo do processo de extração com ar quente/vapor

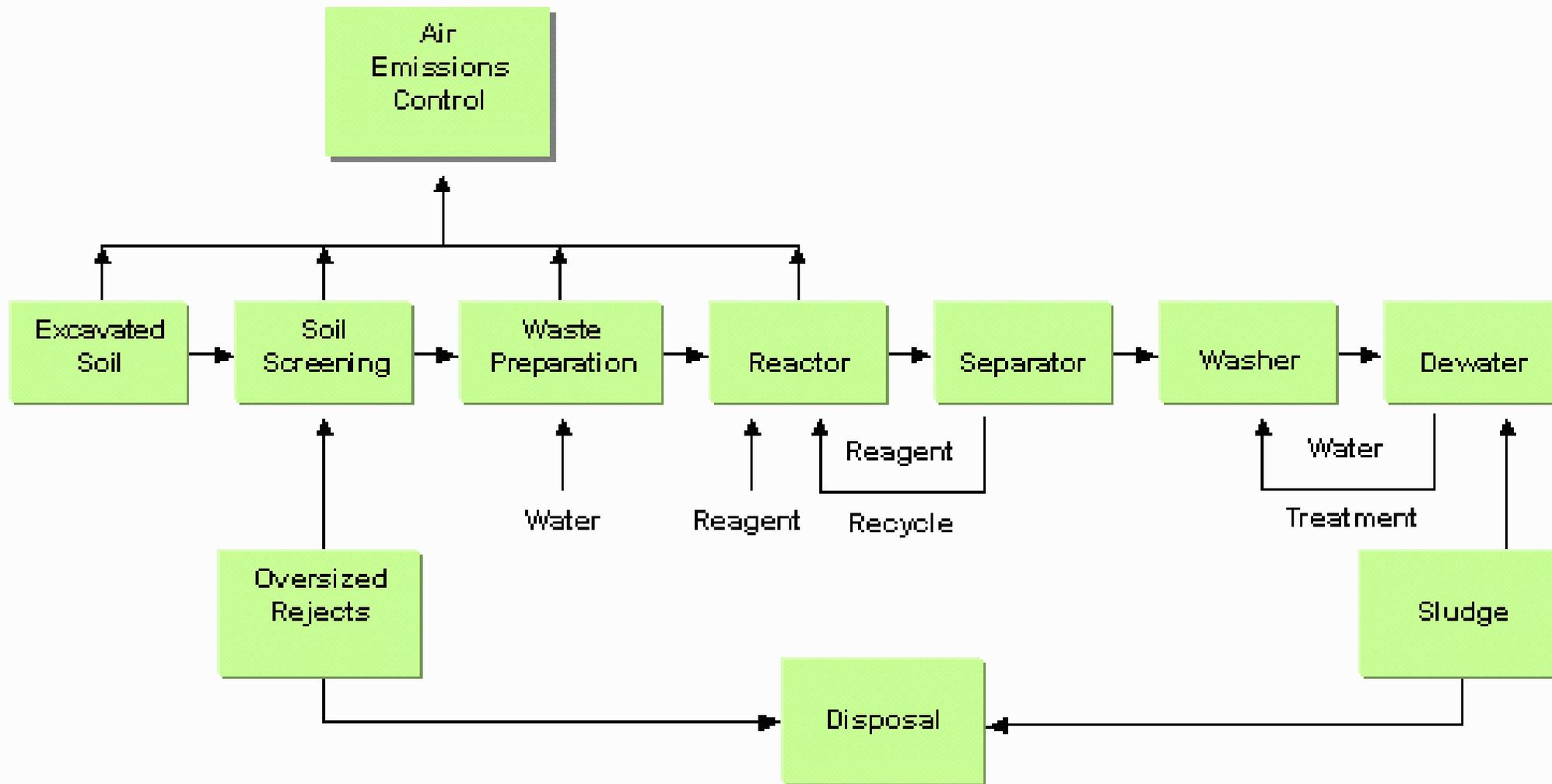
Processo de Extração Química



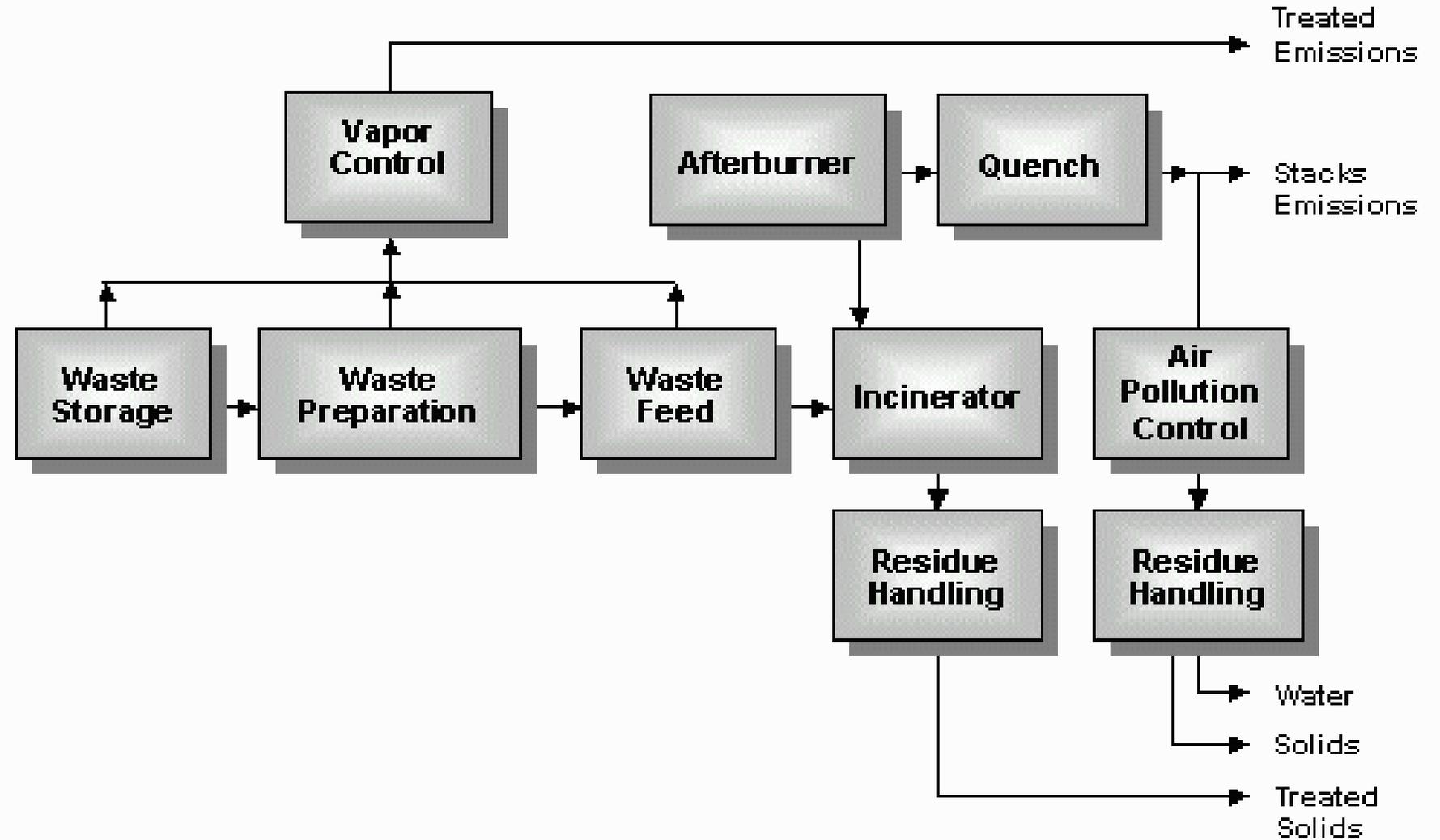
EXTRAÇÃO QUÍMICA

- 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



TÉCNICAS PARA REMEDIAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, SUPERFICIAIS E LIXIVIADOS

- 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.

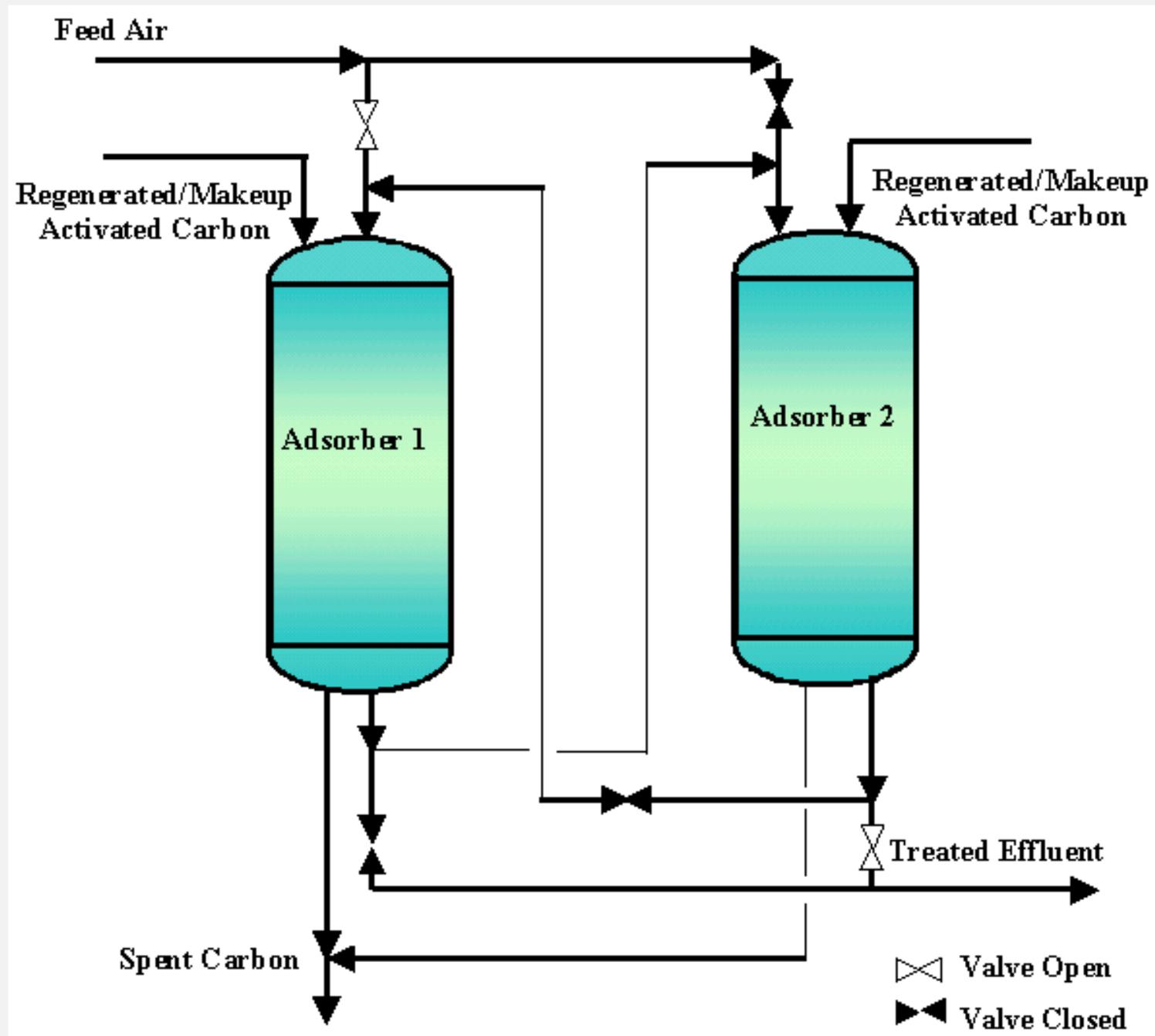
TRATAMENTO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS OU GASES DE EXAUSTÃO

- 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	Radio nuclides	Explosives
			O&M	Capital	System Reliability & Maintainability	Relative Costs	Time									
3.14 Air Emissions/Off-Gas Treatment																
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
4.59 Vapor Phase Carbon Adsorption	●	N/A	●	●	●	●	I/D	●	●	●	●	●	●	○	I/D	●

Adsorção em carvão ativado da fase vapor



OBSERVAÇÕES GERAIS SOBRE AS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

- 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.

ATIVIDADE 2

CARACTERÍSTICAS CONTAMINANTES