

# PHA 3523 – TECNOLOGIAS DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS

## Aula 1 – Apresentação e conceitos

Prof. José Carlos Mierzwa  
([mierzwa@usp.br](mailto:mierzwa@usp.br))



# Referências

- FIESP/CIESP – Áreas contaminadas: Informações básicas. Novembro de 2014 (<https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/cartilha-areas-contaminadas-2014/attachment/areas-contaminadas-informacoes-basicas/>);
- CETESB – Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. CETESB. GTZ. 2ª Edição. 2001 (<http://200.144.0.248/DOWNLOAD/CERTIFICADOS/AC2019/Manual%20Cetesb%20Completo.pdf>);
- IPT – Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas. 1ª Edição revisada. Org. Sandra Lúcia de Moraes; Cláudia Echevengua Teixeira; Alexandre Magno de Souza Maximiano. São Paulo, 2014 ([https://www.ipt.br/download.php?filename=1159-Guia\\_Gerenciamento\\_de\\_Areas\\_Contaminadas\\_1a\\_edicao\\_revisada.pdf](https://www.ipt.br/download.php?filename=1159-Guia_Gerenciamento_de_Areas_Contaminadas_1a_edicao_revisada.pdf));
- EPA – Cleaning up the nation's waste sites. Markets and technology trends. EPA 542-R-04-015. September 2004 (<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30006II3.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000008%5C30006II3.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>)

# Definição

- Área contaminada:
  - área, terreno, local, instalação, edificação ou benfeitoria que contenha quantidades ou concentrações de matéria em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger.

# Legislação aplicável

- Lei Estadual nº 13.577, de 08 de julho de 2009:
  - Dispõe sobre diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e gerenciamento de áreas contaminadas e dá outras providências correlatas;
- Decreto Estadual nº 59.263, de 05 de junho de 2013:
  - Regulamenta a Lei nº 13.577.

## **Implicações da existência de AC**

- Comprometem a qualidade do solo e da água subterrânea;
- Pode resultar na emissão de poluentes para atmosfera ou ambiente construído;
- A contaminação pode se propagar para outras regiões e contaminar corpos hídricos superficiais;
- O cultivo de determinadas espécies no local pode resultar no acúmulo de poluentes e contaminação dos consumidores.

## **Causas da contaminação do solo**

- Disposição de resíduos no solo sem a devida proteção;
- Tanques de armazenagem subterrâneos ou superficiais, sem bacias de contenção;
- Aplicação de insumos e outros defensivos agrícolas;
- Pilhas de minério, rejeitos e outros materiais;

# **Causas da contaminação do solo**

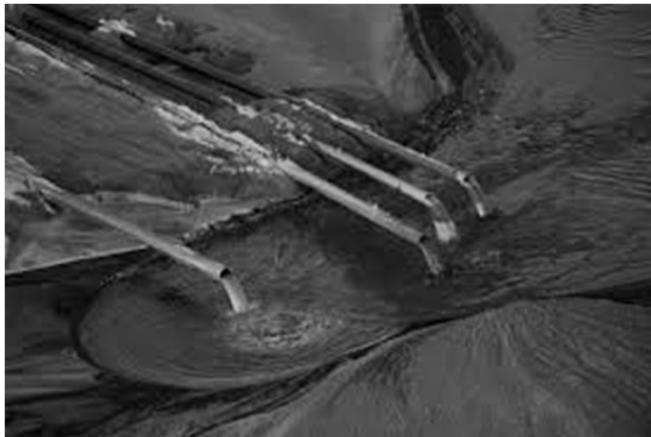
- Barragem de rejeitos de áreas de mineração;
- Áreas industriais em geral;
- Vazamentos de tubulações subterrâneas, oleodutos, rede de esgoto, etc.;
- Drenagem de superficial de áreas industriais;
- Universidades e Centros de Pesquisa;
- Etc...



Fonte: Saniplan Engenharia e Serviços Ambientais  
([www.saniplancom.br](http://www.saniplancom.br))



<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/ribeirao/ri1105201001.htm>



<http://teachingsofmerlin.wordpress.com/tag/mine-tailings/>



<http://illinois.edu/blog/view/789/52217?displayType=month&displayMonth=201104>

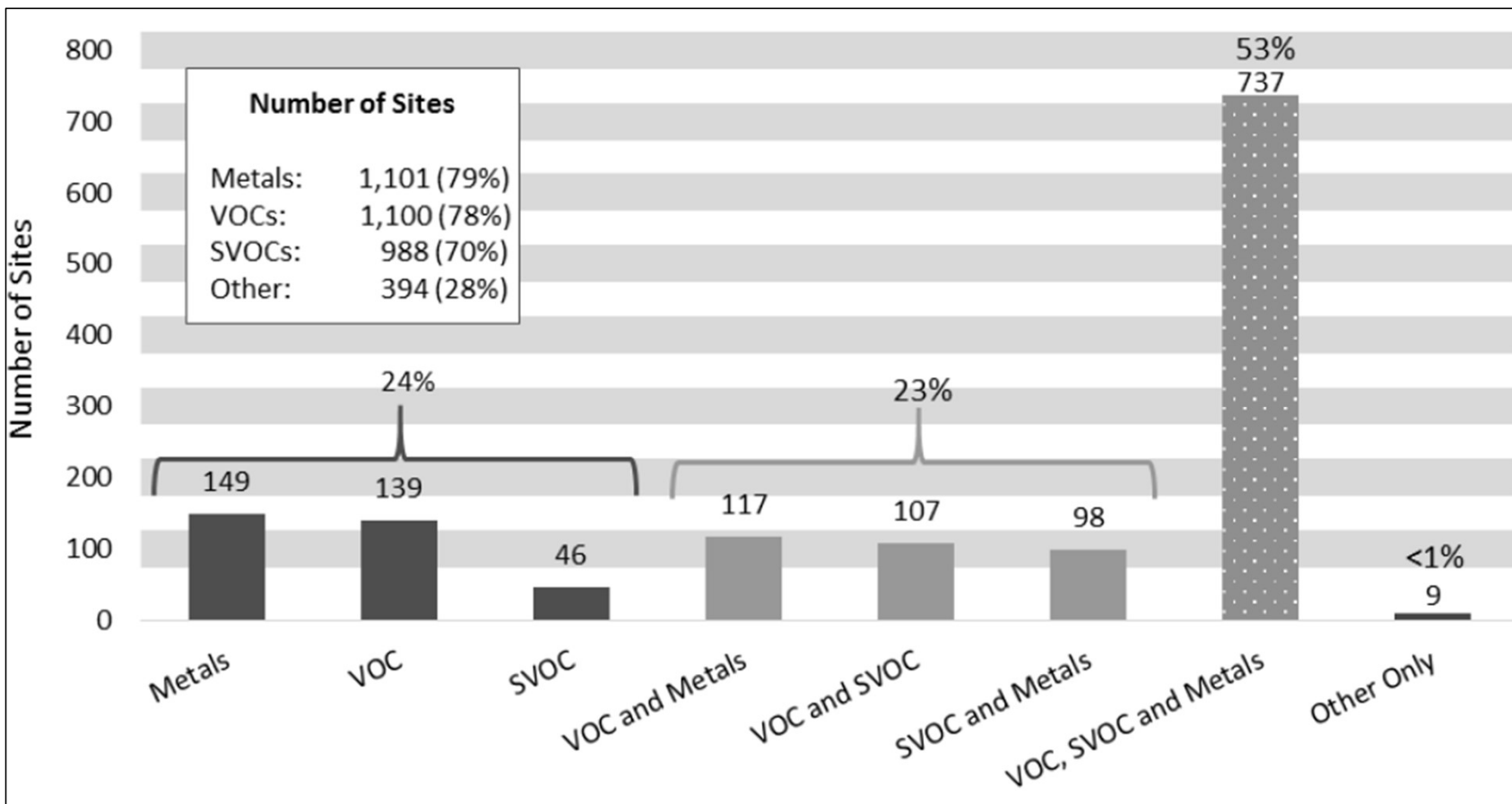


# Principais contaminantes

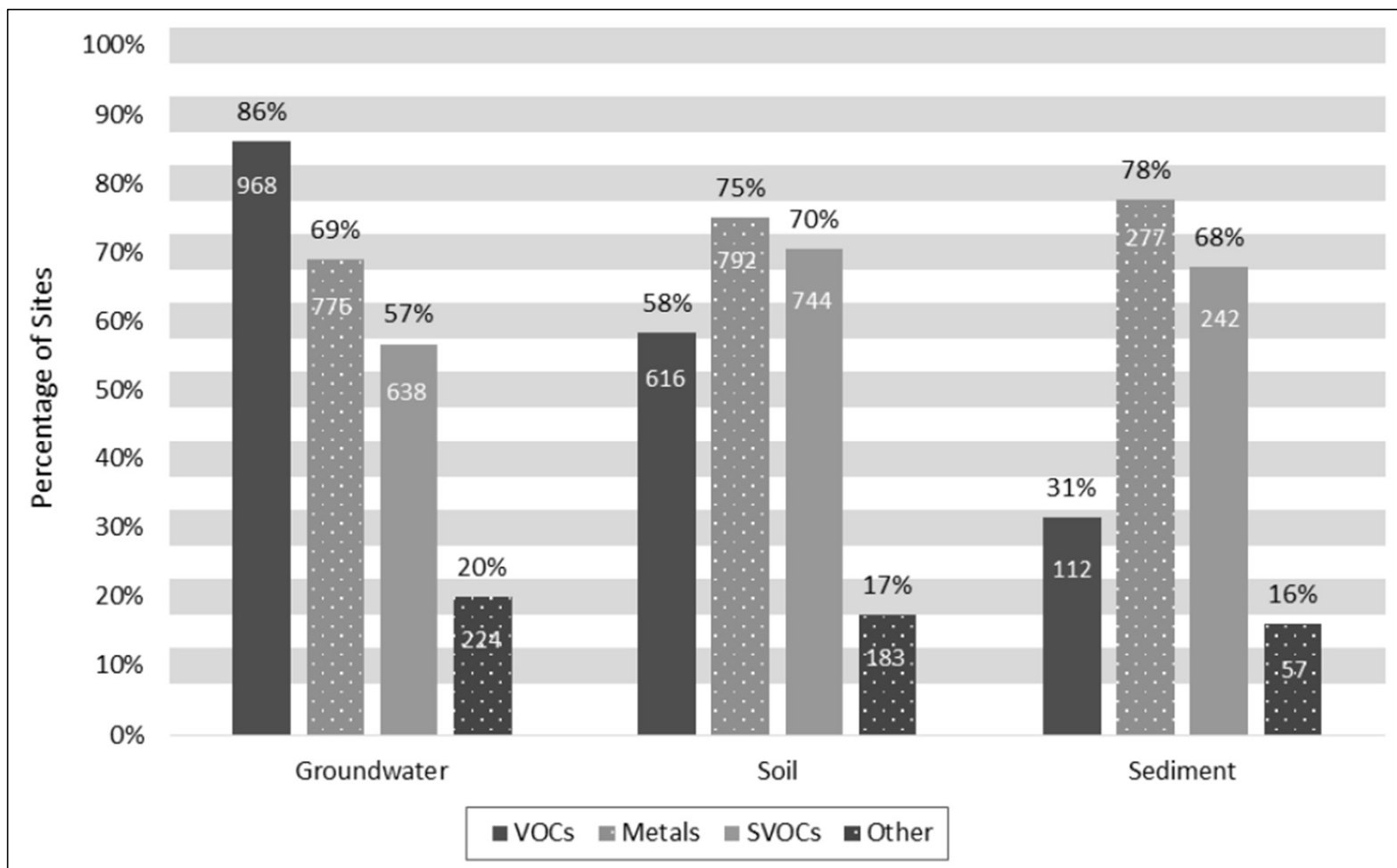
- Solventes orgânicos, combustíveis e óleos lubrificantes;
  - Lavanderias à seco, postos de combustível, refinarias de petróleo, indústrias diversas, usinas termelétricas, etc...
- Os solventes orgânicos podem ser classificados, do ponto de vista de áreas contaminadas, de acordo com a sua densidade:
  - Fase líquida não aquosa densa (DNAPL, do inglês);
  - Fase líquida não aquosa leve (LNAPL, do inglês).

## Principais contaminantes (cont.)

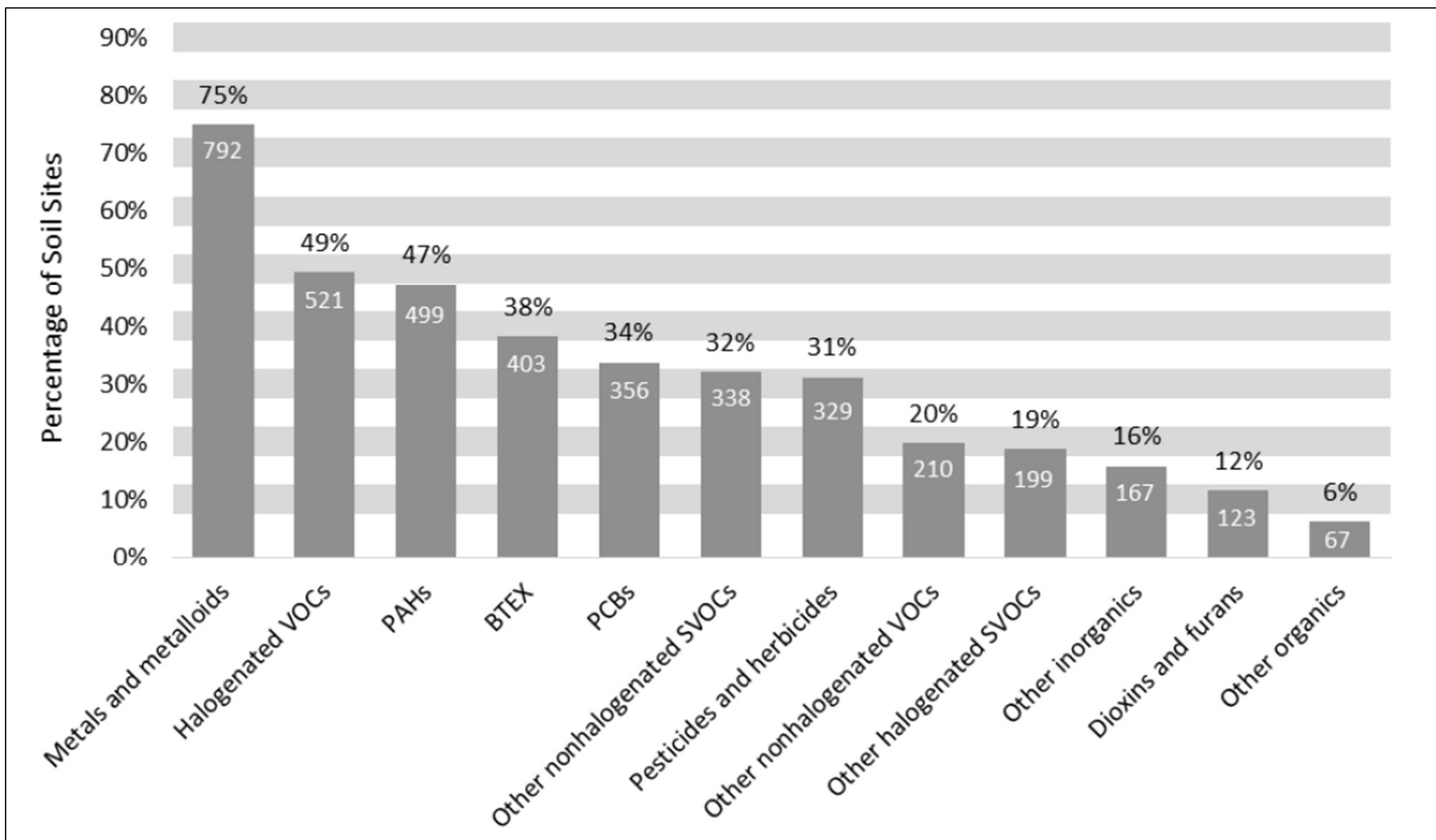
- Além da classificação em relação à densidade, ainda podem ser encontradas as seguintes classificações:
  - Compostos orgânicos voláteis;
  - Compostos orgânicos semivoláteis;
  - Compostos orgânicos halogenados;
  - BTEX – Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno);
  - Hidrocarbonetos de Petróleo Totais (TPH do inglês).
- Contaminantes inorgânicos:
  - Principalmente metais pesados.



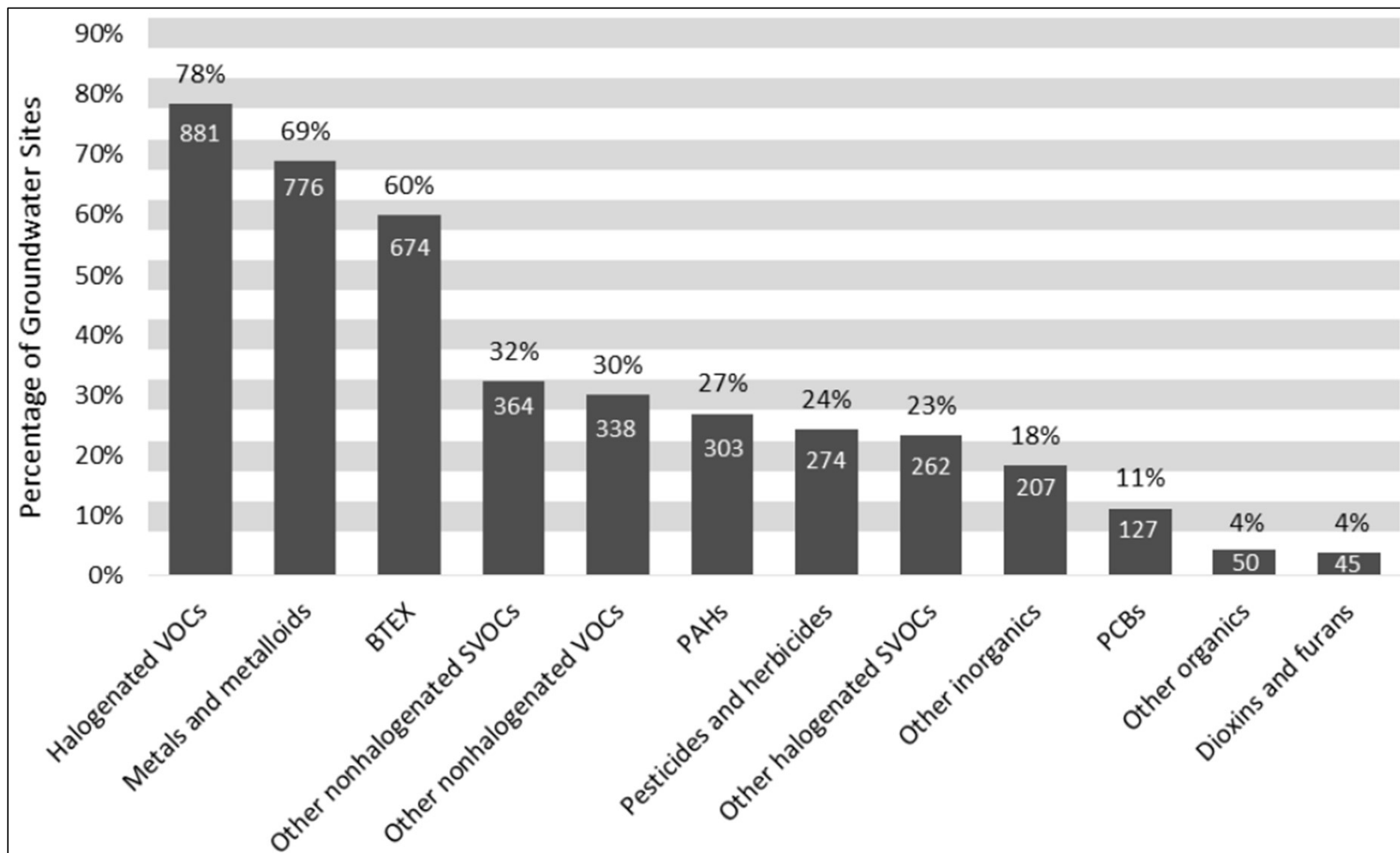
Frequência dos principais grupos de contaminantes na lista prioritária de áreas contaminadas nos EUA (EPA 542-R-17-001, 2017)



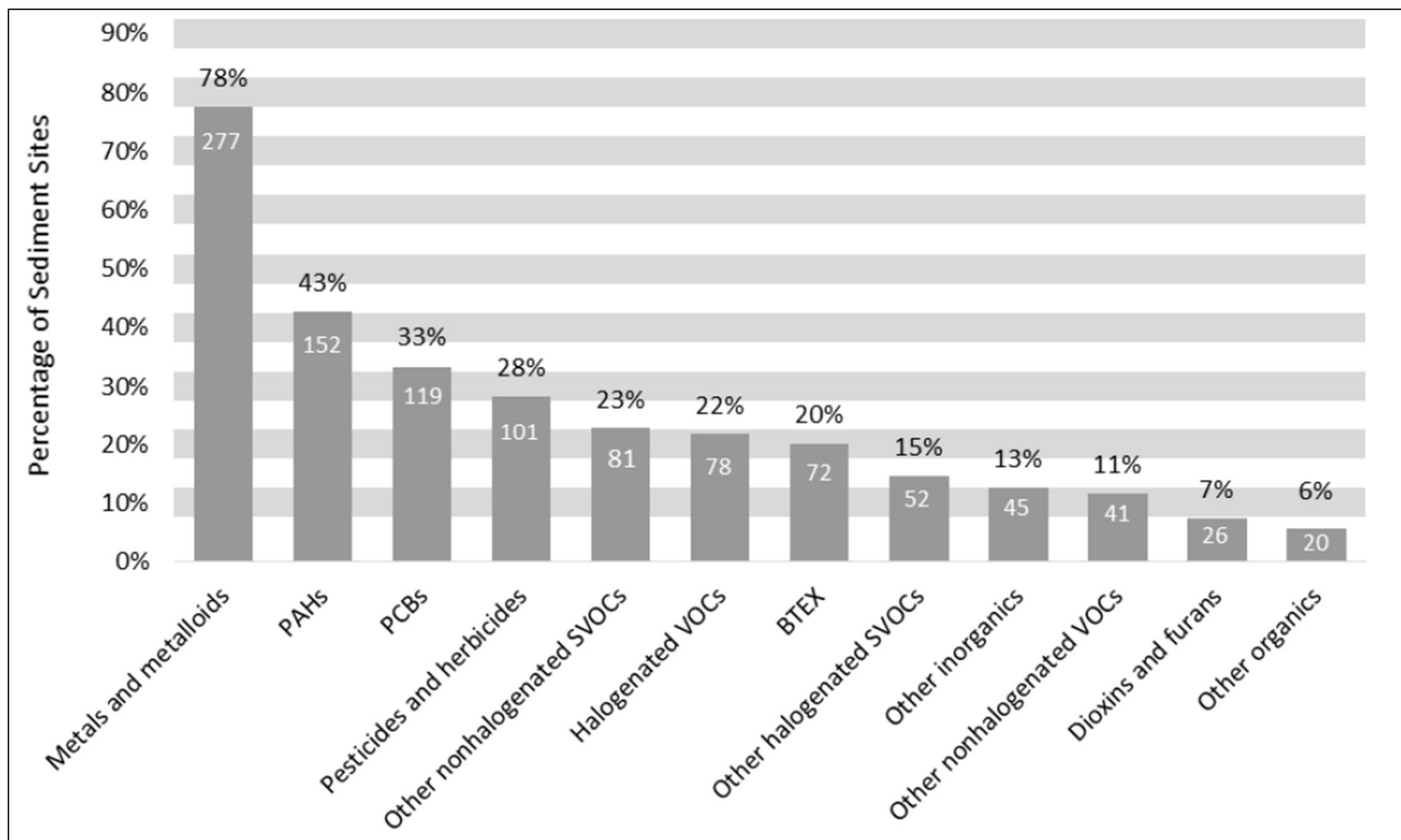
**Distribuição dos contaminantes de interesse em função do meio onde estão presentes nos EUA (EPA 542-R-17-001, 2017)**



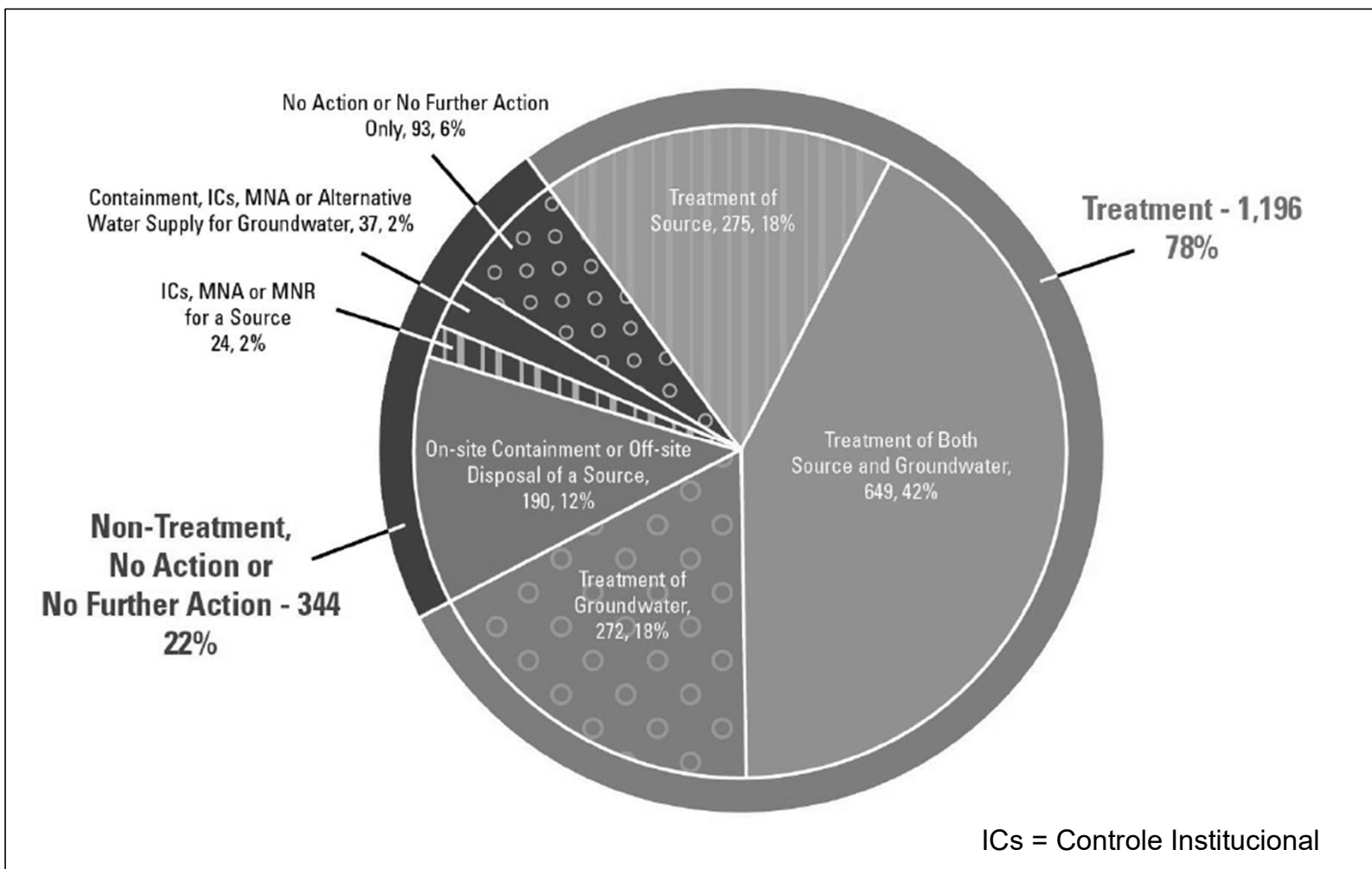
**Distribuição dos contaminantes de interesse presentes no solo (EPA 542-R-17-001, 2017)**



**Distribuição dos contaminantes de interesse presentes na água subterrânea  
(EPA 542-R-17-001, 2017)**



**Distribuição dos contaminantes de interesse presentes em sedimentos**  
(EPA 542-R-17-001, 2017)



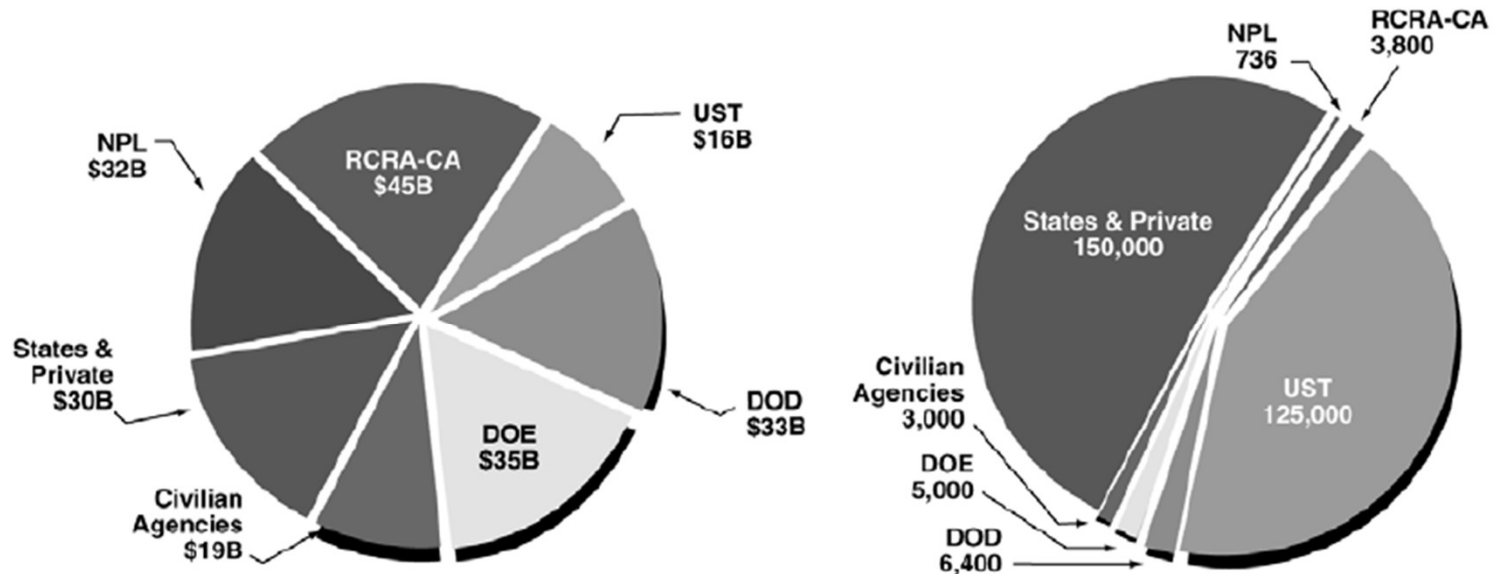
**Ações de remediação adotadas nos locais sob responsabilidade do Superfundo nos EUA (EPA 542-R-17-001, 2017)**



## Estimated Number of Hazardous Waste Sites and Cleanup Costs: 2004-2033

**Total = \$209 Billion**

**Total Sites = 294,000**



These estimates are derived from judgements regarding the most likely scenarios within a range of estimates. The estimates described in the report, include a number of assumptions such as the average cleanup cost per site, number of new site discoveries, and future additions to the NPL.

NPL: National Priorities List, or Superfund; RCRA-CA: Resource Conservation and Recovery Act Corrective Action program; UST: Underground Storage Tanks; DOD: Department of Defense; DOE: Department of Energy; Civilian Agencies: non-DOD and non-DOE federal agencies; and State & Private: state mandatory, voluntary, and brownfields sites, and private sites.

Totals may not add due to rounding.

(Fonte: EPA 542-R-04-015, 2004)

## **Relevância das áreas contaminadas no planejamento urbano**

- Alteração do padrão de uso e ocupação do solo:
  - Expansão urbana;
  - Transformação de áreas de uso industrial ou agrícola em áreas urbanas;
  - Exposição da população à diversos poluentes;
    - Água contaminada;
    - Emissão de gases.

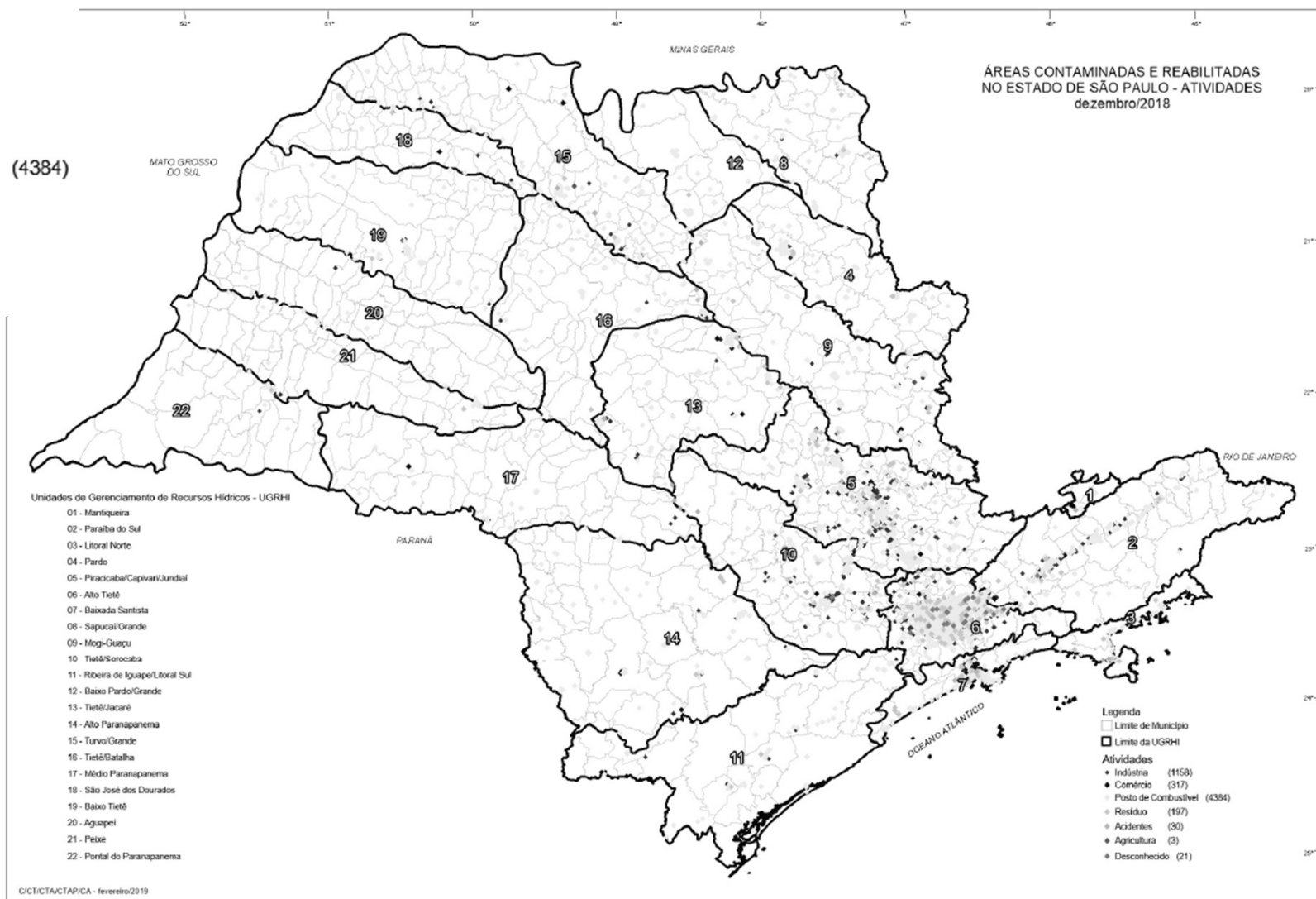
### Legenda

□ Limite de Município

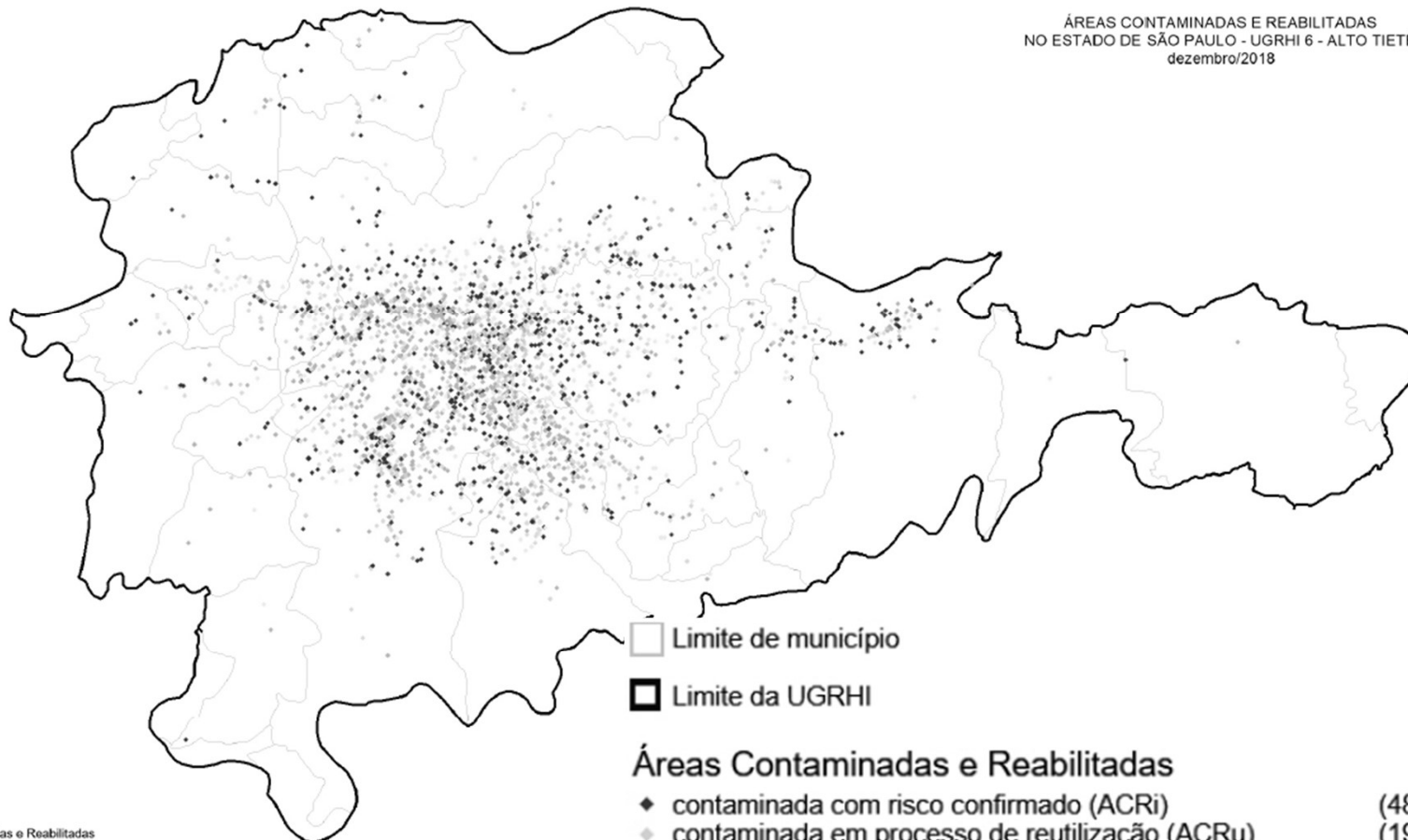
▣ Limite da UGRHI

### Atividades

- ◆ Indústria (1158)
- ◆ Comércio (317)
- ◆ Posto de Combustível (4384)
- ◆ Resíduo (197)
- ◆ Acidentes (30)
- ◆ Agricultura (3)
- ◆ Desconhecido (21)



ÁREAS CONTAMINADAS E REABILITADAS  
NO ESTADO DE SÃO PAULO - UGRHI 6 - ALTO TIETÉ  
dezembro/2018



Legenda

- Limite de município
- ▣ Limite da UGRHI

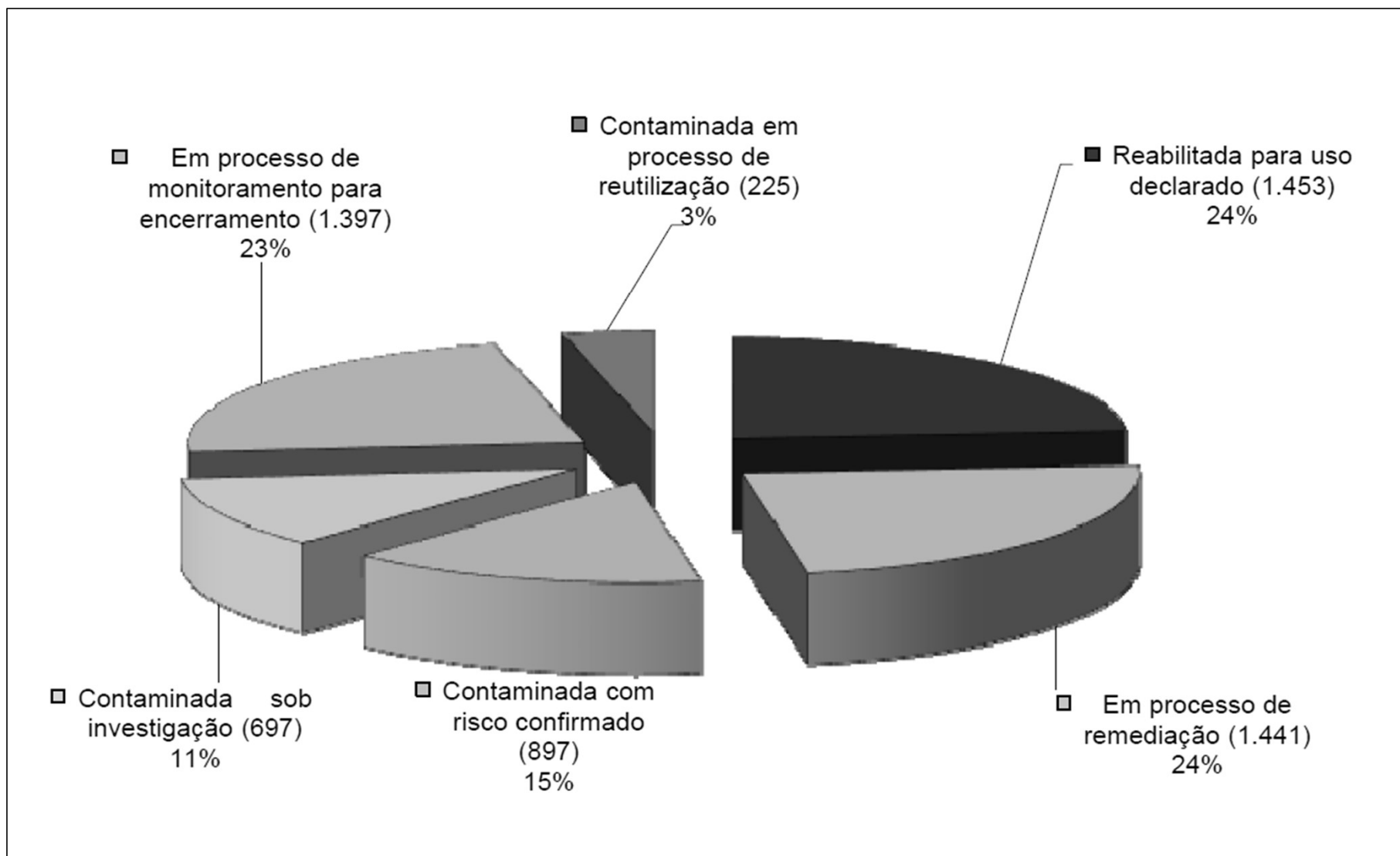
Áreas Contaminadas e Reabilitadas

• contaminada com risco confirmado (ACR)	(480)
• contaminada em processo de reutilização (ACRu)	(190)
• contaminada sob investigação (ACI)	(296)
• em processo de monitoramento para encerramento (AME)	(667)
• em processo de remediação (ACRe)	(722)
• reabilitada para o uso declarado (AR)	(916)

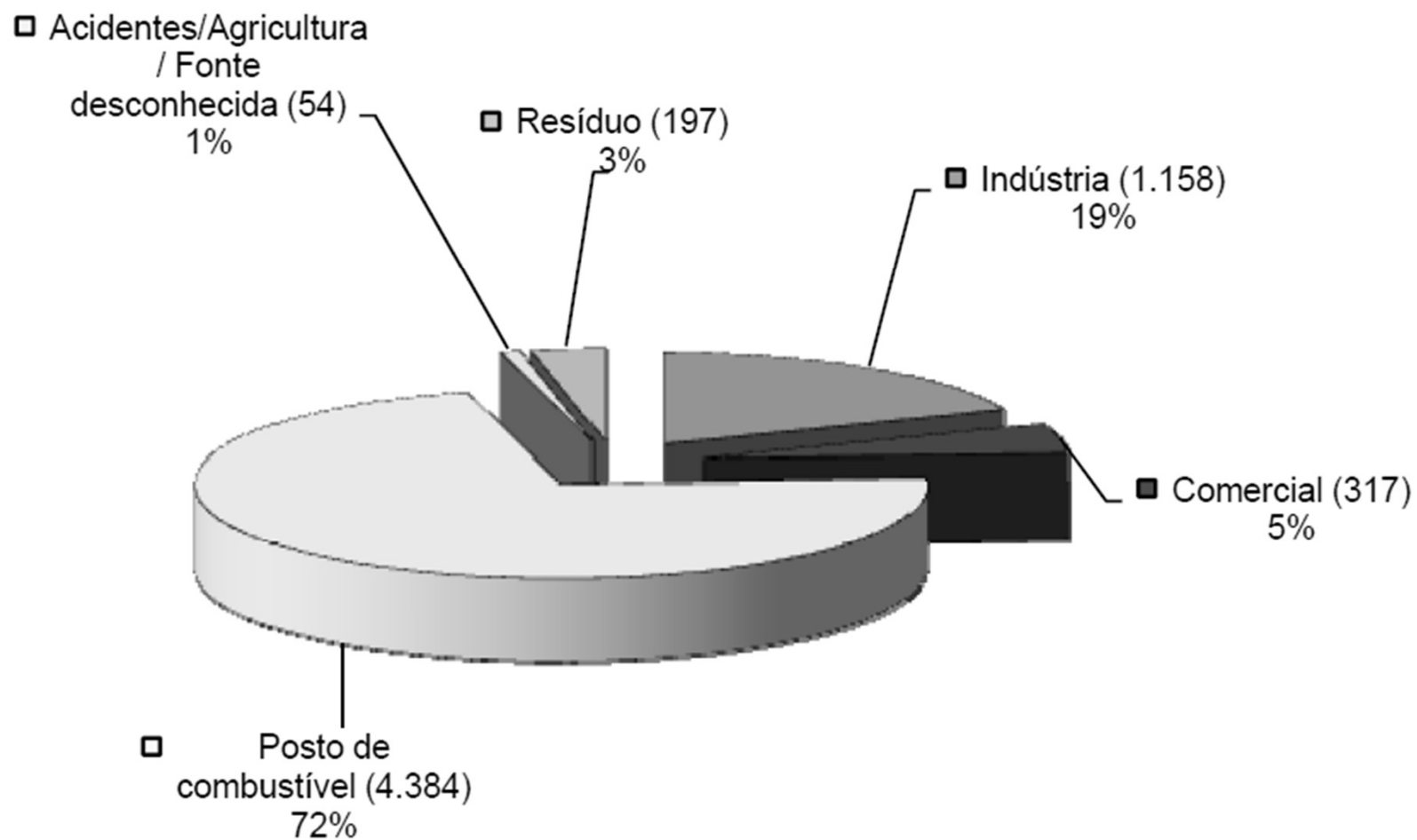
- Limite de município
- ▣ Limite da UGRHI

Áreas Contaminadas e Reabilitadas

◆ contaminada com risco confirmado (ACR)	(480)
◆ contaminada em processo de reutilização (ACRu)	(190)
◆ contaminada sob investigação (ACI)	(296)
◆ em processo de monitoramento para encerramento (AME)	(667)
◆ em processo de remediação (ACRe)	(722)
◆ reabilitada para o uso declarado (AR)	(916)

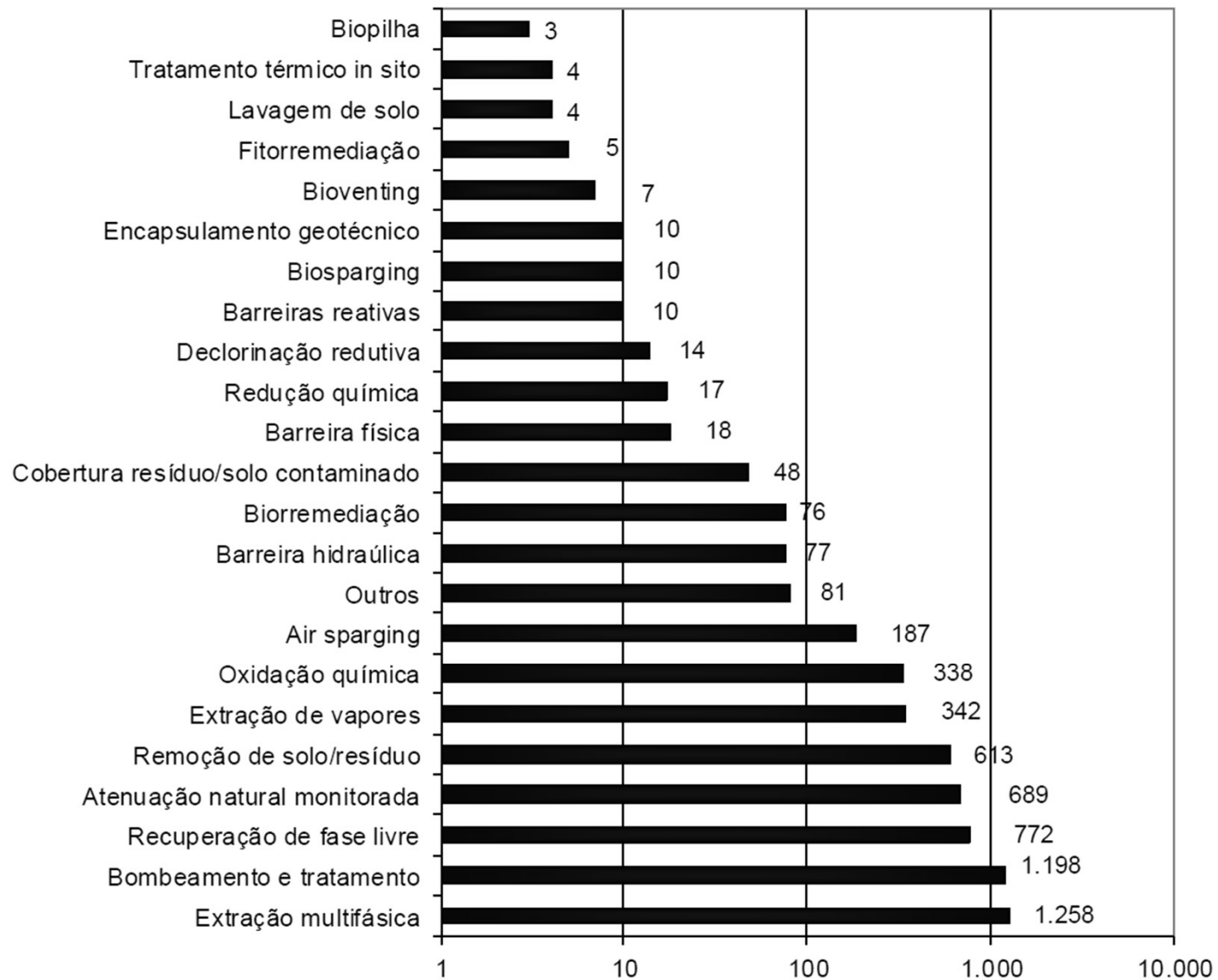


**Áreas contaminadas no Estado de São Paulo (CETESB, 2018)**



**Distribuição de áreas contaminadas por atividade (CETESB, 2018)**

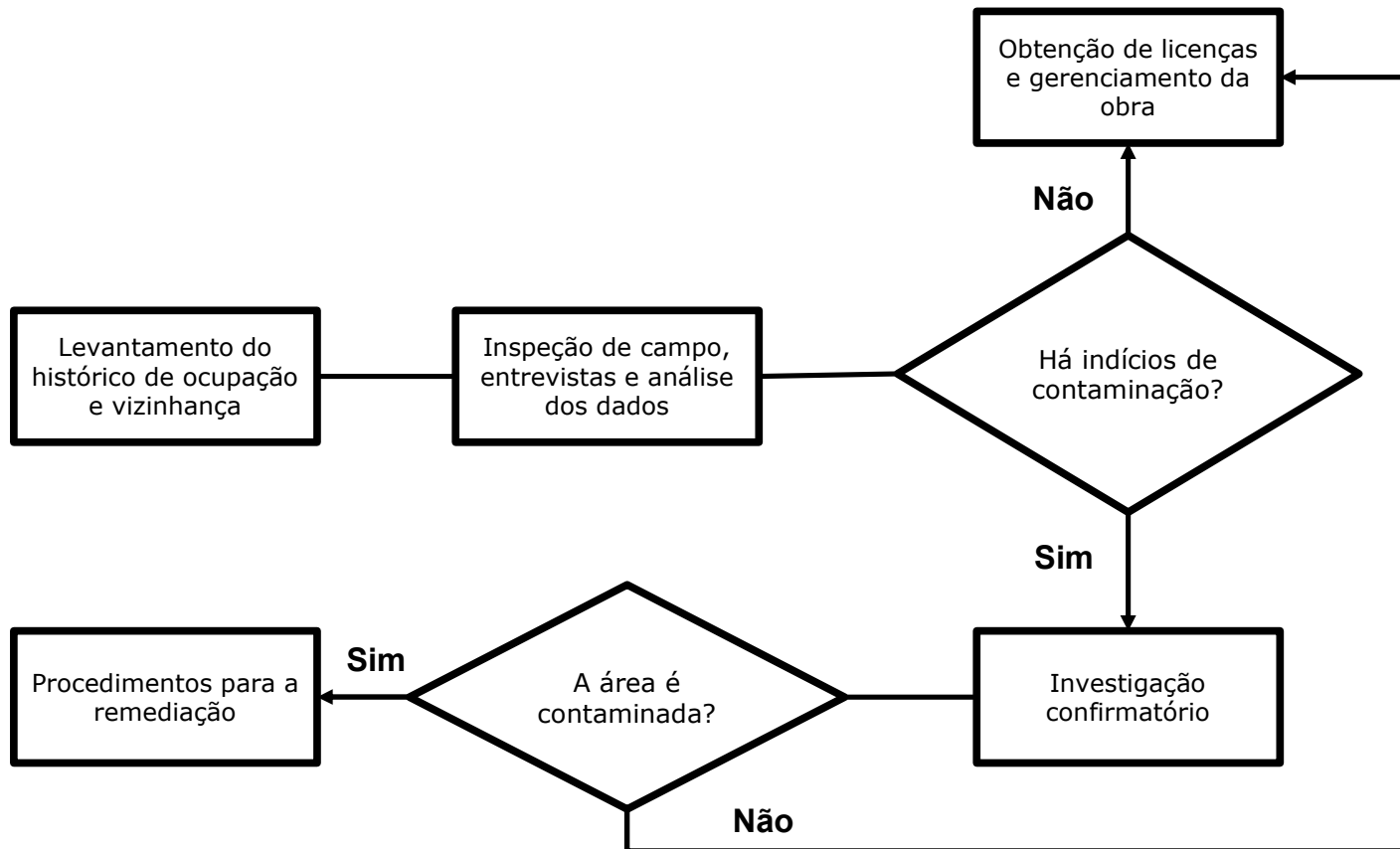
# Técnicas de remediação adotadas (CETESB, 2018)



# Identificação de áreas contaminadas

- Guia para avaliação do potencial de contaminação em imóveis:
  - (<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/contamina%E7%E3o-em-im%F3veis---guia/12-contaminacaoemimoveis>);
- Manual de gerenciamento de áreas contaminadas:
  - (<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-ACs/7-manual>).





Roteiro para avaliação de áreas contaminadas (Adaptado Manual CETESB)

# Técnicas de recuperação

- Depende do tipo de contaminante ou contaminantes identificados;
- Depende do meio que está contaminado:
  - Solo;
  - Água subterrânea.
- Necessidade de contratação de equipe especializada para a avaliação e proposta de soluções:
  - É importante ter um conhecimento básico sobre as tecnologias e ações para a remediação;
  - Cuidado com empresas que vendem serviços de remediação!
  - Os custos podem inviabilizar o utilização do terreno.

# Procedimentos

- Monitoramento da atenuação natural;
- Remoção do material que está causando contaminação, no caso de resíduos;
- Remoção do solo contaminado e envio para tratamento ou disposição final;
- Adoção de técnicas para a transferência de fase do contaminantes:
  - Sólida ou líquida para gasosa;
  - Sólida para líquida;
  - Líquida para sólida.
- Degradação *no local*;
- *Uso de barreiras de contenção.*

# Exemplos de opções para remediação

## *Source Control Treatment Technologies*

- Bioremediation
- Chemical Treatment
- Electrokinetics
- Flushing
- Incineration (on-site and off-site)
  
- Mechanical Soil Aeration
- Multi-Phase Extraction
- Neutralization
- Open Burn (OB) and Open Detonation (OD)
- Physical Separation
  
- Phytoremediation
- Soil Vapor Extraction
- Soil Washing
- Solidification/Stabilization
- Solvent Extraction
  
- Thermal Desorption
- Thermally Enhanced Recovery
- Vitrification

## *In-situ Groundwater Treatment Technologies*

- Air Sparging
- Bioremediation (also a source control technology)
- Chemical Treatment (also a source control Technology)
- Electrokinetics (also a source control technology)
- Flushing (also a source control Technology)
  
- In-well Air Stripping
- Multi-phase Extraction
- Permeable Reactive Barriers
- Phytoremediation (also a source control technology)
- Thermally Enhanced Recovery (also a source control technology)

# Exemplos de opções para remediação

## ***Pump-and-treat Technologies (Ex-Situ Treatment)***

- Adsorption
- Air Stripping (also a source control technology)
- Bioremediation
- Chemical Treatment (also a source control technology)
- Filtration
  
- Ion Exchange
- Metals Precipitation
- Membrane Filtration

## ***In-situ Groundwater Containment***

- Vertical engineered subsurface impermeable barrier
- Hydraulic Barrier created by pumping

## ***Monitored Natural Attenuation for Groundwater***

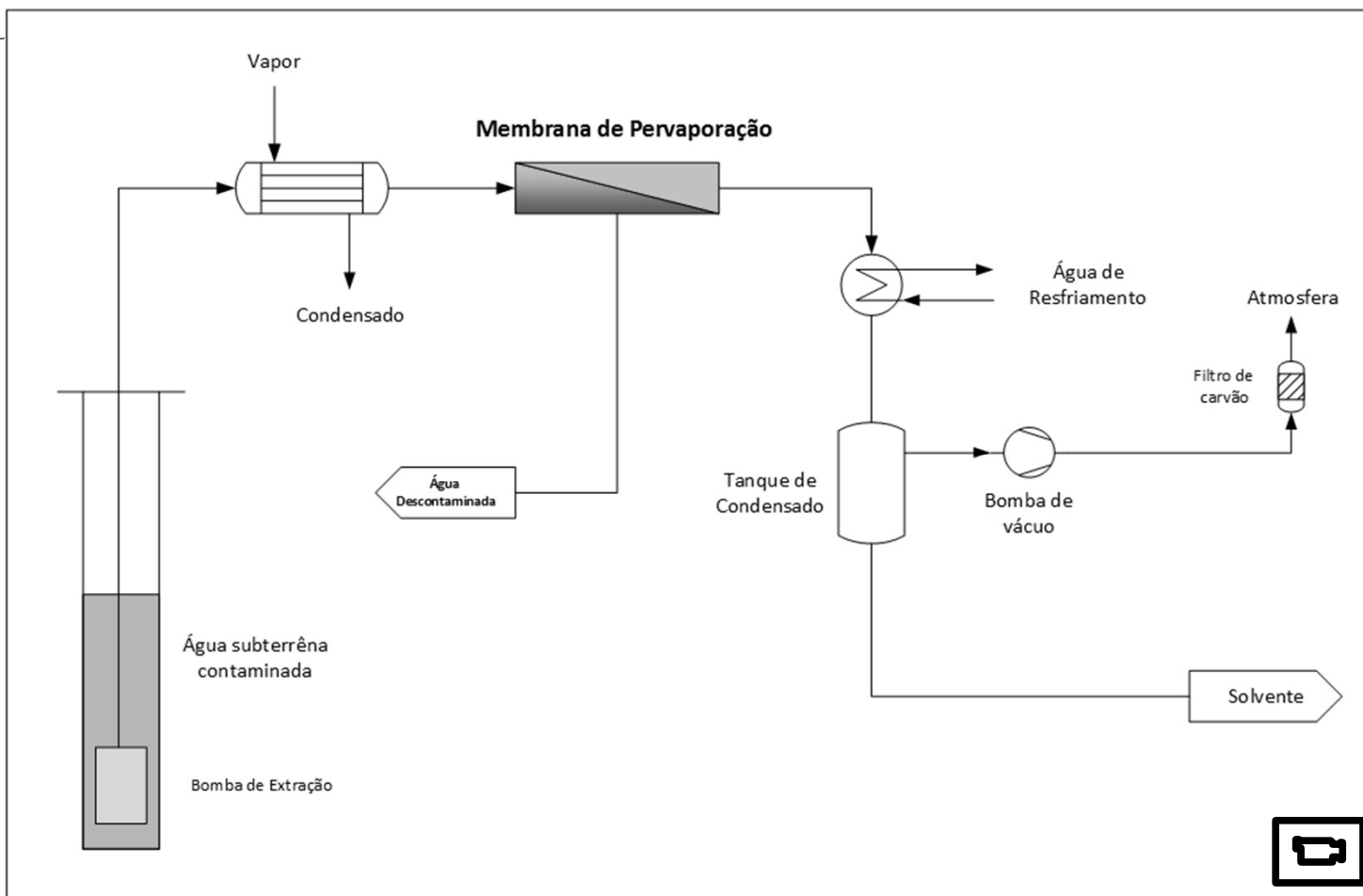
- Includes a variety of physical, chemical, or biological processes, such as biodegradation; dispersion; dilution; sorption; volatilization; radioactive decay; and chemical or biological stabilization, transformation, or destruction of contaminants.

## ***Other Groundwater***

- Groundwater Use Restrictions
- Alternative Water Supply
- Groundwater remedies that do not fall into above categories

# Processo de pervaporação

- Misturas de água e solventes podem ser separadas utilizando-se membranas;
- Para esta aplicação as membranas mais indicadas são as membranas densas, utilizadas nos processos de pervaporação;
- A utilização deste processo ainda se restringe às operações industriais para separação de misturas azeotrópicas.



Representação esquemática do processo extração e separação por membranas

Fonte: <https://www.sulzer.com/pt/Products-and-Services/Separation-Technology/Membrane-Technology/Pervaporation/Pervaporation-Process-Options>

**Exhibit 3-9. Estimated Cleanup Costs for NPL Sites <sup>a</sup>**

	Low	Medium	High
<b>Existing Pre-RA Sites (In the Relevant Market) <sup>b</sup></b>			
No. of Sites	456	456	456
No. of OUs	1,073	1,073	1,073
Total Cost	\$15,516 mil	\$19,395 mil	\$23,274 mil
<b>Assumed New NPL Listings 2004 - 2013 <sup>a</sup></b>			
No. of Sites Per Year	23 <sup>c</sup>	28 <sup>d</sup>	49 <sup>e</sup>
Total over 10 years	230	280	490
Number of OUs	541	658	1,152
Total Cost	\$8,363 mil	\$12,726 mil	\$26,725 mil
<b>Total NPL <sup>a, b</sup></b>			
Current & Future NPL Sites	\$23,879 mil	\$32,121 mil	\$50,000 mil
Notes:			
Low	Cost of RI/FS+RD+RA = \$11.6 million per OU (from text above) and 230 additional sites to the NPL.		
Medium	Cost of RI/FS+RD+RA= \$14.7 million per OU (from text above) and 280 additional sites to the NPL.		
High	Cost of RI/FS+RD+RA= \$17.6 million per OU (from text above) and 490 additional sites to the NPL.		
NA	Not applicable		
LCC	Life Cycle Cost, or cost to complete		
a For purposes of this analysis, it is assumed that listings cease after 10 years, although cleanup work is likely to continue many years beyond. Although new sites may be added to the NPL beyond 10 years, they are not included because of uncertainties in predicting NPL listings.			
b Does not include costs for sites that have begun RA.			
c Low case in the Resources for the Future study, derived from the average for 1996-1999 (Probst & Konisky, 2001)			
d Average of 1993-2003 actual additions to the NPL			
e High case in the Resources for the Future study (Probst & Konisky 2001)			

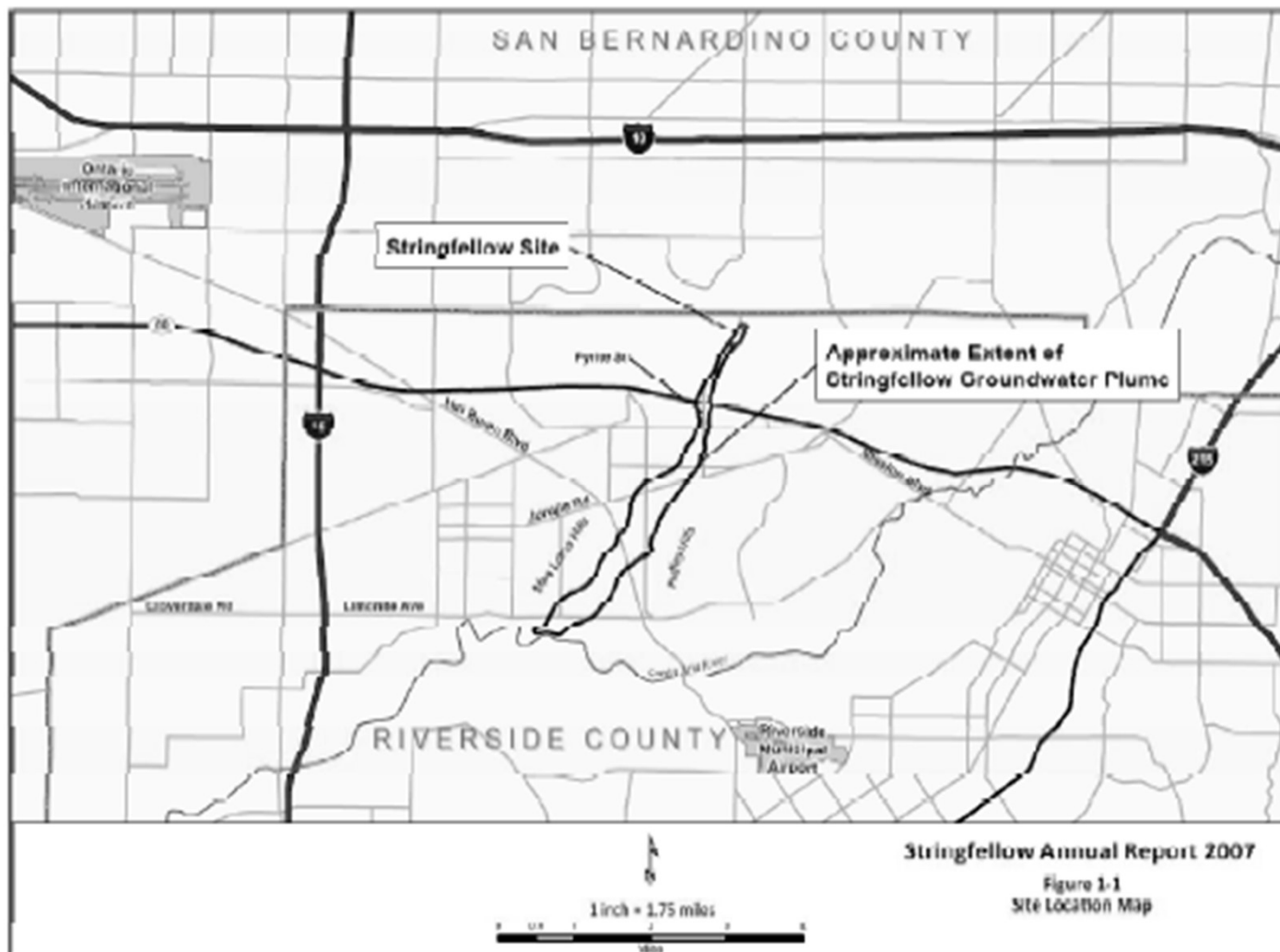
Fonte: EPA 542-R-04-015, 2004

RI/FS – Investigação de remediação e estudo de viabilidade;

RD – Projeto de remediação; RA – Ação de remediação.; OU – Unidade operável <sup>32</sup>



**Estudo de caso**  
**Stringfellow Disposal Site**  
**(Riverside – Califórnia)**



Stringfellow Annual Report 2007

Figure 1-1  
Site Location Map

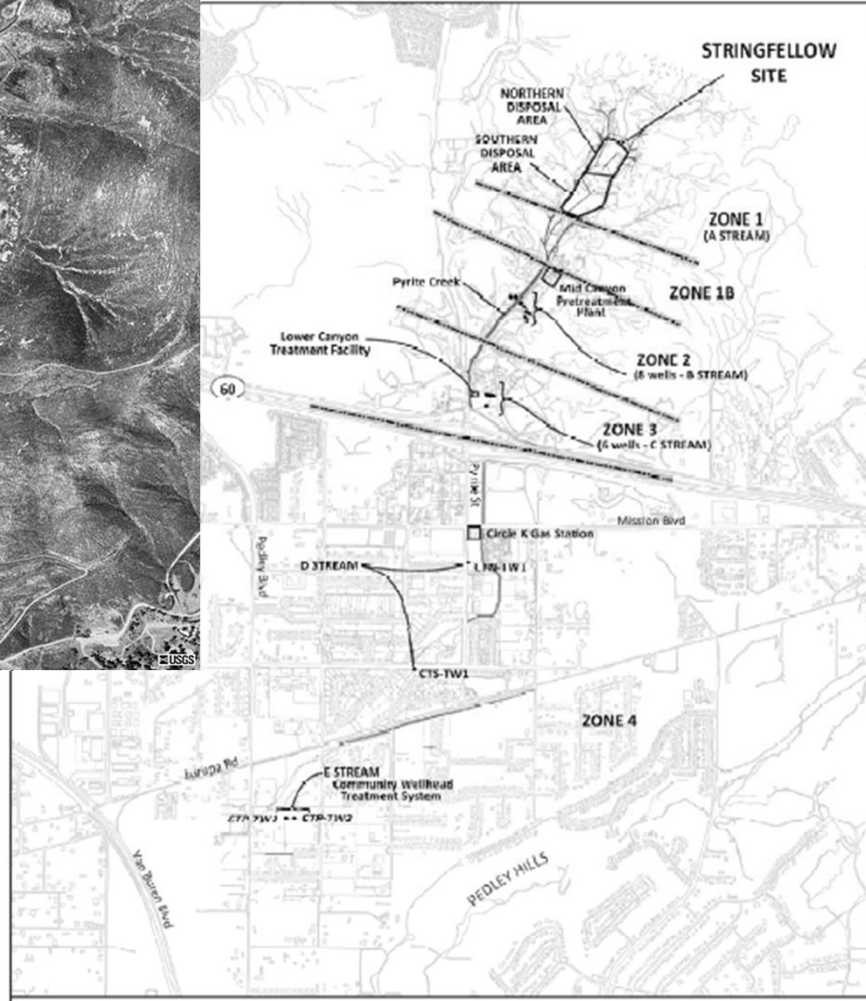


Imagem ampliada do local de disposição



Figure 8. Stringfellow Pretreatment Plant (PTP) Process Flow Diagram (as of 2007)

Source: Tetra Tech, Inc., 2010

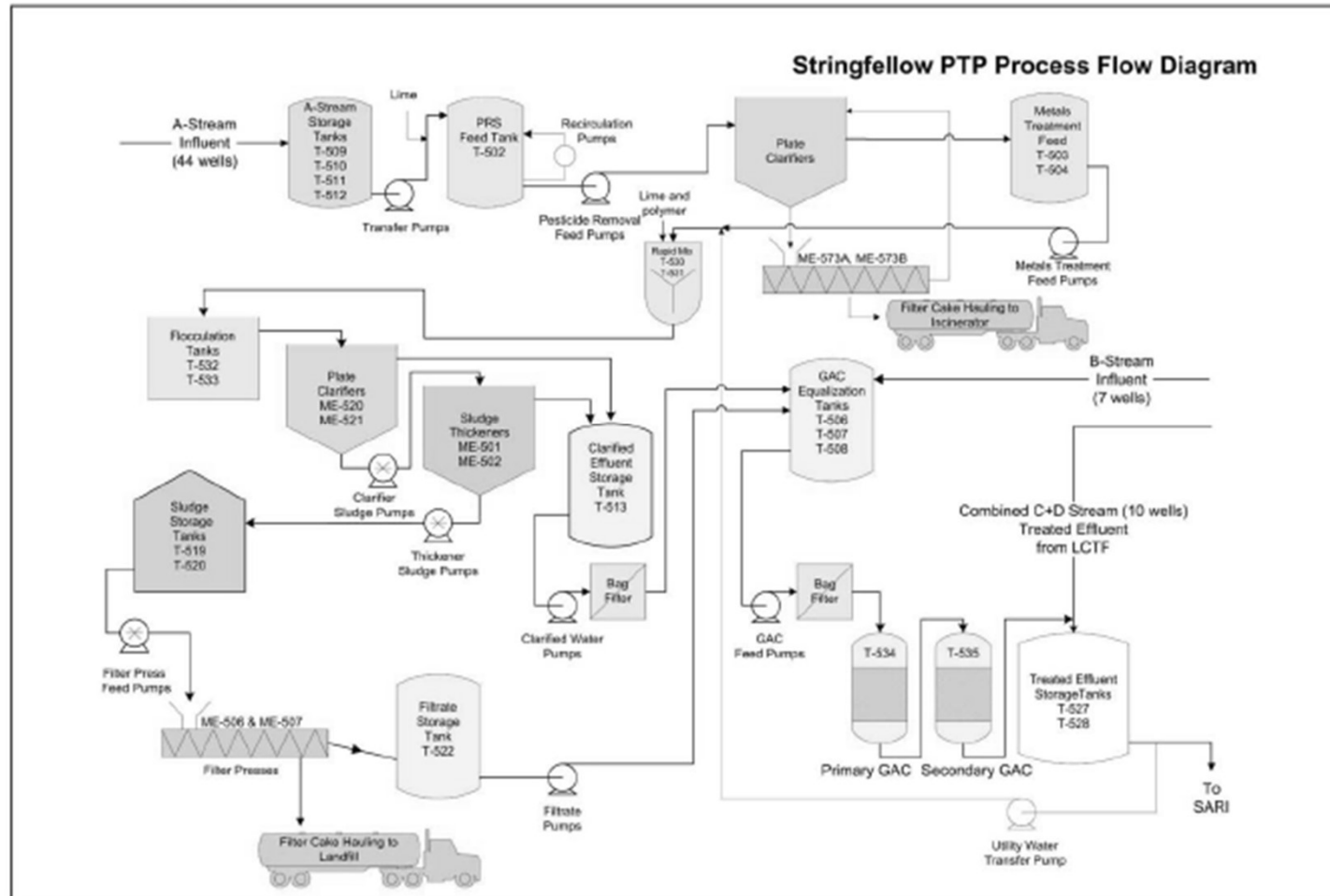


Figure 9. Stringfellow Lower Canyon Treatment Facility (LCTF) Flow Diagram

Source: Tetra Tech, Inc., 2010

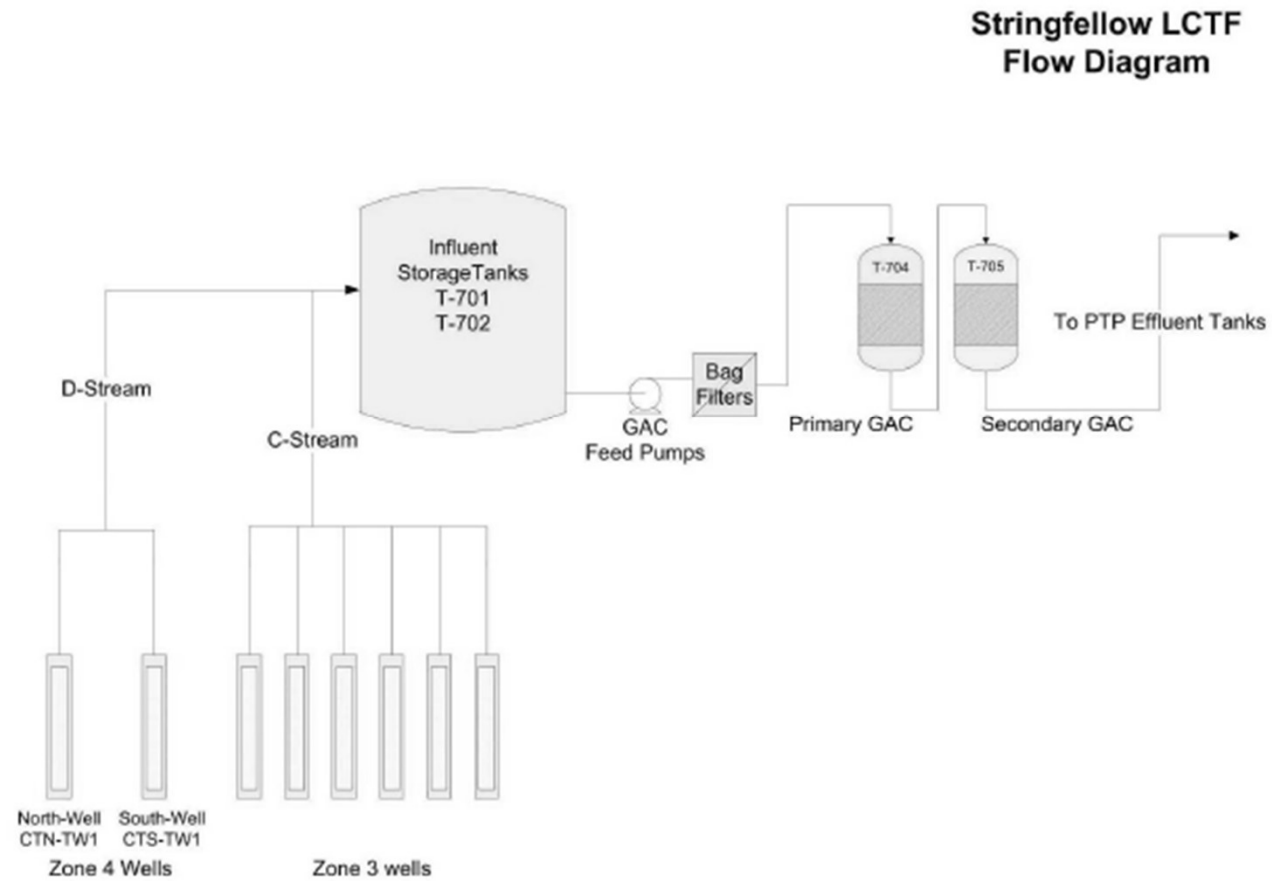
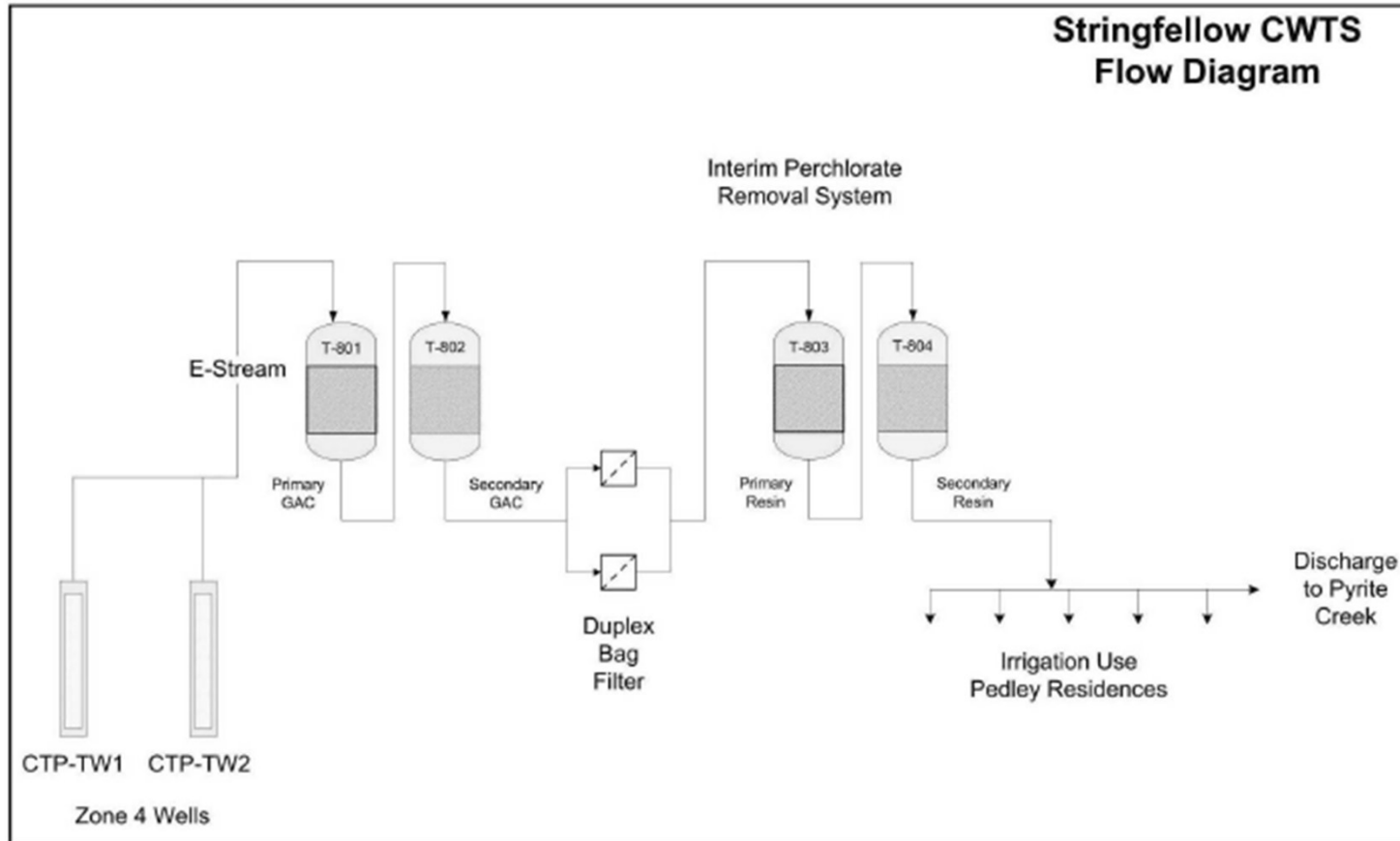


Figure 10. Stringfellow Community Wellhead Treatment System (CWTS) Flow Diagram

Source: Tetra Tech, Inc., 2010





# CONSIDERAÇÕES FINAIS