

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JULIA MARTINS DE AQUINO GONÇALVES

Técnicas de remediação para solos contaminados por produtos petroquímicos

São Paulo
2024

Técnicas de remediação para solos contaminados por produtos petroquímicos

Versão Original

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields.

Orientador: Prof^a Dr^a Maria Eugênia Gimenez Boscov

São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Gonçalves, Julia Martins de Aquino

Técnicas de remediação para solos contaminados por produtos petroquímicos / J. M. A. Gonçalves -- São Paulo, 2024.

59 p.

Monografia (MBA em MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Indústria petroquímica 2. Polo Petroquímico de Capuava 3. Técnicas de remediação 4. Produtos petroquímicos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Prof^a. Dra. Maria Eugênia por ter aceitado investir seu tempo me orientando neste projeto e por acreditar no meu potencial para desenvolvê-lo.

Agradeço ao meu noivo Thiago por ser suporte e incentivo na vida e ao longo desses dois anos que me dediquei a essa especialização.

Aos meus pais Julio e Alexandra agradeço pela dedicação e pelo amor que investiram, desde o meu nascimento, para me criar e educar. Vocês têm participação ativa nessa conquista.

À minha irmã Lidia sou grata pelo brilho que você traz para minha vida. Com ele se torna mais fácil enfrentar os desafios.

Por fim, agradeço a mim mesma pela persistência, coragem, pelo entusiasmo de viver, por construir sonhos e lutar por eles.

RESUMO

GONÇALVES, Julia Martins de Aquino. Técnicas de remediação para solos contaminados por produtos petroquímicos. 2024. 58 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

A indústria petroquímica surgiu na década de 1920 para atender demandas do próprio setor industrial, e atualmente é essencial para a sociedade, alimentando os setores de embalagens, construção civil, automotivo e eletrônico. Porém, são Áreas com Potencial de Contaminação devido à geração de efluentes e resíduos e ao manuseio de produtos químicos tóxicos e/ou carcinogênicos, e por isso são submetidas ao Processo de Identificação de Áreas Contaminadas e, quando necessário, ao Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas. Os critérios de seleção das técnicas de remediação são disponibilidade da técnica, aplicabilidade diante das substâncias químicas de interesse (SQIs) e da matriz contaminada, as consequências de sua aplicação para o meio, o custo e o tempo necessário para atingimento das metas. Este trabalho tem por objetivo definir quais técnicas de remediação são as mais indicadas para as áreas contaminadas do Polo Petroquímico de Capuava (PPC), e assim auxiliar futuras tomadas de decisão referentes às etapas do processo de reabilitação. Sendo assim, foi realizado o levantamento bibliográfico sobre a instalação e operação das indústrias petroquímicas no mundo, as etapas do gerenciamento de áreas contaminadas e a poluição ambiental decorrente do setor petroquímico; o estudo teórico sobre as técnicas de remediação que são utilizadas nos empreendimentos do PPC atualmente; o levantamento sobre o histórico de operação do PPC; a caracterização da área com base em dados geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos e de uso e ocupação do solo disponíveis em fontes bibliográficas e documentais; e por fim foram relacionadas as técnicas apresentadas e seus fatores intervenientes com o meio físico da região. As SQIs dos empreendimentos que operam no PPC são solventes aromáticos, fenóis, *Total Petroleum Hydrocarbons* (TPH), solventes halogenados, *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (PAH) e metais. A técnica de remoção de solo não é indicada devido à demanda de realocação da infraestrutura da área que seria escavada; a de *air sparging* também não, pois é indicada para tratar solos contaminados que apresentam alta permeabilidade. À jusante das Áreas Contaminadas em Processo de Remediação recomenda-se a instalação de barreiras reativas permeáveis para evitar a migração da pluma de contaminação para áreas adjacentes. Quando houver grandes volumes de fase livre em áreas que ainda não são remediadas, recomenda-se inicialmente o uso da técnica de recuperação de fase livre com *skimmers*. O bombeamento e tratamento é indicado para áreas com grandes massas de contaminação em água subterrânea, com ou sem fase livre, mas se a concentração na zona vadosa for expressiva, deve-se implementar outro sistema que abranja a remoção de efluente líquido e gasoso do subsolo. Se os contaminantes forem expressivos na zona vadosa do solo e não houver concentrações preocupantes na água subterrânea, ou quando houver risco de intrusão de vapores em ambiente aberto e/ou fechado, sistemas de extração de vapores são indicados. Nos cenários de particionamento das SQIs para as fases do solo, recomendam-se sistemas de extração multifásica. Em regiões sem fase livre e nível d'água raso, para contaminação com solventes aromáticos, fenóis, TPHs, solventes halogenados e PAHs sugere-se a técnica ISCO com injeção de persulfato alcalino; com metais pesados e organoclorados como SQIs, sugere-se a ISCR. Quando a taxa de remoção de produto ficar muito baixa, a técnica deve ser substituída por outra.

Palavras-chave: Indústria petroquímica. Polo Petroquímico de Capuava. Técnicas de remediação. Produtos petroquímicos.

ABSTRACT

GONÇALVES, Julia Martins de Aquino. Remediation techniques for contaminated soils by petrochemicals. 2024. 58 f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The petrochemical industry emerged in the 1920s, to comply with the demands of the industrial sector, and is currently essential for society to nourish the packaging, civil construction, automotive and electronics sectors. However, they are areas with potential contamination due to the generation of effluents and waste and the handling of toxic and/or carcinogenic chemicals. That is why these areas are subjected to the Contaminated Area Identification Process and, when necessary, to the Contaminated Area Rehabilitation Process. The selection criteria for remediation techniques are availability of the technique, applicability to the chemical substances of interest (CSIs) and the contaminated matrix, the consequences of its application for the environment, the cost and the time required to achieve the goals. This work aims to define which remediation techniques are the most suitable for Contaminated Areas with Confirmed Risk at the Polo Petroquímico de Capuava (PPC), and thus assist future decision-making regarding the stages of the rehabilitation process. Therefore, a bibliographical survey was carried out on the installation and operation of petrochemical industries in the world, the stages of managing contaminated areas and environmental pollution resulting from the petrochemical sector; the theoretical study of the remediation techniques that are currently used in PPC projects; a survey of the PPC's operating history; the characterization of the area based on geological, geotechnical, hydrogeological and land use and occupation data through bibliographic and documentary sources; and finally, the techniques presented and their intervening factors were related to the physical environment of the area. The CSIs of enterprises operating in the PPC are aromatic solvents, phenols, Total Petroleum Hydrocarbons (TPH), halogenated solvents, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) and metals. The soil removal technique is not recommended due to the demand for relocating all infrastructure in the area that would be excavated; neither is air sparging, because it is recommended for treating contaminated soils that have high permeability. Downstream of the contaminated area undergoing remediation process, it is recommended to install permeable reactive barriers to prevent the migration of the contamination plume to adjacent areas. When there are large volumes of non-aqueous phase liquid in areas that are not yet remediated, it is initially recommended to use the non-aqueous phase liquid recovery technique with skimmers. Pump and Treat is indicated for areas with large masses of contamination in groundwater, with or without non-aqueous phase liquid, but if the concentration in the vadose zone is significant, another system must be implemented to attend the removal of liquid and gaseous effluent from the subsoil. If the contaminants are significant in the vadose zone of the soil and there are no worrying concentrations in the groundwater, or when there is a risk of vapor intrusion in an opened and/or closed environment, Soil Vapor Extraction systems are indicated. When CSI is partitioned, Multi Phase Extraction systems are recommended. In regions without a non-aqueous phase liquid and shallow water level, for contamination with aromatic solvents, phenols, TPHs, halogenated solvents and PAHs, the In Situ Chemical Oxidation with injection of alkaline persulfate is suggested; with heavy metals and organochlorines as CSIs, In Situ Chemical Reduction is suggested. When the contaminant mass removal rate decreases, the technique must be replaced by another.

Keywords: Petrochemical industry. Polo Petroquímico de Capuava. Remediation techniques. Petrochemicals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema simplificado da cadeia produtiva petroquímica.....	18
Figura 2: Esquema de um sistema MPE ajustado na modalidade TPE	37
Figura 3: Esquema de um sistema MPE ajustado na modalidade DPE.....	37
Figura 4: Situação de uso e ocupação do solo no entorno do PPC.....	42
Figura 5: Mapa de declividade do município de Santo André	44
Figura 6: Mapa de litologia do município de Santo André	44
Figura 7: Mapa geológico da RMSF com destaque para o embasamento.....	45
Figura 8: Mapa dos aquíferos da região do Polo Petroquímico de Capuava.....	47
Figura 9: Mapa de corpos d'água na região do Polo Petroquímico de Capuava.....	48
Figura 10: Mapa de suscetibilidade a inundações da região do Polo Petroquímico de Capuava	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produtos e substâncias originados do petróleo	19
Tabela 2: Performance de agentes oxidantes para diferentes tipos de contaminantes	30
Tabela 3: Performance de agentes oxidantes para diferentes tipos de contaminantes	31
Tabela 4: Principais usos e ocupações do solo no entorno do PPC.....	41
Tabela 5: Vantagens e desvantagens das técnicas de BH e BRP	50

LISTA DE SIGLAS

AC	Área Contaminada
ACI	Área Contaminada sob Investigação
ACRe	Área Contaminada em Processo de Remediação
ACRi	Área Contaminada com Risco Confirmado
ACRu	Área Contaminada em Processo de Reutilização
AFe	Área Atingida por Fonte Externa
AFd	Área Alterada por Fonte Difusa
AME	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AP	Área com Potencial de Contaminação
AQN	Área com Alteração de Qualidade Natural
AR	Área Reabilitada para Uso Declarado
AS	Área com Suspeita de Contaminação
BH	Barreira Hidráulica
BRP	Barreira Reativa Permeável
CBE	Companhia Brasileira de Estireno
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMA	Concentração Máxima Aceitável
CNP	Conselho Nacional de Petróleo
COPEBRÁS	Companhia Petroquímica Brasileira
COT	Carbono Orgânico Total
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DPE	<i>Dual Phase Extraction</i>
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FL	Fase Livre
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ISCO	<i>In situ Chemical Oxidation</i>
ISCR	<i>In Situ Chemical Reduction</i>
MPE	<i>Multi Phase Extraction</i>
NA	Nível d'água
PAH	<i>Polycyclic Aromatic Hydrocarbons</i>
PCB	Bifenilas Policloradas
PE	Poço de Extração
PI	Poço de Injeção
P&T	<i>Pump & Treat</i>
PPC	Polo Petroquímico de Capuava
RECAP	Refinaria de Capuava
REPLAN	Refinaria de Paulínia
REVAP	Refinaria do Vale do Paraíba
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SQI	Substância Química de Interesse
SVE	<i>Soil Vapor Extraction</i>
SVOC	<i>Semi-volatile Organic Compound</i>
TPE	<i>Two Phase Extraction</i>
TPH	<i>Total Petroleum Hydrocarbons</i>

VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i>
ZEI	Zona Exclusivamente Industrial
ZDE	Zona de Desenvolvimento Econômico
ZEIS	Zonas Especiais de Interesse Social
ZEIA	Zona Especial de Interesse Ambiental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
3	JUSTIFICATIVA.....	15
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4.1	A indústria petroquímica no Brasil e no mundo.....	17
4.2	Gerenciamento de áreas contaminadas.....	21
4.3	Poluição ambiental em polos petroquímicos.....	24
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
6	RESULTADOS.....	27
6.1	Remediação de áreas contaminadas por produtos petroquímicos.....	27
6.1.1	<i>Oxidação química in situ</i>	28
6.1.2	<i>Redução química</i>	32
6.1.3	<i>Remoção de solo</i>	33
6.1.4	<i>Pump & treat</i>	33
6.1.5	<i>Extração de vapores do solo</i>	34
6.1.6	<i>Air sparging</i>	35
6.1.7	<i>Extração multifásica</i>	36
6.1.8	<i>Recuperação de fase livre</i>	38
6.2	Polo Petroquímico de Capuava.....	39
6.2.1	<i>História</i>	39
6.2.2	<i>Caracterização da região</i>	40
6.3	Aplicação das técnicas de remediação nas áreas contaminadas do Polo Petroquímico de Capuava.....	49
7	CONCLUSÕES.....	53

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial ocorrida na Inglaterra no século XVIII representou o período de transição do trabalho manual, que era realizado pela força humana e animal, para o mecanizado, que passou a ser executado por grandes máquinas que operavam à base de combustível fóssil, como carvão, madeira e petróleo (MARTINELLI, 2019).

Mais tarde, na década de 1920, surgiu a indústria petroquímica nos Estados Unidos, atendendo a demandas do próprio setor industrial através da produção de isopropanol e glicol. Ao final da década de 1930, frente à Segunda Guerra Mundial, houve um aumento na demanda pelo desenvolvimento de produtos estratégicos, como o tolueno e a glicerina para produzir explosivos, potencializando o desenvolvimento tecnológico e produtivo do setor petroquímico (TORRES, 1997). Atualmente, a indústria petroquímica é essencial para a sociedade, uma vez que contribui para a produção de materiais utilizados nos setores de embalagens, construção civil, automotivo, eletrônico, entre outros (BNDES, 2005).

Apesar da importância desse setor para a sociedade, em decorrência de as indústrias petroquímicas gerarem efluentes e resíduos ao longo dos processos de produção de produtos químicos e reagentes, muitos dos quais se caracterizam como inflamáveis, explosivos, tóxicos e/ou carcinogênicos, as áreas que esses empreendimentos ocupam são consideradas Áreas com Potencial de Contaminação (AP) (MATOS, 2010).

Áreas com potencial de contaminação devem passar pelo Processo de Identificação de Áreas Contaminadas, que visa identificar as áreas contaminadas, determinar a localização e as características da contaminação e avaliar os riscos associados, permitindo decidir sobre a necessidade de adotar medidas de intervenção para viabilizar seu uso, atual ou futuro, de forma segura (CETESB, 2017). Esse processo é constituído pelas seguintes etapas:

- Identificação de Áreas com Potencial de Contaminação;
- Priorização de Áreas com Potencial de Contaminação;
- Avaliação Preliminar;
- Investigação Confirmatória;
- Investigação Detalhada;
- Avaliação de Risco.

Conforme indicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) na Decisão de Diretoria n 38/2017/C, quando as etapas do Processo de Identificação de Áreas Contaminadas concluírem pela necessidade de realizar medidas de intervenção para reabilitar

a área para o uso declarado, deve ser realizado o Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas, que é composto pelas seguintes etapas:

- Elaboração do Plano de Intervenção;
- Execução do Plano de Intervenção;
- Monitoramento para Encerramento.

Quando é necessária a implementação de medidas de remediação para a reabilitação da área para uso declarado, deve-se estabelecer um critério de seleção considerando a disponibilidade da técnica, sua aplicabilidade diante das substâncias químicas de interesse (SQIs) identificadas e da matriz que está contaminada, as consequências de sua aplicação para o meio, o custo e o tempo necessário para atingimento das metas de remediação. É importante também se basear no histórico de utilização de técnicas para cenários similares (CETESB, 2017).

2 OBJETIVOS

Avaliar as técnicas de remediação existentes no mercado para definir quais são as mais indicadas para tratamento de solo e água subterrânea contaminados em decorrência da atuação das indústrias petroquímicas instaladas no Polo Petroquímico de Capuava (PPC), localizado na região do ABC no estado de São Paulo.

Os objetivos específicos são:

- Apresentar as principais técnicas de remediação utilizadas para contaminação de solos por produtos petroquímicos;
- Relacionar a eficiência dessas técnicas em função dos principais fatores intervenientes;
- Relacionar essas técnicas e sua eficiência com as características hidrogeológicas e geotécnicas da região onde está inserido o Polo Petroquímico de Capuava.

3 JUSTIFICATIVA

Conforme a Relação Anual de Informações Sociais elaborada pelo Ministério do Trabalho e Emprego em 2021, nesse período existiam 653 estabelecimentos vinculados à indústria petroquímica no Brasil, 57,6% dos quais instalados na região sudeste, 22,5% no Sul, 14,4% no Nordeste, 3,2% no Centro Oeste e 2,3% no Norte. Nesses estabelecimentos foram empregadas 32.785 pessoas em 2021, dentre as quais 54,5% estavam concentradas no Sudeste, 16,6% no Sul, 16,4% no Nordeste e os 12,5% restantes divididos entre Centro Oeste e Norte (VIANA, 2022).

No Sudeste, o Polo Petroquímico de Capuava, localizado na região do Grande ABC no estado de São Paulo, influencia fortemente o desenvolvimento econômico e social da região, principalmente nos municípios de Mauá e Santo André, impactando diretamente na geração de empregos, de renda e na arrecadação tributária. Do processamento de produtos como etileno, propileno, polietileno, entre outros, provêm 66% da arrecadação de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) em Mauá e 36% em Santo André. Além disso, as atividades do setor petroquímico faturaram R\$9,7 bilhões e geraram 2550 empregos formais diretos no ano de 2018 (COFIP, 2023).

Conforme dados de 2023 da CETESB, no estado de São Paulo está cadastrado um total de 6.892 áreas contaminadas e reabilitadas, sendo 190 áreas localizadas no município de Santo André e 52 em Mauá. Dentre essas áreas, 7 estão localizadas no PPC, sendo 3 delas classificadas como Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe) e 4 como Área Reabilitada para Uso Declarado (AR). O grupo de contaminantes que foi identificado em todas elas engloba os solventes aromáticos, mas também há registros da identificação de fenóis, hidrocarbonetos totais de petróleo (TPHs – *Total Petroleum Hydrocarbons*), solventes halogenados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs – *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*) e metais como grupos de contaminantes (CETESB, 2023).

As medidas de remediação adotadas nas ACRes localizadas na área do Polo Petroquímico de Capuava são oxidação química, redução química, remoção de solo, bombeamento e tratamento (P&T – *Pump & Treat*), extração de vapores do solo (SVE – *Soil Vapor Extraction*), *air sparging*, extração multifásica (MPE – *Multi Phase Extraction*) e recuperação de fase livre (CETESB, 2023).

Assim como o Polo Petroquímico de Capuava, há outros conglomerados de indústrias do setor petroquímico instalados em diferentes estados brasileiros. Por serem regiões classificadas como APs, estarem suscetíveis a passar pelas etapas do Processo de Reabilitação de Áreas

Contaminadas e por possuírem SQIs em comum, o presente trabalho auxiliará futuras tomadas de decisão referentes às etapas do processo de reabilitação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A indústria petroquímica no Brasil e no mundo

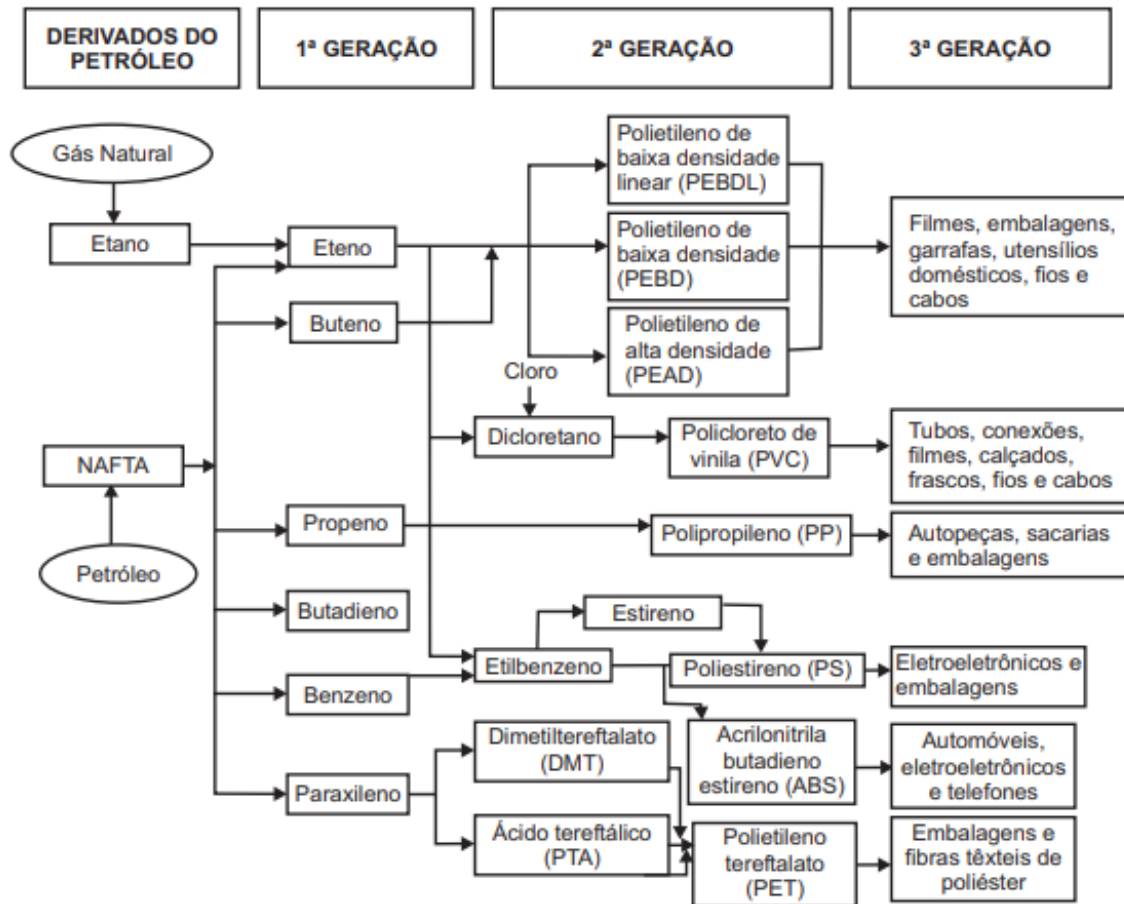
A indústria petroquímica é uma subdivisão da indústria química, e é caracterizada por utilizar a nafta e/ou o gás natural, que consistem em produtos derivados do petróleo, como matérias primas básicas, e transformá-los em derivados químicos, como metano, propano, butano, gasolina, querosene, combustíveis da aviação, pesticidas, herbicidas, fertilizantes, plásticos, borracha, asfalto e fibras sintéticas (ABIQUIM, 2023; WIMMER, 2007).

A cadeia petroquímica é composta por unidades ou empresas de primeira, segunda e terceira geração. Nas unidades de primeira geração é realizada a fabricação de materiais de base, ou seja, o petróleo e o gás natural são submetidos aos processos de *cracking*, onde é realizada a quebra de moléculas pesadas, e *reforming*, onde ocorre a modificação da estrutura de moléculas de hidrocarboneto, gerando os produtos básicos, sendo os mais importantes as olefinas (etileno, propileno e butenos) e os aromáticos (benzeno, tolueno e xilenos) (BNDES, 2005; WIMMER, 2007).

Nas unidades de segunda geração é realizada a introdução de átomos de determinados compostos, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, nos produtos básicos, gerando os produtos intermediários e as resinas termoplásticas. Já as unidades de terceira geração são responsáveis por realizar a transformação plástica de intermediários e resinas termoplásticas para gerar materiais que são utilizados em diversos segmentos, como o de construção civil, embalagens e automotivo (BNDES, 2005).

A Figura 1 apresenta um esquema simplificado da cadeia produtiva petroquímica. A Tabela 1 apresenta alguns produtos e substâncias, dentre uma grande gama, originados a partir do petróleo através dessa cadeia.

Figura 1: Esquema simplificado da cadeia produtiva petroquímica



Fonte: BNDES (2005).

Tabela 1: Produtos e substâncias originados do petróleo

Produtos petroquímicos básicos	Produtos petroquímicos primários	Produtos petroquímicos intermediários	Produtos petroquímicos secundários
Eteno	Óxido de eteno	Etilenoglicol	Ureia
Propeno	Óxido de propeno	Estireno	Hexaclorocicloexano
Buteno	Benzeno	Acetato de vinila	Resinas (de ureia-formaldeído, fenólicas, alquídicas, poliésteres, epoxidadas, melamínicas, de acrilonitrilabutadieno-estireno)
Xilenos	Tolueno	Polipropilenoglicol	Polietileno de alta densidade (PEAD) e de baixa densidade (PEBD)
Resíduos aromáticos	Acetileno	Amônia	Polipropileno
Resíduos naftênicos	Gás de síntese	Metanol	Poliestireno
Metano	Ciclo-hexano	Formol	Cloreto de polivinila
Butano	Etilbenzeno	Acrilonitrila	Politetrafluoretileno
Propano	Butadieno	Aldeído acético	Ésteres
Pentano	Etanol	Ácido acético	Fibras (de nylon, de poliéster, de polipropileno, de polietileno, acrílicas)
Hexano	Butanol	Cloreto de vinila	Borrachas
	Isopropanol	Diclorometano	Matérias corantes orgânicas
	Naftaleno	Triclorometano	Clorobenzenos
	Dicloroetano	Tetraclorometano	Ácido acetilsalicílico
		Glicerina	
		Fenol	
		Acetona	

Fonte: Torres (1997).

As primeiras indústrias petroquímicas surgiram nos Estados Unidos em 1920 com a fabricação de isopropanol e glicol. Em decorrência das demandas estratégicas requeridas durante a Segunda Guerra Mundial, houve um desenvolvimento tecnológico acentuado, de forma que os EUA duplicaram sua produção petroquímica entre 1940 e 1950. Na Europa, a substituição de subprodutos do carvão pela nafta proporcionou um impulso no setor petroquímico do continente no período pós-guerra. No Japão, apesar da produção petroquímica ter sido iniciada somente em 1955, em 1970 o país já era o segundo produtor do mundo graças à produção de petroquímicos básicos com preços competitivos no mercado internacional (TORRES, 1997).

As empresas petroquímicas se organizam em polos, buscando se estruturar nos locais onde as companhias responsáveis por gerar as matérias primas e as unidades produtoras de materiais petroquímicos finais estão instaladas. Dessa forma há uma otimização da sinergia entre as

empresas em termos de logística, infraestrutura e integração operacional, minimizando os custos (BNDES, 2005).

A existência de petróleo no Brasil foi detectada no final do século XIX, mas esforços para sua prospecção e exploração foram retardados por muito tempo, em parte por motivos políticos. O escritor Monteiro Lobato foi um dos ativistas da causa da exploração do petróleo no Brasil, o que resultou em sua prisão por subversão durante o governo de Getúlio Vargas. Em 1939, foram descobertas importantes reservas de petróleo no Recôncavo Baiano, iniciando-se amplo debate sobre sua exploração, principalmente após a promulgação da Constituição de 1946, que permitia a participação do capital estrangeiro nas atividades de exploração mineral. A campanha “O petróleo é nosso” agitou o país entre “nacionalistas”, que defendiam o monopólio estatal na exploração do petróleo e “entreguistas”, defensores do capital estrangeiro. O monopólio estatal durou até 1997, quando foi derrubado em consequência da lei nº 9.478, conhecida como Lei do Petróleo, e a criação da Agência Nacional do Petróleo (ANP), órgão regulador da indústria do petróleo (RIO MEMORIAS, 2024).

A primeira fábrica petroquímica brasileira começou sua operação em 1948 no Paraná, e se tratava de uma planta de formol. Houve um grande impulso para consolidação dessa atividade no Brasil sob responsabilidade do Conselho Nacional de Petróleo (CNP) no início da década de 1950, período em que foi construída a Refinaria Presidente Bernardes (RPBC) em Cubatão (SP), responsável por gerar subprodutos do refino de petróleo. A oferta de petroquímicos básicos pela RPBC incentivou a implantação de unidades industriais do setor petroquímico junto à refinaria nessa mesma década, como é o caso de uma fábrica de fertilizantes nitrogenados (amônia, nitrato de amônia e nitrocálcio), da Companhia Brasileira de Estireno (CBE), da Union Carbide do Brasil, da Companhia Petroquímica Brasileira (COPEBRÁS), da Alba S.A., e da Rhodia (TORRES, 1997).

Em 1953 foi criada a PETROBRÁS, e o início de suas atividades se deu em 1954. Mas foi somente em 1957, ano em que o CNP permitiu que a empresa produzisse e comercializasse petroquímicos básicos e outros essenciais, que ela ampliou sua atuação no campo da indústria petroquímica através do emprego de unidades de pirólise de nafta, reforma catalítica e extração de aromáticos (benzeno, tolueno e xileno) e da ampliação da unidade de separação e purificação de eteno produzido pela RPBC. Isso deu início a uma fase de crescimento significativo do setor petroquímico brasileiro (TORRES, 1997).

A crescente demanda por produtos derivados do petróleo provenientes dos segmentos de embalagens, construção civil, elétrico, eletrônico e automotivo levou à estruturação de polos petroquímicos no Brasil, estando entre os principais o Polo Petroquímico de Capuava, fundado

em 1972 na região do Grande ABC (SP); o Polo Petroquímico de Camaçari, localizado na Bahia e fundado em 1978; o Polo Petroquímico de Triunfo, localizado no Rio Grande do Sul, com operações iniciadas em 1982; e o Polo Petroquímico do Rio de Janeiro, estruturado em 2005 em Duque de Caxias (RJ) (PETROQUÍMICA, 2017).

4.2 Gerenciamento de áreas contaminadas

Áreas onde são ou foram desenvolvidas atividades humanas envolvendo processos, transporte e/ou manuseio de substâncias que são capazes de causar danos aos bens a proteger (receptores humanos e ecológicos; ecossistemas naturais; recursos naturais e ambientais; patrimônio público, privado, coletivo, ambiental, cultural e histórico; e ordenação territorial) são chamadas de Área com Potencial de Contaminação (AP). Sendo assim, indústrias petroquímicas de primeira, segunda e terceira geração integram a Relação de Áreas com Potencial de Contaminação da CETESB (CETESB, 2024a).

De acordo com a CETESB, o Processo de Identificação de Áreas Contaminadas e o Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas compõem a Metodologia de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. O primeiro processo envolve etapas que tem por objetivo a identificação de Áreas Contaminadas (AC), a determinação de suas características e a identificação e caracterização dos riscos ou danos aos bens a proteger a elas associados, possibilitando a decisão sobre a necessidade de adoção de medidas de intervenção. As etapas compreendidas no segundo processo buscam implementar as medidas de intervenção em AC com o objetivo de viabilizar o uso proposto ou implementado de forma segura (CETESB, 2024a).

A etapa de Identificação de Áreas com Potencial de Contaminação é a primeira do Processo de Identificação de Áreas Contaminadas. Uma vez que determinada área é definida como AP, deve ser realizada a Avaliação Preliminar para produzir um diagnóstico inicial e identificar fatos, evidências, indícios ou incertezas que levem a suspeitar da existência de contaminação nos compartimentos do meio ambiente gerada a partir de fonte de contaminação primária localizada dentro dos limites da área em avaliação. Ao identificar tais evidências, a classificação dessa área é alterada para Área com Suspeita de Contaminação (AS) (CETESB, 2024a).

Em uma AS deve ser realizada a Investigação Confirmatória, cujo objetivo consiste em identificar situações que permitam confirmar ou não a existência de contaminação nos compartimentos do meio ambiente. Quando se confirma a contaminação em, pelo menos, um compartimento do meio ambiente, a área é classificada como Área Contaminada sob

Investigação (ACI). Em uma ACI é realizada a Investigação Detalhada para determinar as características das fontes de contaminação primárias e das contaminações nos compartimentos do meio ambiente identificadas na Investigação Confirmatória (CETESB, 2024a).

A última etapa do Processo de Identificação de Áreas Contaminadas é a Avaliação de Risco, onde é definido se é necessário implementar medidas de intervenção na área em avaliação ou na sua vizinhança com o objetivo de viabilizar seu uso seguro. Nesse estudo são identificados e caracterizados os riscos acima dos níveis aceitáveis provenientes da exposição dos bens a proteger às SQIs através da caracterização dos caminhos de exposição potenciais e reais, dos riscos aos bens a proteger e dos danos aos bens a proteger (CETESB, 2024a).

Os resultados da Avaliação de Risco embasam a classificação da área como Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi), Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME) ou outra classificação possível, como Área Atingida por Fonte Externa (AFe), Área Alterada por Fonte Difusa (AFd) e Área com Alteração de Qualidade Natural (AQN), além de orientar a execução das demais etapas do gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 2024a).

Caso a área seja classificada como AME, deve-se prosseguir com a etapa de Monitoramento para Encerramento. Quando classificada como ACRi, deve-se proceder ao Processo de Reabilitação de Áreas Contaminadas, cuja primeira etapa é a elaboração do Plano de Intervenção, onde são definidos os objetivos do Plano de Intervenção e as medidas de intervenção a serem adotadas, são selecionadas as técnicas a serem empregadas e descrito o Plano de Intervenção (CETESB, 2017).

Para definição dos objetivos do Plano de Intervenção, deve-se adotar as seguintes metas, quando aplicáveis: controle das fontes de contaminação identificadas, diminuição do nível de risco para níveis aceitáveis aos receptores humanos e/ou ecológicos identificados e controle dos riscos identificados com base nos padrões legais aplicáveis. Já as estratégias necessárias para atingir tais objetivos podem contemplar a eliminação, contenção ou o isolamento das fontes primárias e secundárias da contaminação; a prevenção ou o controle da exposição dos receptores através da eliminação dos caminhos de exposição ou remoção dos receptores expostos; a remoção de massa de contaminantes; a retração das plumas de contaminação; e a contenção do avanço das plumas de contaminação (CETESB, 2017).

As medidas de intervenção que podem ser adotadas são a remediação para tratamento e para contenção, medidas de engenharia e medidas de controle institucional. Deve-se priorizar as medidas de remediação para tratamento em relação às outras citadas, com exceção de situações em que as medidas de remediação por tratamento não se mostrem, a curto e médio prazos,

suficientes para o controle dos riscos, em que sua aplicação se mostre inviável técnica e economicamente ou que sua aplicação possa intensificar o risco aos receptores ou o dano ao ambiente. Uma vez que forem definidas tais medidas, o responsável técnico pela área deve selecionar a(s) técnica(s) que integrarão cada medida, considerando a disponibilidade da técnica, sua aplicabilidade diante das substâncias químicas de interesse e do meio contaminado, as consequências de sua aplicação, o custo, o histórico de utilização da técnica para casos similares e o tempo necessário para atingimento das metas de remediação (CETESB, 2017).

Após a entrega do Relatório do Plano de Intervenção à CETESB, é iniciada a etapa de Execução do Plano de Intervenção, cabendo aos responsáveis legal e técnico a responsabilidade de demonstrar tecnicamente a validade das premissas descritas no Plano de Intervenção, através da apresentação dos relatórios de Instalação do Sistema de Remediação, Avaliação do Desempenho do Sistema de Remediação, Acompanhamento das Medidas de Engenharia e Acompanhamento das Medidas de Controle Institucional (CETESB, 2017).

O relatório de Instalação do Sistema de Remediação deve ser apresentado à CETESB após a instalação e partida do sistema de remediação, contendo o *as built* do sistema e seus componentes e a avaliação técnica em relação aos parâmetros definidos no projeto executivo. Após a instalação do sistema de remediação, a classificação da área pode ser alterada pela CETESB para ACRé (CETESB, 2017).

Periodicamente o responsável legal deve apresentar os relatórios de Avaliação do Desempenho do Sistema de Remediação, constatando os resultados do monitoramento da eficiência e eficácia do sistema, a remoção de massa do período, representação gráfica da evolução das plumas de contaminação relacionada ao sistema implementado, alterações de layout que tenham sido implementadas no sistema visando melhorias e/ou adaptações a situações específicas, períodos e motivos das paralisações do sistema, alterações nos cenários de risco que possam ter ocorrido em função de mudanças de layout, uso e ocupação local ou em seu entorno, descrição das manutenções do sistema e declaração do responsável legal com relação à inexistência de fontes primárias ativas (CETESB, 2017).

As medidas de engenharia e de controle institucional implementadas devem ser mantidas, acompanhadas e monitoradas durante seu período de vigência. Tais resultados devem ser apresentados nos relatórios de Acompanhamento das Medidas de Engenharia e de Acompanhamento das Medidas de Controle Institucional, conforme estabelecido no Plano de Intervenção. A partir desta avaliação poderá ser definida a necessidade de revisão das medidas adotadas ou o encerramento da aplicação dessas medidas (CETESB, 2017).

De acordo com a CETESB (2017), uma área contaminada (ACI, ACRI, ACRE ou Área Contaminada em Processo de Reutilização – ACRu) pode passar a ser classificada como Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME) nas seguintes situações:

- Constatação de SQIs abaixo de todas as concentrações máximas aceitáveis (CMAs) calculadas, considerando as vias reais e potenciais de exposição;
- Indicação, no Plano de Intervenção, da necessidade de implementar somente medidas de controle institucional e/ou de medidas de engenharia, e elas já tenham sido implementadas;
- Atingimento das metas de remediação pela aplicação de medidas de remediação, sem a necessidade de implementação de medidas de controle institucional e/ou de medidas de engenharia;
- Atingimento das metas de remediação pela aplicação de medidas de remediação, de forma que as medidas de controle institucional e/ou de medidas de engenharia, propostas no Plano de Intervenção, já tenham sido implementadas.

Após a execução de todas as campanhas previstas para a etapa de Monitoramento para Encerramento, caso os resultados indiquem os cenários descritos nos tópicos anteriores, a área será classificada, pela CETESB, como AR (CETESB, 2017).

4.3 Poluição ambiental em polos petroquímicos

No setor petroquímico é empregada uma grande variedade de processos ao longo da cadeia de produção, além de haver manuseio e geração de diversos produtos químicos e reagentes. Tal fato tem como consequência a produção de diferentes tipos de efluentes líquidos e resíduos sólidos e gasosos, que têm potencial de impactar todos os compartimentos ambientais, envolvendo fauna e flora, águas superficiais e subterrâneas, ar e solo, e ainda a saúde humana (SCHULTZ *et al.*, 2016).

Além disso, nas indústrias petroquímicas pode ocorrer o derramamento de produtos e reagentes durante o manuseio ou devido a falhas nas tubulações, conexões e equipamentos. Muitos desses produtos se caracterizam como inflamáveis, explosivos, tóxicos e/ou carcinogênicos, oferecendo risco também à saúde humana e a todos os compartimentos ambientais (MATOS, 2010).

As emissões atmosféricas são oriundas de equipamentos, como caldeiras e queimadores; de processos de troca de calor e regeneração catalítica; e das emissões fugitivas provenientes de bombas, válvulas, tanques de armazenamento, e operações de carga e descarga. Dentre os

poluentes liberados para a atmosfera ao longo da cadeia produtiva, estão o dióxido de carbono (CO₂), principal gás do efeito estufa; os óxidos de enxofre e de nitrogênio, responsáveis por causar chuva ácida e *smog* fotoquímico; compostos orgânicos voláteis (VOCs), compostos fenólicos, sulfito, cianeto, óleos, coque, rejeitos cáusticos, material particulado e monóxido de carbono (WIMMER, 2007; SCHULTZ *et al.*, 2016).

Os efluentes líquidos gerados no setor petroquímico contêm diluídos os poluentes gerados ao longo do processo de produção, sendo os contaminantes mais críticos identificados os fenóis, éteres, álcoois, ácidos, sulfetos de hidrogênio, óleos e graxas, sólidos suspensos, hidrocarbonetos polimerizados, hidrocarbonetos aromáticos (benzeno, tolueno, xileno), hidrocarbonetos alifáticos, hidrocarbonetos solúveis, sulfato de sódio, soda cáustica, sulfato de hidrogênio, metais pesados, óxidos de enxofre e nitrogênio, monóxido de carbono, cloro e cádmio. Tais efluentes, quando em contato com o solo, têm o potencial de gerar contaminação do solo e da água subterrânea (SCHULTZ *et al.*, 2016).

Conforme o Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo, os grupos de contaminantes identificados no solo e na água subterrânea dos empreendimentos que atuam no PPC são solventes aromáticos, fenóis, TPHs, solventes halogenados, PAHs e metais como grupos de contaminantes (CETESB, 2023).

No estado de São Paulo há um total de 6.892 áreas contaminadas e reabilitadas, sendo 190 áreas localizadas no município de Santo André e 52 em Mauá. Dentre essas áreas, 7 estão localizadas no PPC, sendo 3 delas classificadas como ACRE e 4 como AR (CETESB, 2023).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho compreendeu:

- Levantamento bibliográfico sobre a instalação e operação das indústrias petroquímicas ao redor do mundo, as etapas do gerenciamento de áreas contaminadas e a poluição ambiental decorrente das atividades do setor petroquímico (já apresentado no capítulo 4 – Revisão Bibliográfica).
- Estudo teórico sobre as técnicas de remediação que são utilizadas nos empreendimentos que operam no Polo Petroquímico de Capuava de acordo com o Relatório de Áreas Contaminadas e Reabilitadas no Estado de São Paulo elaborado pela CETESB.
- Levantamento de informações sobre o histórico de operação do Polo Petroquímico de Capuava, instalado na região do ABC no estado de São Paulo, e dados geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos e de uso e ocupação do solo da região em questão para caracterização da área. Tais informações foram pautadas em monografias, dissertações, teses, dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e mapas disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).
- Finalmente, foram relacionadas as técnicas apresentadas e seus fatores intervenientes com o meio físico da região onde se encontra o Polo Petroquímico de Capuava.

6 RESULTADOS

6.1 Remediação de áreas contaminadas por produtos petroquímicos

Pode-se categorizar a remediação ambiental de acordo com o seu local de aplicação, podendo ser *in situ*, onde a técnica é aplicada sem remoção física do meio contaminado; ou *ex situ*, quando ocorre remoção física do meio contaminado, podendo ser sub categorizada como *on site*, no qual o meio contaminado que foi removido é remediado na área onde ocorreu a contaminação, ou *off site*, quando o meio contaminado é enviado para tratamento em outra localidade. As tecnologias de remediação também podem ser definidas segundo o processo de tratamento, podendo ser biológico, físico-químico, solidificação/estabilização ou térmico (MAXIMIANO *et al.*, 2014).

O uso de apenas uma técnica de remediação dificilmente é capaz de remediar a área totalmente, portanto é comum serem empregadas diferentes técnicas conjuntamente. A escolha das melhores técnicas deve levar em consideração as propriedades físico-químicas das SQIs presentes, as informações do meio físico que está contaminado, a distribuição espacial da contaminação nos diferentes compartimentos, a interação entre as SQIs e o meio, a concentração dos contaminantes, a viabilidade técnica e econômica, e o uso passado, atual e futuro da área. O sucesso da etapa de remediação tem relação direta com a qualidade técnica das etapas envolvidas no Processo de Identificação de Áreas Contaminadas (MAXIMIANO *et al.*, 2014; ROSIN, 2021).

Os principais fatores de influência do processo de remediação estão associados aos parâmetros geotécnicos do meio e às condições de equilíbrio físico-químico e biológico do compartimento do meio físico de interesse. Os parâmetros geotécnicos correspondem a diversas informações relacionadas ao solo que contém a contaminação em subsuperfície e às outras camadas de solo que compõem o subsolo em estudo, tais como: composição textural, grau de saturação, a distribuição granulométrica, a heterogeneidade e anisotropia do meio, composição mineralógica e permeabilidade do solo. Os parâmetros físico-químicos envolvem o controle e conhecimento das variações de pH, Eh, conteúdo húmico, carbono orgânico total (COT), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) do meio (MAXIMIANO *et al.*, 2014).

De acordo com o Relatório de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo, elaborado pela CETESB, nas ACRes localizadas na área do Polo Petroquímico de Capuava são adotadas como medidas de remediação as técnicas de oxidação química, redução química,

remoção de solo, P&T, SVE, *air sparging*, MPE e recuperação de fase livre (FL) (CETESB, 2023).

6.1.1 Oxidação química *in situ*

A técnica de oxidação química também é chamada de *In situ Chemical Oxidation* (ISCO), e consiste na injeção de um oxidante químico cuja função é promover a transformação dos contaminantes em produtos menos nocivos ou sua mineralização. Essa técnica é utilizada no tratamento de solo, sedimentos, lama, água subterrânea, água superficial e lixiviado (ROSIN, 2021; MAXIMIANO *et al.*, 2014)

Os agentes oxidantes mais utilizados na técnica ISCO são peróxido de hidrogênio, reagente Fenton (peróxido de hidrogênio mais catalisador de ferro), persulfato, ozônio e permanganato. Para uma escolha efetiva do agente oxidante deve-se levar em consideração seu potencial de oxidação para que seja suficiente para promover a reação, a viabilidade de sua introdução no meio a ser remediado, a interação desse agente com o contaminante, a estrutura e concentração do contaminante e as condições físico-químicas e biológicas do meio (MAXIMIANO *et al.*, 2014).

A oxidação química apresenta maior eficiência, definida como massa de contaminante transformada por massa de oxidante, na remoção das fases dissolvida e adsorvida na área fonte. Portanto, a técnica é indicada para remediação de áreas pequenas, onde a massa de contaminante é mais concentrada, para tratar contaminantes da área fonte na zona saturada e franja capilar. Em locais onde é necessário o tratamento da área fonte na zona não saturada, o mais indicado é que outra técnica de remediação seja empregada, como por exemplo, a extração de vapores do solo. Na existência de produto em fase livre, outras técnicas de remediação têm sido conduzidas anteriormente à oxidação química para que o custo da remediação seja viável, evitando-se o uso de grande quantidade de oxidante para consumir o produto bruto (SILVA, 2014).

A remediação com o uso de agentes oxidantes ocorre através da injeção desses produtos químicos em solução no meio a ser remediado. Existem diferentes técnicas que possibilitam essa injeção, mas as mais utilizadas são os poços de injeção (PIs) vertical ou ponteiros de injeção (injeção direta). A primeira requer a instalação de poços temporários ou permanentes, de forma que o oxidante é injetado através de uma mangueira ligado ao poço por ação da gravidade ou a baixas pressões, e a velocidade de adição é controlada pela difusão do líquido no solo. Na técnica de injeção direta, são cravadas ponteiros de injeção no solo na profundidade

correspondente à região de maior concentração de contaminantes, de forma que o oxidante é injetado por ação da gravidade ou aplicação de pressão. Nos dois casos, permanganato, ozônio e persulfato são agentes oxidantes frequentemente utilizados (MAXIMIANO et al., 2014).

Ambas as técnicas de injeção apresentam boa flexibilidade quanto ao escalonamento de diferentes zonas de tratamento, facilidade de aquisição de materiais, baixos custos de infraestrutura e a facilidade de combinar diferentes técnicas, que visam melhorar a dispersão dos oxidantes (MAXIMIANO et al., 2014).

As principais vantagens que a técnica ISCO oferece envolvem a possibilidade de realizar a degradação dos contaminantes *in situ*; a degradação dos contaminantes apresenta alta eficiência e ocorre de maneira rápida; baixa produção de emissões gasosas (com exceção do peróxido de hidrogênio); redução de custos de operação e monitoramento quando comparada a outras tecnologias que requerem a instalação de equipamentos mais complexos, como MPE, SVE e Extração em Duas Fases (DPE – *Dual Phase Extraction*); é um método compatível com pós-tratamento de atenuação natural; pode colaborar com a biodegradação aeróbica e anaeróbica; ausência de contato direto entre trabalhadores e contaminantes; não requer a realização de grandes escavações e obras civis; e no caso de utilizar o ozônio como agente oxidante, o principal subproduto é o oxigênio, que não é poluente e é encontrado comumente no solo. Em contrapartida, a técnica pode não ser efetiva na degradação de contaminantes localizados em áreas de baixa permeabilidade, pode ocorrer o retorno dos contaminantes após o tratamento, a pluma de contaminação pode sofrer alterações após o tratamento, o manuseio de oxidantes pode trazer riscos aos operadores, os agentes oxidantes apresentam curta meia vida, podem existir caminhos de fluxos preferenciais em subsuperfície que podem interferir na eficiência da remediação e podem ocorrer alterações significativas na geoquímica do aquífero (USEPA, 2004; CARAM; BOSCOV, 2019).

As Tabelas 2 e 3 apresentam a performance dos agentes oxidantes para diferentes tipos de contaminantes.

Tabela 2: Performance de agentes oxidantes para diferentes tipos de contaminantes

Oxidante e meio de ativação	Permanganato	Peróxido de hidrogênio			Percarbonato	Persulfato						Ozônio	
		ferro quelado	Nada ^a	ferro/ácido		pH alcalino	Témico	ferro	ferro quelado	Nada	peróxido	somente ozônio	Com peróxido
Misturas de contaminantes comuns													
Hidrocarbonetos leves ^b	Razoável	Bom	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Bom	Excelente	Bom	Bom
Hidrocarbonetos pesados ^c	Ruim	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Bom	Ruim	Razoável	Ruim	Bom	Razoável	Razoável
Creosoto, alcatrão, resíduos de planta de gás, outros hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs)	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Ruim	Bom	Bom	Bom
PCBs ou PBBs ^d	N/R ^e	Razoável	Ruim	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Ruim	Ruim	N/R	Razoável	N/R	N/R
Dioxinas e Furanos	N/R	Razoável	Ruim	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Ruim	Ruim	N/R	Razoável	N/R	N/R
Combustíveis comuns e produtos de processo													
Benzeno	N/R	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Tolueno	Bom	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Etilbenzeno	Bom	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Xilenos	Bom	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Éter metil-terc-butilíco (MTBE)	Ruim	Bom	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Bom	Bom
Álcool terc-butilíco (TBA)	N/R	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Ruim	Bom	Razoável	Razoável
Solventes clorados, estabilizantes e seus produtos de degradação													
Percloroeteno (PCE)	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Tricloroeteno (TCE)	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Dicloroetenos ^f	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Cloreto de Vinila	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Tetracloroetanos ^g	N/R	Razoável	Razoável	Ruim	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável
Tricloroetanos ^h	N/R	Bom	Bom	Ruim	Razoável	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Ruim	Bom	Bom	Bom
Dicloroetanos ⁱ	N/R	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Ruim	Bom	Bom	Bom
Cloroetano	N/R	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Ruim	Bom	Bom	Bom
Tetracloreto de carbono	N/R	Excelente	Bom	Ruim	Razoável	Excelente	Razoável	N/R	N/R	N/R	Excelente	N/R	N/R
Clorofórmio	N/R	Bom	Bom	Ruim	Razoável	Bom	N/R	N/R	N/R	N/R	Bom	Ruim	Ruim
Diclorometano	N/R	Bom	Razoável	Ruim	Razoável	Razoável	N/R	N/R	N/R	N/R	Ruim	Ruim	Ruim
Monoclorometano	N/R	Bom	Razoável	Ruim	Razoável	Bom	Razoável	Ruim	Ruim	Ruim	Bom	Ruim	Ruim
1-4-Dioxano		Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Bom	Bom

Fonte: Maximiano (2014).

Tabela 3: Performance de agentes oxidantes para diferentes tipos de contaminantes

Oxidante e meio de ativação	Permanganato	Peróxido de hidrogênio			Percarbonato	Persulfato						Ozônio	
		ferro quelado	Nada ^a	ferro/ácido		pH alcalino	Témico	ferro	ferro quelado	Nada	peróxido	somente ozônio	Com peróxido
Cloretos aromáticos													
Pentaclorofenol	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Bom	Bom
Tri- e tetraclorofenol	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Bom	Bom
Cloro- e diclorofenol	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Bom	Bom
Clorobenzeno	Ruim	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Razoável	Razoável
Di- e triclorobenzenos	Ruim	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Excelente	Excelente	Bom	Bom	Bom	Excelente	Razoável	Razoável
Hexaclorobenzeno	N/R	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Razoável	Razoável
Explosivos, energéticos e produtos de degradação													
RDX e HMX	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
TNT e DNT	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Bom	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim	Bom	Ruim	Ruim
Di- e trinitrobenzeno	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Ruim	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável	Bom	Razoável	Razoável
Mono- e dinitrofenol	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom

Fonte: Maximiano (2014).

6.1.2 Redução química

Também conhecida por *In Situ Chemical Reduction* (ISCR), a técnica de redução química envolve a aplicação de um agente redutor diretamente no meio contaminado, podendo ser solo ou água subterrânea, através de poços ou ponteiros de injeção, para reduzir óxidos de ferro III, presentes naturalmente no aquífero sedimentar, e transformá-los em ferro II. Na presença do ferro bivalente, metais e VOCs presentes no meio sofrem redução e se transformam em subprodutos menos tóxicos ou não tóxicos (CUNHA, 2010).

O ferro compreende cerca de 5% em massa das rochas, sendo o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre. Para que o processo de ISCR seja aplicado, é necessário que a ocorrência natural do ferro III no meio a ser tratado seja de, no mínimo, 0,05% da fração do solo total. Diante da abundância do ferro na superfície terrestre e da necessidade de haver uma fração pequena desse elemento no solo, sugere-se que este método pode apresentar boa aplicabilidade (CUNHA, 2010).

O ferro metálico é um agente redutor relativamente forte, com um potencial padrão de oxirredução de -0,44 V. Por apresentar essa característica, ele pode atuar na redução de uma série de contaminantes, como pesticidas, compostos benzenoclorados, etanoclorados e etenoclorados, bifenilas policloradas (PCBs) e metais pesados (MAXIMIANO, 2014).

Esta técnica se mostra eficiente quando aplicada para o tratamento de meios contaminados por compostos organoclorados, uma vez que o ferro bivalente elimina os cloretos desses compostos sem a acumulação de produtos da degradação sequenciada. Além disso, o método também é indicado para reduzir as concentrações de metais, uma vez que promove a precipitação, coprecipitação e adsorção dos mesmos, sendo possível imobilizá-los no solo do aquífero (CUNHA, 2010; GODOY, 2014).

Como principais vantagens da técnica ISCR estão a capacidade dos agentes redutores se manterem em suspensão por maiores períodos, favorecendo uma maior mobilidade das partículas no meio; a possibilidade desses agentes atingirem maiores distâncias no subsolo, já que podem ser transportados em meios porosos e através do fluxo de água subterrânea, aumentando o raio de influência da técnica; e a possibilidade de aplicação direta em fontes de contaminação. Além disso, observa-se um menor tempo de remediação frente à rápida degradação de contaminantes e a operação dos sistemas desse tipo pode ser passiva, o que requer baixo consumo energético, parâmetros que se mostram positivos quanto à redução de custos de operação e monitoramento comparada a outras tecnologias que requerem a instalação de equipamentos mais complexos, como MPE, SVE e DPE (MAXIMIANO et al., 2014).

Em contrapartida, o fato de a ISCR ser uma tecnologia relativamente recente faz com que ela ainda apresente algumas limitações que envolvem as dificuldades de transferência dos resultados de laboratório para o campo, a dificuldade de prever a reatividade e movimento das partículas no meio, a possibilidade de acúmulo de intermediário da reação e a necessidade de aprimoramento de tecnologias para aplicação em campo. Além disso, a técnica pode não apresentar custo-benefício para plumas grandes e dispersas (MAXIMIANO et al., 2014).

6.1.3 *Remoção de solo*

A técnica de remoção de solo consiste na escavação e remoção do solo contaminado, e requer o transporte, tratamento *off site* ou *on site* e disposição final adequada do solo removido. Como principal vantagem está a eliminação dos principais focos de contaminação da zona não saturada, porém a prática exige que os procedimentos de segurança sejam seguidos para que não ocorra a propagação da contaminação para outra área e a consequente intensificação da exposição ao risco (CORREA, 2017).

Por envolver custos de remoção, transporte, tratamento e disposição final, opta-se por adotar a técnica quando é detectada a presença de resíduos perigosos ou solos altamente contaminados, ou quando análise e estudos demonstram a impossibilidade de aplicação de outras técnicas de remediação (SILVA, 2020).

O tratamento *on site* dos solos removidos apresenta custo usualmente inferior em comparação ao seu tratamento *off site*. Porém, durante o período de tratamento, as áreas envolvidas devem sofrer restrições de uso e ocupação (SILVA, 2020).

6.1.4 *Pump & treat*

Trata-se da técnica conhecida, em português, por bombeamento e tratamento. O método de P&T é um dos mais antigos e amplamente utilizados para o tratamento de águas subterrâneas contaminadas devido à baixa complexidade de operação. Consiste na remoção física da fase livre presente em subsuperfície ou da água subterrânea contaminada (fase dissolvida) até a superfície, por meio de poços de bombeamento, para posterior tratamento. Após o devido tratamento, a água bombeada até a superfície pode ser devolvida ao subsolo ou descartada em um corpo hídrico receptor (CORREA, 2017; ROSIN, 2021).

Este método pode ser utilizado tanto para remoção da massa de contaminante quanto para prevenir a migração da pluma de contaminação. Quando o objetivo for a remoção de

massa, os poços de bombeamento devem ser instalados na área de maior concentração dos contaminantes, ou seja, no centro da pluma de contaminação. Caso o objetivo seja conter a migração do contaminante, o ideal é que os poços de bombeamento estejam localizados nos limites da pluma de contaminação, junto à frente de expansão dela (CORREA, 2017).

Esta técnica é mais eficiente quando utilizada na remoção de grandes volumes de contaminantes no início do tratamento, pois após determinado período, a taxa de remoção dos contaminantes tende a um valor baixo e a concentração dos contaminantes tende a se estabilizar. Além disso, o P&T não é recomendado para solos heterogêneos e é mais eficaz quando utilizado em conjunto com outras técnicas (CORREA, 2017; ROSIN, 2021).

As principais vantagens envolvidas em projetos de remediação com essa técnica englobam os custos reduzidos para implantação em comparação à implantação de barreiras físicas; e a flexibilidade do projeto, tendo em vista que é possível adicionar poços de extração à malha posteriormente. Entretanto, se for utilizada para tratar uma área com concentrações baixas de contaminação, sua eficiência será baixa e demandará tempos longos para atingir níveis de contaminação aceitáveis, fatores que estão associados ao alto consumo energético e investimento financeiro (SILVA, 2020).

6.1.5 *Extração de vapores do solo*

Trata-se de um método físico-químico que atua de forma restrita às zonas não saturadas através da aplicação de vácuo em poços de extração (PEs) instalados na região não saturada para promover a circulação do ar no subsolo e consequente volatilização dos contaminantes. Este processo normalmente inclui um sistema de tratamento de efluentes gasosos com posterior dispersão para a atmosfera (ROSIN, 2021; MAXIMIANO *et al.*, 2014).

Essa técnica é adequada para a extração de VOCs e compostos orgânicos semivoláteis (SVOCs – *Semi-volatile Organic Compounds*), ou compostos não voláteis que sejam biodegradáveis aerobiamente, pois devido ao aumento da concentração de oxigênio dissolvido, ocorre simultaneamente um aumento da biodegradação aeróbica dos contaminantes (CORREA, 2017).

De maneira geral, a extração de vapores do solo se mostra eficiente quando as SQIs possuem pressão de vapor superior a 0,5 mmHg e constante de Henry acima de 0,01. Também é possível realizar a injeção de ar quente para volatilização de produtos mais pesados de petróleo. Entretanto, o custo energético para o aquecimento pode tornar a técnica, aplicada desta maneira, economicamente inviável (ROSIN, 2021).

Os sistemas de remediação que realizam esse processo são conhecidos como *Soil Vapor Extraction* (SVE). Sua instalação e operação são simples, estudos evidenciam um curto período de tratamento (6 meses a 2 anos), a técnica pode ser aplicada sob edificações e outros locais que não podem ser escavados e apresenta alta capacidade de associação com outras técnicas. Contudo, não é uma técnica apropriada para ser utilizada em áreas onde o nível do lençol freático seja superior a 1 m, e devem ser realizadas considerações acerca de sua aplicação em áreas com nível d'água superior a 3 m, sob edificações e outros locais que não podem ser escavados (SILVA, 2020; HANSEN, 2013).

6.1.6 *Air sparging*

Consiste em uma técnica onde é realizada a injeção de ar na zona saturada, o que gera o aumento da área de superfície da água contaminada exposta ao ar, facilitando a transferência de contaminantes em fase residual e dissolvida para a fase de vapor. Trata-se de uma tecnologia que envolve tratamento físico-químico para águas subterrâneas, águas superficiais e lixiviado (ROSIN, 2021; MAXIMIANO *et al.*, 2014).

Essa tecnologia é indicada para tratamento de solos com alta permeabilidade e elevada porosidade, e que estejam contaminados por VOCs, que apresentam alta volatilidade. A profundidade da contaminação e do nível da água subterrânea podem limitar a aplicabilidade e eficiência da técnica, e pode-se realizar a injeção de ar quente para maior remoção de contaminantes. Entretanto, o custo energético para o aquecimento do ar pode tornar a técnica, aplicada desta maneira, economicamente inviável (ROSIN, 2021).

Observa-se um aumento na eficiência da técnica de remediação *air sparging* quando ela é combinada a um sistema do tipo SVE (ROSIN, 2021).

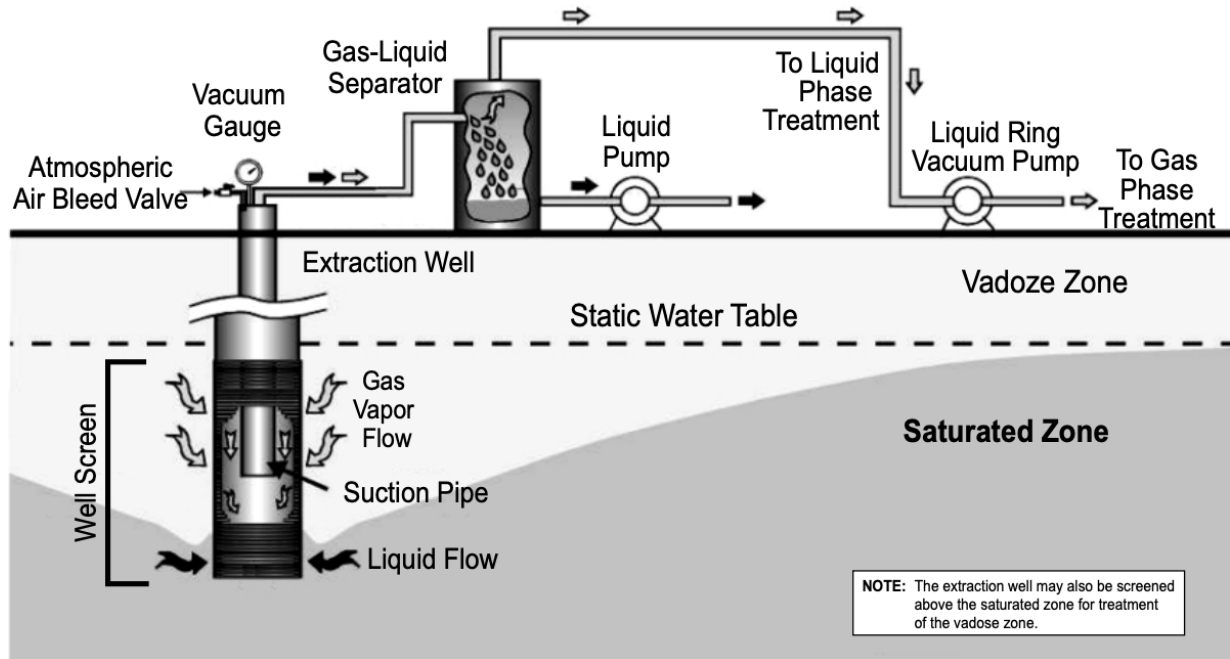
A implementação de um sistema de *air sparging* requer o uso de equipamentos de simples instalação e que já estão prontamente disponíveis no mercado, por isso essa etapa demanda um baixo custo comparada a outras técnicas que necessitam de equipamentos mais complexos para operação dos sistemas. Porém, os fatores chave para a definição do custo de um projeto envolvem a extensão e as dimensões da pluma de contaminação; a profundidade do nível d'água (NA); e a heterogeneidade do meio, que pode impactar a distribuição do ar injetado (PAPADOPOULOS & VATSERIS, 2005).

6.1.7 Extração multifásica

Também conhecida por *Multi Phase Extraction* (MPE), a extração multifásica é uma técnica de remediação que consiste, basicamente, na combinação das técnicas de P&T e SVE. Um sistema do tipo MPE atua através da aplicação de vácuo junto ao nível d'água do aquífero em poços de extração instalados no interior e nas bordas da pluma de contaminação, de forma a interceptar a zona não saturada, franja capilar e zona saturada, promovendo a formação de um escoamento multifásico em subsuperfície, com a remoção de vapores orgânicos presentes na zona não saturada, fase livre sobrenadante ao aquífero ou aprisionada na zona não saturada do solo e água subterrânea contendo compostos orgânicos dissolvidos. Os efluentes removidos devem ser direcionados para devido tratamento e destinação final (RUAS *et al.*, 2018; CORREA, 2017).

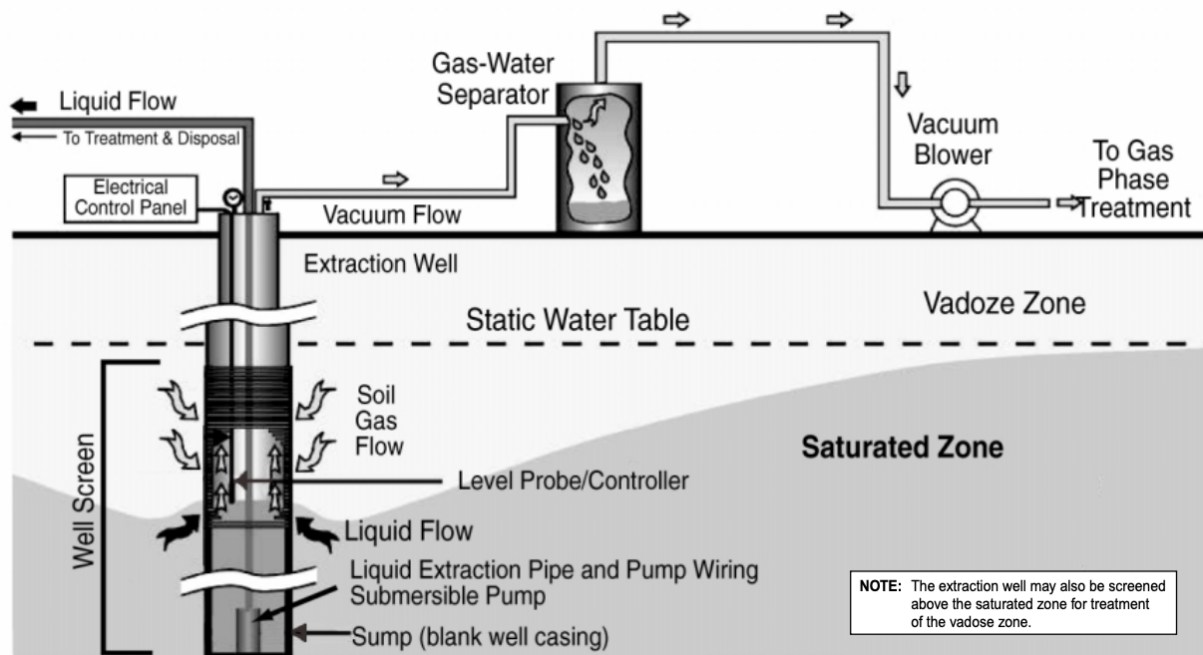
A tecnologia MPE pode ser aplicada em três modalidades: *Two Phase Extraction* (TPE), DPE e *Bioslurping*. Um sistema TPE opera com um tubo pescador em cada PE, que é posicionado acima do nível de água e extrai, dentro de uma mesma tubulação, gás e líquido até a superfície, conforme a Figura 2. Na modalidade DPE, gases e líquidos são extraídos e transportados até a superfície em tubulações diferentes a partir da instalação de uma bomba submersa para o bombeamento da fase líquida e outra bomba na superfície para a geração do vácuo, conforme Figura 3. A configuração *Bioslurping* é uma variação da TPE, de forma que o tubo pescador é posicionado ligeiramente acima ou abaixo do nível da água subterrânea, visando a maximizar a extração de produto em fase livre (CORREA, 2017).

Figura 2: Esquema de um sistema MPE ajustado na modalidade TPE



Fonte: US ARMY (1999).

Figura 3: Esquema de um sistema MPE ajustado na modalidade DPE



Fontes: US ARMY (1999).

Por promover a remoção simultânea das fases vapor, dissolvida e livre, a tecnologia MPE possui potencial aplicação na remediação das zonas vadosa e saturada, em cenários de contaminação com hidrocarbonetos que se particionam no ar, na água e no solo em subsuperfície. Além disso, por promover uma aeração da zona não saturada, ocasionada pela

indução do fluxo de ar das áreas adjacentes ao poço de extração, o sistema MPE pode promover, concomitantemente, uma estimulação na biodegradação aeróbia (RUAS *et al.*, 2018).

A técnica apresenta-se como efetiva para extração de contaminantes em fase livre, dissolvida, gasosa e residual, mesmo em solos de permeabilidade moderada a baixa; porém, os custos mostram-se superiores em comparação às técnicas apresentadas anteriormente, uma vez que sistemas desse tipo requerem equipamentos e acessórios complementares, como bomba de vácuo ou ventilação e válvula que dá suporte ao coletor de vácuo (SILVA, 2020).

6.1.8 Recuperação de fase livre

A técnica de recuperação de fase livre consiste em remover a fase livre presente no subsolo. Porém, o volume de produto em fase livre recuperável é consideravelmente menor que o volume de produto aportado na área, uma vez que parte desse produto pode ter sido biodegradado, volatilizado, solubilizado e até mesmo ter ficado retido nas partículas de solo em decorrência das forças capilares (MILLER, 2001).

Uma das formas de remover a fase livre é através do uso de *skimmers*, que são equipamentos que flutuam na interface entre a água e o produto, removendo apenas a FL. Estes equipamentos podem atuar de duas formas: por densidade (a separação ocorre através de um orifício existente no equipamento) ou por afinidade com as moléculas do produto (favorecida pelas membranas oleofílicas que fazem parte de sua estrutura) (MILLER, 2001).

Este método é indicado na fase inicial de projetos de remediação, em áreas onde o volume de fase livre no subsolo é grande, e pode operar da seguinte maneira: os *skimmers* são instalados em poços com diâmetro a partir de 2", onde ocorre a separação da fase livre da água, com posterior bombeamento da fase livre com o uso de bombas a vácuo pneumáticas ou elétricas. O produto removido é armazenado em tambores que, depois de atingirem sua capacidade total, são destinados para seu devido descarte (MILLER, 2001).

Outra maneira de aplicar a técnica de recuperação de fase livre é através do rebaixamento da água subterrânea. Neste caso, pode-se realizar o bombeamento simples ou o bombeamento duplo. No primeiro caso há extração de fase livre e água subterrânea simultaneamente através de uma bomba instalada no poço de extração cuja captação fica posicionada na profundidade onde se deseja atingir o rebaixamento. O efluente removido é direcionado para a caixa separadora água/óleo (MILLER, 2001).

O sistema de bombeamento duplo opera com uma bomba responsável por extrair apenas fase livre e outra para bombeamento de água subterrânea, ambas instaladas em um mesmo poço.

A bomba que capta a água é responsável pelo rebaixamento do NA, e atua abaixo da interface óleo/água. Um *skimmer* é posicionado na interface óleo/água, definida no nível dinâmico gerado pelo rebaixamento, e a outra bomba realiza a extração do produto, dispensando a necessidade de uma caixa separadora (MILLER, 2001).

O sistema de bombeamento simples é indicado para áreas com pequenas quantidades de fase livre no subsolo, cujo aquífero tenha transmissividade baixa ($T < 0,5 \text{ m}^2/\text{h}$) a média ($0,5 \text{ m}^2/\text{h} \leq T \leq 13 \text{ m}^2/\text{h}$), enquanto o sistema de bombeamento duplo mostra-se mais eficiente em cenários onde há maior quantidade de fase livre, cuja transmissividade do aquífero varie de média ($0,5 \text{ m}^2/\text{h} \leq T \leq 13 \text{ m}^2/\text{h}$) a alta ($T > 13 \text{ m}^2/\text{h}$) (MILLER, 2001).

6.2 Polo Petroquímico de Capuava

6.2.1 História

Em 1954 foram iniciadas as operações da Refinaria de Capuava (RECAP), instalada no município de Mauá (SP), na região do Grande ABC, e pertencente à PETROBRÁS. O refino do petróleo levou indústrias petroquímicas a se instalarem no entorno da refinaria ao longo dos anos, formando um complexo conhecido por Polo Petroquímico de Capuava. Suas atividades iniciaram-se em 1972, sendo a primeira central petroquímica do Brasil, responsável por produzir produtos petroquímicos (etileno, propileno, polietileno etc.), que são as matérias primas principais para fabricação de resinas, borrachas, tintas e plásticos (PETROBRAS, 2023; AZUAGA, 2007).

O PPC está localizado entre os municípios de Mauá e Santo André, na Região Metropolitana de São Paulo, e faz divisa com os Distritos Administrativos de São Rafael, São Mateus e Sapopemba, no município de São Paulo (BATISTA et al., 2023). É formado por 14 empresas de primeira e segunda geração, que alimentam outras indústrias químicas e petroquímicas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (COFIP, 2023).

A principal matéria prima utilizada pelo Polo Petroquímico de Capuava é a nafta, a qual é fornecida não só pela RECAP, mas também por outras refinarias da PETROBRAS, como a Refinaria de Paulínia (REPLAN) (Paulínia), Refinaria do Vale do Paraíba (REVAP) (São José dos Campos) e RPBC (Cubatão), e transportada por dutos vindos diretamente de tais unidades (AZUAGA, 2007).

6.2.2 Caracterização da região

A região do Grande ABC é assim denominada desde os anos 1950 e representa um conjunto de sete municípios localizados a sudeste da cidade de São Paulo. Trata-se de uma região que compõe a RMSP, e engloba as cidades de Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra (FERREIRA, 2015).

São Bernardo do Campo, Santo André e Diadema são as cidades mais populosas do Grande ABC, ou seja, são as que possuem as maiores quantidades de habitantes em número absoluto, enquanto os maiores índices de densidade demográfica, ou seja, a maior quantidade de habitantes por quilômetro quadrado, encontram-se em Diadema, São Caetano do Sul e Mauá (IBGE, 2024). Por estarem 100% em áreas de Mananciais, a população de Ribeirão Pires e de Rio Grande da Serra é relativamente reduzida (FERREIRA, 2015).

O município de Santo André possui cerca de 175 km² e é dividido em duas zonas: a área urbana e a área de mananciais. A área urbana ocupa 38,1% da área e 61,9% da área do município encontra-se em área de proteção ambiental (FERREIRA, 2015). O município abriga aproximadamente 749 mil habitantes, apresentando uma densidade demográfica de 4.260,5 habitantes/km² (IBGE, 2024).

O município de Mauá abriga cerca de 418 mil habitantes em uma área de aproximadamente 62 km², possuindo uma densidade demográfica de 6.753,01 habitantes/km² e com 68,7% de seu território urbanizado (IBGE, 2024).

Considerando a área total do polo petroquímico, 87,7% dela está situada no município de Mauá, e 12,3% do total está localizada em Santo André (ALVES, 2020).

6.2.2.1 Uso e ocupação do solo

A ocupação do entorno da área onde hoje está instalado o PPC iniciou-se em 1954, juntamente à implantação da RECAP, e intensificou-se em 1970, quando as indústrias petroquímicas foram instaladas na região. A ocupação dessas áreas se deu, principalmente, pelos funcionários das empresas do polo, e culminou na remoção da vegetação que existia na área e na canalização de corpos d'água (ALVES, 2020).

Considerando o zoneamento dos municípios de Santo André e Mauá, a porção do PPC instalada em Santo André situa-se ao longo da Avenida Presidente Costa e Silva, e está localizada em Macrozona Urbana, caracterizada por apresentar diferentes graus de consolidação e infraestrutura básica instalada e destinar-se a concentrar o adensamento urbano.

Dentro da Macrozona Urbana, a área pertence à subdivisão Zona Exclusivamente Industrial (ZEI), que abrange as áreas onde são realizadas atividades industriais de grande porte e correlatas, com potencial de impacto ambiental significativo (SANTO ANDRÉ, 2014; ALVES, 2020).

A área do PPC que ocupa o município de Mauá está em Macrozona Adensável, caracterizada por propiciar a requalificação, o ordenamento e o direcionamento da urbanização do território, em áreas onde a infraestrutura está implantada e suporta maior adensamento. Dentro da Macrozona Adensável, a área pertence à subdivisão Zona de Desenvolvimento Econômico (ZDE), que abrange áreas destinadas onde há estímulo e incentivo para o desenvolvimento econômico local com sustentabilidade (MAUÁ, 2007; ALVES, 2020).

A Tabela 4 apresenta os principais usos e ocupações do solo no entorno da área do PPC, considerando um raio de 1 km dos limites do complexo, e a Figura 4 apresenta a situação espacial descrita na Tabela 4.

Tabela 4: Principais usos e ocupações do solo no entorno do PPC

Item	Uso e ocupação do solo
Atividades econômicas	Industrial, residencial e comercial
Acessibilidade/mobilidade	Linha turquesa da CPTM (Estação Capuava e Estação Mauá), Av. Pres. Costa e Silva, Av. dos Estados, Av. Alberto Soares Sampaio, SPA 086/21 (Rodoanel Mário Covas trecho sul, Interligação com a Av. Papa João XXIII), Av. Ayrton Senna da Silva, R. Oscarito, Rua Oratório, Av. Adélia Chohfi, Av. das Indústrias, Estrada da servidão.
Principais corpos d'água	Rio Tamanduateí, Córrego do Oratório (divisa entre Mauá e São Paulo), Córrego Itrapuã (divisa entre Santo André e Mauá).
Zonas especiais	Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS): Jardim Oratório (Mauá) e Conjunto Habitacional dos Estados (Santo André) Zona Especial de Interesse Ambiental (ZEIA) dentro do PPABC (Mauá).

Fonte: ALVES (2020).

42

Alves (2020) afirma que 71,7% da área em questão é ocupada por indústrias, o que corresponde a 5,17 km². A ZEIA abrange 16,7% da área (1,21 km²), enquanto 0,62 km² (8,6%) não estão ocupados e 0,21 km² (2,9%) estão ocupados por residências e comércios.

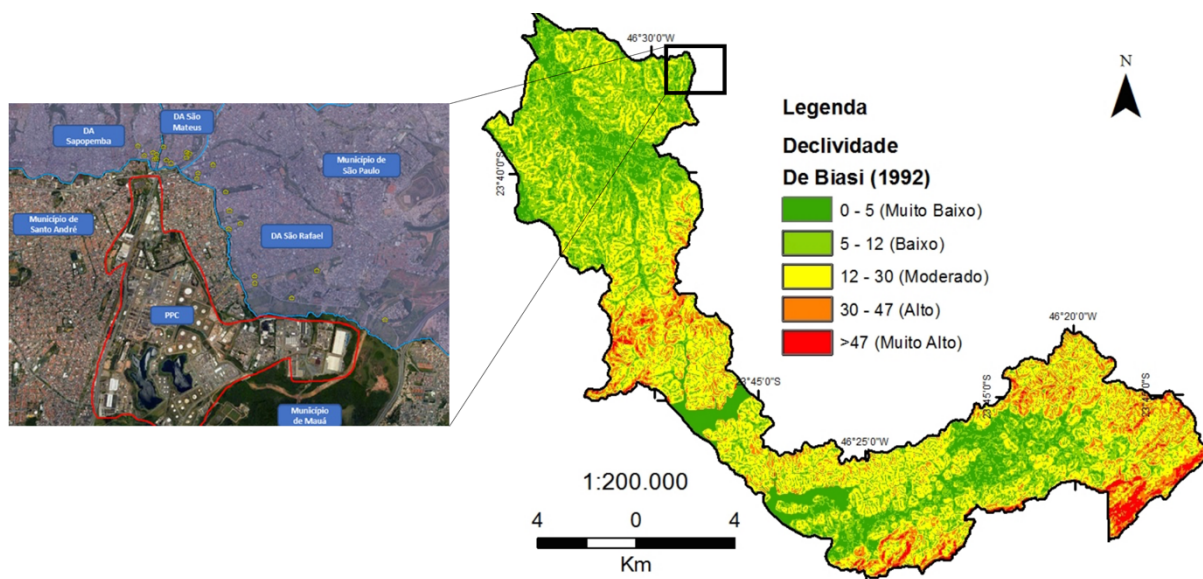
Uma ZEIS corresponde à porção do território destinada à moradia digna para população de baixa renda através de melhorias urbanísticas, recuperação ambiental e regularização fundiária de assentamentos precários e irregulares (SMUL, 2024). Nas ZEIS localizadas no entorno do PPC observa-se que, ao longo dos anos, a ocupação foi desordenada e irregular em faixas de servidão de linhas de transmissão e topos de morros (ALVES, 2020).

A ZEIA abrange uma porção do território destinada à preservação e proteção do patrimônio ambiental, cujos principais atributos são a existência de significativos maciços remanescentes de vegetação nativa com diferentes graus de regeneração, alto índice de permeabilidade e que prestam relevantes serviços ambientais, como a conservação da biodiversidade, o controle de inundação e a regulação do microclima dos locais onde se inserem (MAUÁ, 2007). A ZEIA localizada no interior do PPC abrange uma área de mata e capoeira com uma área total com cerca de 1,2 km². (ALVES, 2020).

6.2.2.2 Caracterização geológica, geotécnica e hidrogeológica

De acordo com Soares (2017), na porção sul do município de Santo André e nas margens da Represa Billings são observadas grandes variações da declividade do terreno, constatando-se desde declividades baixas (0 a 5%) a muito altas (acima de 47%). A Figura 5 apresenta a distribuição dessas declividades (SOARES *et al*, 2017). Na porção norte do território, onde está localizado o PPC, há o predomínio de declividades baixas, variando de 0 a 12%.

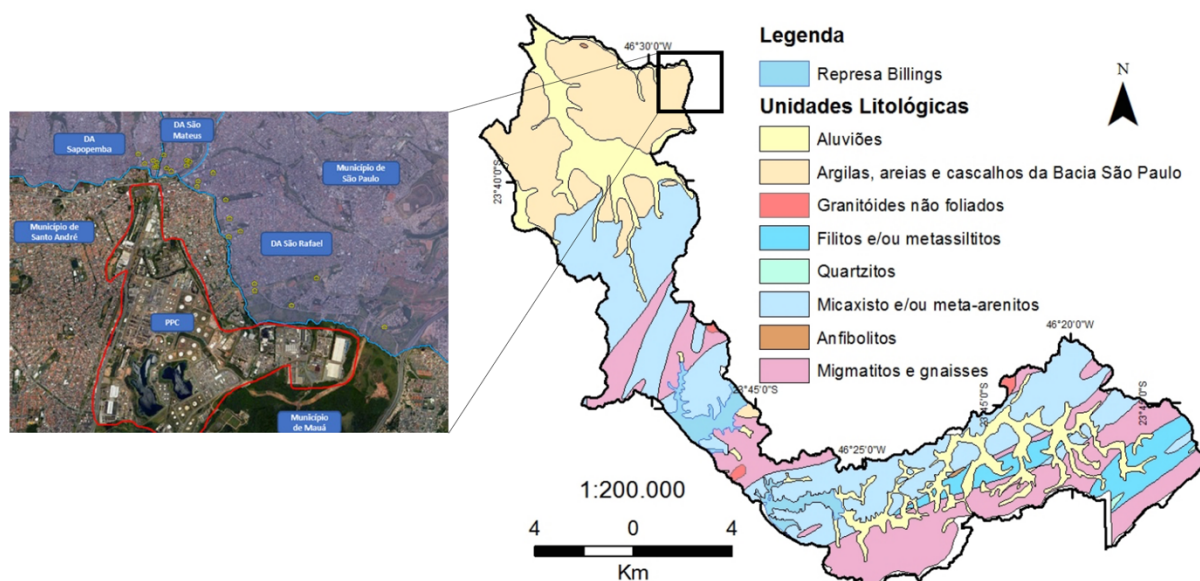
Figura 5: Mapa de declividade do município de Santo André



Fonte: Adaptado de Soares *et al* (2017).

Na extensão do território de Santo André há a presença de uma grande variedade de litotipos, como Depósitos Quaternários e Aluviões (argilas, areias e cascalhos); Rochas Sedimentares Inconsolidadas (conglomerados, arenitos, diamictitos e lamitos; micaxisto), Rochas Metamórficas (migmatitos e gnaisses graníticos, filitos, anfibolitos, metabasitos, metadiabásio, metagabro, milonitos, ultramilonitos, granitoides foliados, quartzitos) e Rochas Ígneas (granito, biotita granito, granodiorito, monzogranito). Na região do PPC, o litotipo predominante abrange argilas, areias e cascalhos da Bacia São Paulo, conforme Figura 6 (SOARES *et al*, 2017).

Figura 6: Mapa de litologia do município de Santo André

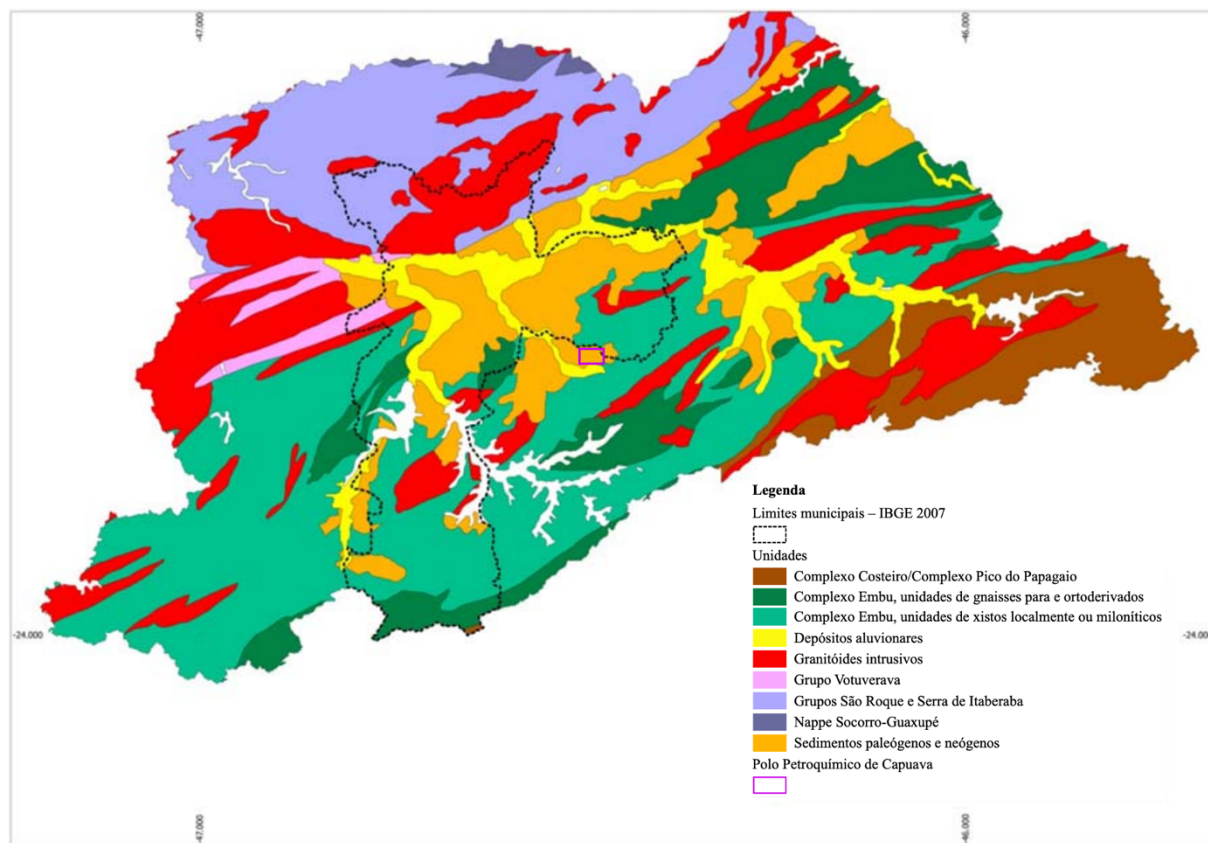


Fonte: Adaptado de Soares *et al* (2017).

Não foram encontradas em literatura informações acerca da litologia e da declividade no município de Mauá. Considerando os conhecimentos que a autora tem da área, adota-se neste trabalho que as informações de Santo André sobre tais parâmetros também são válidas para a porção do PPC em Mauá.

A Bacia de São Paulo se desenvolveu sobre gnaisses, migmatitos e rochas metamórficas de baixo a médio grau, e abrange a porção leste do Estado de São Paulo. É caracterizada pela heterogeneidade litológica em decorrência da sedimentação de depósitos de leques aluviais associados à planície aluvial e sedimentos lacustres. Seu embasamento está inserido em um complexo sistema influenciado por várias entidades tectônicas, conforme a Figura 7 (GUERGUEIRA, 2013).

Figura 7: Mapa geológico da RMSP com destaque para o embasamento



Fonte: Adaptado de Gurgueira (2013).

Na região do Polo Petroquímico de Capuava e em seus arredores observa-se a ocorrência de sedimentos paleógenos e neógenos, que correspondem à deposição paleógena do Grupo Taubaté (Formação Resende, Formação Tremembé e Formação São Paulo) e neógena da Formação Itaquaquecetuba. Sendo assim, a região apresenta os leques aluviais relacionados à

Formação Resende, os depósitos lacustres pouco expressivos relacionados à Formação Tremembé e depósitos fluviais relacionados às formações Resende, São Paulo e Itaquaquecetuba (GUERGUEIRA, 2013).

Conforme o mapa de Aquíferos do Estado de São Paulo, elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) (2014) e representado na Figura 8, o Aquífero São Paulo abrange quase que a totalidade da área de instalação do PPC. Este aquífero é livre a semiconfinado, de porosidade primária e uma espessura média de 100 m. Ele é constituído por rochas sedimentares, principalmente arenito e argilito, com litologia variada, onde há a predominância de camadas argilosas, intercaladas por lentes de areia distribuídas irregularmente, o que lhe confere vazões explotáveis que variam de 10 a 40 m³/h. Trata-se do aquífero mais intensamente explorado, apesar do mesmo abranger apenas 25% da área da Bacia do Alto Tietê (SGB, 2024; CETESB, 2024b).

Uma pequena parte da área de instalação do PPC abrange a área do Aquífero Pré-Cambriano, o qual é composto por rochas ígneas e metamórficas, geralmente granitos, gnaisses, filitos, xistos e quartzitos, que são, em sua origem, praticamente impermeáveis. Em decorrência dos eventos tectônicos e das intempéries na superfície, formaram-se sistemas de falhas e fraturas e porções de rochas alteradas, o que foi propício para criar condições de percolação e acúmulo das águas subterrâneas, constituindo assim um aquífero fraturado. Sendo assim, o potencial hídrico dessas rochas é limitado, com uma média de 7 m³/h (SGB, 2024; CETESB, 2024c).

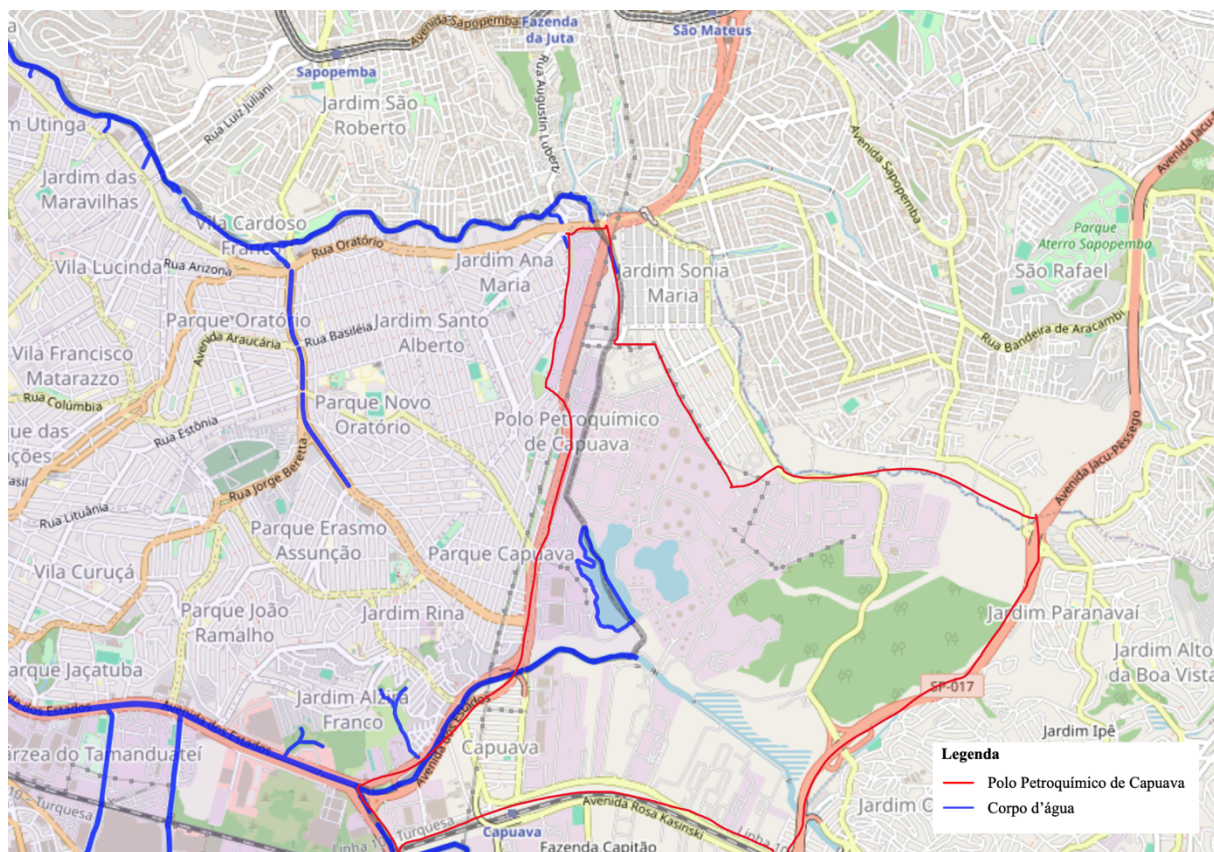
Figura 8: Mapa dos aquíferos da região do Polo Petroquímico de Capuava



Fonte: Adaptado de SGB (2024).

Não foram encontradas em literatura informações referentes ao nível do lençol freático nos municípios de Santo André e Mauá. Sendo assim, optou-se por considerar neste trabalho que o nível freático da área de estudo é raso, tendo em vista que o relevo da região é uniforme, está cercada por corpos d'água, conforme Figura 9, e seu entorno apresenta suscetibilidade a inundação, conforme Figura 10.

Figura 9: Mapa de corpos d'água na região do Polo Petroquímico de Capuava



Fonte: Adaptado de Prefeitura de Santo André (2014).

Figura 10: Mapa de suscetibilidade a inundações da região do Polo Petroquímico de Capuava



Fonte: Adaptado de SGB (2024).

6.3 Aplicação das técnicas de remediação nas áreas contaminadas do Polo Petroquímico de Capuava

Apesar de serem conhecidas as características geotécnicas, geológicas e hidrogeológicas da área de estudo, este trabalho insiste na necessidade de realização de estudos mais detalhados na área de interesse para definição do perfil geotécnico, parâmetros hidrogeológicos, como porosidade total e efetiva, vazão específica, retenção específica, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, e parâmetros geoquímicos, como pH, alcalinidade e fração de carbono orgânico. É de suma importância o conhecimento dessas informações para definição das técnicas de remediação mais adequadas.

Inicialmente serão descartadas as técnicas de remediação que se mostram, em teoria, inadequadas, dispendiosas e/ou agressivas ao meio ambiente. Dessa forma, descarta-se a técnica de remoção de solo, pois as áreas contaminadas no PPC abrigam as instalações de toda a infraestrutura das indústrias petroquímicas. A remoção de solo nesses locais implicaria a realocação dos equipamentos e linhas, sendo desfavorável considerando o custo elevado, frente à necessidade de realizar essa alteração no *layout* das fábricas, e questões espaciais, já que não haveria outro local para mobilizar toda essa estrutura dentro do próprio PPC ou em seu entorno, visto que se trata de uma zona de adensamento urbano.

Seguindo essa mesma lógica, a técnica *air sparging* também não se mostra potencialmente eficaz para aplicação na área de estudo, pois ela é indicada para tratar solos contaminados que apresentam alta permeabilidade e elevada porosidade, ao passo que o solo do PPC, conforme a caracterização da área, é heterogêneo, com predomínio de argilas, areias e cascalhos, de forma que a porção argilosa pode interferir no desempenho dessa técnica.

Tendo em vista que na etapa de Elaboração do Plano de Intervenção já são conhecidos o fluxo de água subterrânea e as dimensões e a área de abrangência das plumas de contaminação, é importante verificar se à jusante da área de interesse encontram-se os seguintes elementos: a ZEIA presente no interior do PPC, outro empreendimento instalado no polo, a comunidade que habita o entorno da área de estudo, a área de intensa circulação e permanência de trabalhadores e/ou corpos d'água superficiais. Se qualquer uma dessas possibilidades é aplicável ao cenário do empreendimento classificado como ACRE, recomenda-se o uso de técnicas que operem como uma barreira à jusante da área, de forma a impedir o deslocamento da pluma de contaminação para esses locais.

Para impedir o deslocamento da pluma, pode ser construída uma barreira vertical impermeável, por exemplo, com paredes-diafragma, de grande tradição na engenharia civil e

que não ocupa espaço físico em superfície, enquanto se trata a contaminação interior à área industrial.

Duas opções que impedem o avanço da pluma ao mesmo tempo que agem na remediação são as barreiras hidráulicas (BH) e as barreiras reativas permeáveis (BRP). O princípio de funcionamento de uma BH consiste no bombeamento da água subterrânea contaminada com posterior tratamento do efluente removido, seguido pelo descarte apropriado e/ou devolução ao lençol freático da água tratada. Existem diferentes técnicas de bombeamento atreladas à operação de uma barreira hidráulica, sendo uma delas o bombeamento através de poços de bombeamento (ou poços de extração) com o uso de bombas pneumáticas. Esta metodologia corresponde à técnica de P&T, de forma que os PEs instalados sejam dispostos um ao lado do outro, respeitando seu raio de influência, formando uma barreira perpendicular à direção do fluxo da pluma contaminada (BOSCOV, 2020).

As BRPs consistem em sistemas de remediação que demandam a introdução de um ou mais materiais permeáveis e reativos no meio geológico, posicionados perpendicularmente à direção do fluxo da pluma contaminada. É importante que o material da barreira seja mais permeável que o aquífero onde será instalado, atraindo as linhas de fluxo e direcionando os contaminantes até a barreira. Os materiais reativos dentro dessa barreira têm a função de interagir com os contaminantes presentes na água subterrânea, possibilitando a transformação deles em formas menos tóxicas ou não tóxicas (MARTINS, 2022).

A Tabela 5 apresenta as vantagens e desvantagens da aplicação de sistemas de barreira hidráulica e barreira reativa permeável.

Tabela 5: Vantagens e desvantagens das técnicas de BH e BRP

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Barreira Hidráulica	- Menor custo de instalação; - Maior controle do tratamento.	- Elevado custo de operação e manutenção; - O tempo de operação pode ser excessivamente longo; - É praticamente impossível a completa remoção dos contaminantes apenas com essa técnica; - Necessita de contínuo fornecimento de energia para a operação do sistema; - Necessita de uma área para o tratamento de superfície; - Pode haver problemas técnicos e legais na descarga da água.
Barreira Reativa Permeável	- Baixo custo de operação e manutenção; - Não necessita de fornecimento contínuo de energia; - Não requer espaço físico na superfície.	- Elevado custo de instalação; - O tempo de operação pode ser excessivamente longo; - Pode ser necessária a troca do material reativo após um certo período de operação; - Pode haver obstrução da barreira devido à precipitação de substâncias inorgânicas ou microrganismos.

Fonte: Adaptado de Boscov (2020)

A utilização de BRP envolve estudos preliminares laboratoriais para seleção do material reativo e conhecimento do tempo, eficiência e subprodutos da reação. Apesar da necessidade

desse estudo e do elevado custo de instalação, a BRP apresenta baixo custo de operação e manutenção, uma vez que não demanda fornecimento contínuo de energia e nem acompanhamento contínuo de trabalhadores para realização de ajustes no sistema. Além disso, não demanda espaço físico em superfície, fator positivo dentro de uma unidade industrial que possui instalações de diferentes tipos por todo seu território, ao passo que um sistema de BH requer um maior planejamento para definir a disposição dos equipamentos e linhas em superfície para não prejudicar a circulação de pessoas e a rotina da produção da fábrica.

Mesmo apresentando um baixo custo para aquisição de equipamentos, mobilização e instalação do sistema, a técnica de BH demanda um maior acompanhamento de trabalhadores ao longo de sua operação para realização de ajustes e manutenção dos equipamentos, demanda fornecimento contínuo de energia e requer o tratamento da água subterrânea bombeada e adequado descarte. Tais fatores elevam o custo do projeto, podendo tornar-se semelhante à implementação de uma BRP.

Diante dessa análise, recomenda-se o uso de barreira reativa permeável à jusante dos empreendimentos instalados no PPC para evitar a migração da pluma para áreas adjacentes, como a ZEIA e corpos d'água superficiais presentes no interior do polo; o entorno do PPC, que abriga residências, comércios, corpos d'água e áreas de lazer para a população local; empreendimentos vizinhos e áreas de intensa circulação e permanência de trabalhadores.

Considerando que é comum a ocorrência de fase livre no subsolo em regiões próximas de fontes de contaminação primária que apresentaram derramamento recente, quando os volumes de fase livre forem significativos e caso não haja nenhum sistema de remediação em operação na área, recomenda-se o uso da técnica de recuperação de fase livre através do uso de *skimmers*. Essa técnica requer a instalação de equipamentos de baixa complexidade, que ocupam uma pequena área da superfície, e o risco do produto em subsolo ficar retido no PE é menor em comparação à recuperação de fase livre que requer o rebaixamento do NA.

De acordo com a CETESB (2023), os grupos de contaminantes identificados no solo e na água subterrânea dos empreendimentos que atuam no PPC são solventes aromáticos, fenóis, TPHs, solventes halogenados, PAHs e metais como grupos de contaminantes.

Levando em consideração as características dos contaminantes registrados nos empreendimentos encontrados no PPC e as Tabelas 2 e 3, em regiões com NA raso que não apresentam fase livre, a aplicação da técnica ISCO com aplicação do persulfato alcalino como agente oxidante apresenta a melhor performance. Quando dissolvido em água, o persulfato se dissocia em íons persulfatos ($S_2O_8^{2-}$), que apresentam um potencial de oxidação de 2,01 V, porém ao ser ativado com a adição de uma base, elevando o pH para um valor entre 11 e 12,

são gerados radicais hidroxilas, que apresentam potencial de oxidação de 2,8 V (MAXIMIANO, 2014; SOUSA, 2022).

Sousa (2022) recomenda uma razão molar de 2:1 de base para persulfato, garantindo condições neutras do solo ao final da reação, e evitando mudanças nas concentrações de metais e aumento da formação de espécies aceptoras de elétrons.

Em áreas contaminadas por metais pesados e organoclorados, recomenda-se a aplicação da técnica de ISCR, que mostrou ser a mais eficiente para tal finalidade que as outras técnicas de remediação apresentadas. Para aplicação dessa técnica, é necessário se ater a plumas de pequenas dimensões, ou definir uma quantidade maior de pontos de injeção do agente redutor para que seja possível atingir toda a pluma.

Em regiões onde for detectada uma presença significativa de contaminante tanto em água subterrânea quanto na zona vadosa do solo, mesmo que haja fase livre e fase residual, recomenda-se o uso de sistemas de remediação do tipo MPE, pois essa técnica mostra-se eficiente quando há ocorrência de particionamento da contaminação nas diferentes matrizes do subsolo, é capaz de remover FL sem que haja a degradação dos componentes e equipamentos do sistema e é eficiente no tratamento de VOCs e SVOCs.

Quando houver a presença de contaminantes (VOCs, SVOCs e compostos não voláteis biodegradáveis aerobiamente) na zona vadosa, mas não forem detectados em água subterrânea, sistemas do tipo SVE podem atender às demandas de remediação em cenários onde o nível do lençol freático seja mais profundo do que 1 m. Também é um método eficiente para locais onde haja risco de intrusão de vapores, tanto em ambiente aberto quanto em ambiente fechado.

Levando em consideração que sistemas de remediação P&T são mais eficazes no início de projetos em áreas com grandes massas de contaminação em água subterrânea, recomenda-se sua aplicação para situações restritas a este cenário. Caso haja a presença também de contaminação na zona vadosa, pode ser mais interessante a implementação de um sistema que abranja a remoção de efluente líquido e gasoso do subsolo.

No decorrer da intervenção com a técnica P&T, após a diminuição da massa de contaminantes, considerando que às vezes é necessária a combinação de mais de um tipo de técnica e que a taxa de remoção diminui drasticamente, tornando-se ineficaz, é recomendada a desmobilização do sistema e substituição da técnica.

7 CONCLUSÕES

O Polo Petroquímico de Capuava teve suas operações iniciadas em 1972 e é local de atuação de indústrias dos setores químico e petroquímico de primeira, segunda e terceira gerações que utilizam a nafta como principal matéria prima, a qual é proveniente de refinarias da PETROBRAS e são transportadas até os empreendimentos por dutos vindos diretamente de tais unidades.

Considerando a área total do polo, 87,7% dela está situada no município de Mauá e 12,3% em Santo André, fazendo divisa com os Distritos Administrativos de São Rafael, São Mateus e Sapopemba, no município de São Paulo. No entorno das porções localizadas tanto em Santo André quanto em Mauá, observa-se a presença de infraestrutura básica e uma densa concentração de habitantes.

No interior PPC, existem alguns corpos d'água superficiais e há uma ZEIA com 1,21 km² de extensão, a qual abriga uma área de mata e capoeira, sendo proibida sua ocupação para fins industriais. O litotipo predominante no interior do polo abrange argilas, areias e cascalhos da Bacia São Paulo, formação que é caracterizada pela sedimentação de depósitos de leques aluviais associados à planície aluvial, sedimentos lacustres e depósitos fluviais. Tais características representam um solo heterogêneo. Além disso, o nível freático em algumas porções da área de estudo é raso.

Atualmente, as SQIs dos empreendimentos que operam no PPC pertencem aos seguintes grupos de contaminantes: solventes aromáticos, fenóis, TPHs, solventes halogenados, PAHs e metais. Quanto às técnicas de remediação utilizadas nos empreendimentos classificados como ACRes, estão em operação sistemas de oxidação química, redução química, remoção de solo, P&T, SVE, *air sparging*, MPE e recuperação de fase livre.

As técnicas de remoção de solo e *air sparging* não se mostram potencialmente efetivas para o cenário da área de estudo. A primeira não é vantajosa do ponto de vista financeiro e espacial, já que demandaria a realocação de toda infraestrutura da área que seria escavada e não haveria outro local para mobilizá-la dentro do próprio PPC ou em seu entorno. A segunda não se mostra eficaz por ser indicada para tratar solos contaminados que apresentam alta permeabilidade e elevada porosidade; o solo da área de estudo é heterogêneo e as camadas de areia estão entremeadas por camadas argilosas que podem interferir no desempenho dessa técnica.

À jusante das ACRes dentro do Polo Petroquímico de Capuava recomenda-se a instalação de barreira reativa permeável para evitar a migração da pluma de contaminação para áreas adjacentes, que podem ser a ZEIA presente no interior do PPC, outro empreendimento instalado

no polo, a comunidade que habita o entorno da área de estudo, a área de intensa circulação e permanência de trabalhadores e/ou corpos d'água superficiais, e ao mesmo tempo tratar a pluma. A BRP deve ser posicionada perpendicularmente à direção do fluxo da pluma contaminada, para que a água subterrânea seja tratada, ou seja, os contaminantes interajam com os materiais reativos da barreira, sendo transformados em formas menos tóxicas ou não tóxicas.

Em casos de ocorrência de grandes volumes de fase livre em áreas que ainda não abrigam nenhum sistema de remediação em operação, recomenda-se o uso da técnica de recuperação de fase livre através do uso de *skimmers*.

Sistemas de remediação P&T são indicados para áreas com grandes massas de contaminação em água subterrânea que apresentem ou não fase livre. Caso a concentração na zona vadosa seja expressiva, é indicada a implementação de um sistema que abranja a remoção de efluente líquido e gasoso do subsolo, e não o uso do P&T.

Se os contaminantes forem expressivos na zona vadosa do solo e não houver concentrações preocupantes na água subterrânea, ou em casos em que haja risco de intrusão de vapores em ambiente aberto e/ou fechado, sistemas do tipo SVE atenderão às demandas de remediação.

Nos cenários de particionamento das SQIs para as fases gasosa, líquida, livre e residual, recomenda-se o uso de sistemas de remediação do tipo MPE.

Em regiões sem fase livre e nível do lençol freático raso, é sugerida a aplicação da técnica ISCO com uso do persulfato alcalino como agente oxidante. Tal técnica é efetiva para áreas contaminadas com solventes aromáticos, fenóis, TPHs, solventes halogenados e PAHs. Em áreas contaminadas por metais pesados e organoclorados, é proposta a aplicação da técnica de ISCR, sendo necessário se ater a plumas de pequenas dimensões, ou definir uma quantidade maior de pontos de injeção do agente redutor para que seja possível atingir toda a pluma.

Quando a taxa de remoção de produto ficar muito baixa, a técnica deve ser substituída por outra, a depender das características do meio e da fase do solo onde está a contaminação.

A análise crítica da eficiência técnica das técnicas de remediação empregadas atualmente nos empreendimentos do polo petroquímico baseou-se em caracterização do local por meio de fontes bibliográficas e documentais. É importante frisar que é sempre necessário realizar estudos detalhados na área de interesse para definição de parâmetros hidrogeológicos, geotécnicos e geoquímicos para a elaboração do Plano de Intervenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM. **A indústria química**. Disponível em: <https://abiquim.org.br/industriaQuimica>. Acesso em: 07 nov. 2023

ALVES, Elizabeth Nunes. **Gestão de risco de acidentes industriais com produtos químicos perigosos integrada ao planejamento territorial: um olhar para o polo petroquímico do abc paulista**. 2020. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento e Gestão de Território, Universidade Federal do Abc, São Bernardo do Campo, 2020.

AZUAGA, Feliciano Lhanos. **A reestruturação da indústria petroquímica brasileira no período pós-privatização**. 2007. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/89657/255519.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

BATISTA, Magali Antonia et al. **Inquérito epidemiológico para residentes do entorno das empresas do Polo Petroquímico de Capuava no município de São Paulo**. São Paulo: 2023. Disponível em: <<https://pesquisa.bvsalud.org/porta1/resource/pt/biblio-1510432>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

BNDES. **Indústria petroquímica brasileira: situação atual e perspectivas**. Brasília: 2005. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2485/1/BS%2021%20Ind%c3%bastr%20petroqu%c3%admica%20brasileira_P.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2023.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Remediação de áreas contaminadas: confinamento geotécnico, barreiras permeáveis, barreiras reativas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2020. Color.

CARAM, Erica Kotani; BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Effects of ozone sparging on groundwater physical-chemical parameters during in situ remediation of a site contaminated with chlorides**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, ENGINEERING AND ENVIRONMENT, 5., 2019, Bangkok. **Anais [...]**. Bangkok: SEE, 2019.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017**. São Paulo, SP, 10 fev. 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-038-2017-C.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

CETESB. **Relatório de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo**. Disponível em: <<https://mapas.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/porta1/apps/MapJournal/index.html?appid=28e7bb2238a443819447a8ec3ae4abe5>>. Acesso em: 29 nov. 2023.

CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/manual-de-gerenciamento-de-areas-contaminadas/informacoes-gerais/apresentacao-2/>>. Acesso em: 22 jan. 2024a.

CETESB. **Aquífero São Paulo**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/consulta-por-aquiferos-monitorados/sao-paulo/>>. Acesso em: 28 fev. 2024b.

CETESB. **Aquífero Pré-Cambriano (Cristalino).** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-pre-cambriano-cristalino/>>. Acesso em: 28 fev. 2024b.

COFIP. **Histórico.** Disponível em: <<https://www.cofipabc.com.br/conteudos.asp?ID=21>>. Acesso em: 07 nov. 2023.

CORREA, Tiana Pinho. **Avaliação do gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos derivados de petróleo em postos revendedores de combustíveis no estado do Rio Grande do Sul.** 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/165270/001044514.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 fev. 2024.

CUNHA, Alaine Santos da. **Aplicação de técnicas químicas de remediação em áreas contaminadas por compostos organoclorados.** 2010. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-08012011-183046/publico/ASC.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.

GODOY, Rafael Ferreira. **Remediação de Cromo Hexavalente Utilizando Polissulfeto de Cálcio – Estudo de Caso: Rio de Janeiro.** 2014. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental e Urbana, Departamento de Engenharia Civil - Puc-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/25019/25019.PDF>. Acesso em: 15 fev. 2024.

GURGUEIRA, Magali Dubas. **Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo.** 2013. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-14112013-104040/publico/DissertacaoMestradoMagalioriginal.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.

IBGE. **Cidades e Estados do Brasil.** Disponível em < <https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

HANSEN, Éverton. **Tecnologias de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos.** 2013. 1 v. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/108476/000946140.pdf?sequence=>. Acesso em: 7 mar. 2024.

MARTINELLI, Paula Cristina. **Avaliação da poluição ambiental no entorno do polo petroquímico de Capuava e Paranapiacaba, região do Grande ABC, sob diferentes abordagens: biomonitoramento, análises físico-químicas e microbiológicas.** 2019. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal do Abc, Santo André, 2019.

MARTINS, Marisa Pacheco. **Avaliação do comportamento da barreira física como técnica de remediação para o derramamento de biodiesel.** 2022. 1 v. TCC (Graduação) - Curso de

Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/232894/TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 mar. 2024.

MATOS, Antonio Teixeira de. **Poluição Ambiental: impactos no meio físico**. Viçosa: Editora UFV, 2013. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=2FEEEEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=poluicao+ambiental+industria+petroquimica&ots=YBaNuS4Iki&sig=QgpCIcBuW5qWxUA6-mWHC2hm00o#v=onepage&q=poluicao%20ambiental%20industria%20petroquimica&f=false>. Acesso em: 05 nov. 2023.

MAUÁ. Lei nº 4153, de 26 de março de 2007. Mauá, Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-maua-sp>. Acesso em: 19 jan. 2024.

MAXIMIANO, Alexandre Magno de Sousa *et al.* **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: Páginas & Letras, 2014.

MILLER, Alexandre Divide. **Remediação de fase livre de gasolina por bombeamento duplo: estudo de caso**. 2001. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-30062015-143431/publico/Miller_Mestrado.pdf. Acesso em: 15 fev. 2024.

PAPADOPOULOS S., VATSERIS, C. (2005). Air sparging for site remediation. IntergeoEnvironmental Technology Ltd., industrial Area of Themi, Thessaloniki, 11 p.

PETROBRAS. **Refinaria Capuava (RECAP)**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/refinaria-capuava>. Acesso em: 05 nov. 2023.

PETROQUÍMICA 2017. **Petroquímica no Brasil**. Disponível em: <https://petroquimica2017.wordpress.com/2017/10/16/petroquimica-no-brasil/>. Acesso em: 06 nov. 2023.

PREFEITURA DE SANTO ANDRÉ. **SIGA Mapa**. Disponível em: <https://sigamapa.santoandre.sp.gov.br/>. Acesso em: 05 fev. 2024.

RIO MEMÓRIAS. **Campanha “O petróleo é nosso”**. Disponível em: <https://riomemorias.com.br/memoria/campanha-o-petroleo-e-nosso/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

ROSIN, Luis Otávio Capelari. **Estudos de Casos de Remediação de Áreas Contaminadas por Derivados de Petróleo em Postos Revendedores de Combustíveis**. 2021. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RUAS, Diego Botelho *et al.* Avaliação de diferentes condições de pressão de vácuo na operação de sistema de remediação com extração multifásica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 287-298, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018168385>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/esa/a/FjFkrck9f7gHkMWDrc5FPJP/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 09 fev. 2024.

SANTO ANDRÉ (Município). **Lei nº 9621, de 25 de setembro de 2014**. Santo André, Disponível em:

<<http://www.cmsandre.sp.gov.br/images/stories/documentos/planodiretor/L9621-14.pdf>>.

Acesso em: 19 jan. 2024.

Secretaria Municipal de Urbanismo e Licenciamento (SMUL). **Zona Especial de Interesse Social – ZEIS**. Disponível em: < <https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/zona-especial-de-interesse-social-zeis/>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

SCHULTZ, Desirée C. Araujo *et al.* **Identificação de aspectos e impactos ambientais da indústria petroquímica**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 5., 2016, Bento Gonçalves. **Anais**. Bento Gonçalves, 2016. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=16&ano=_quinto>. Acesso em: 19 jan. 2024.

Serviço Geológico do Brasil – CPRM (SGB). **GEO SGB**. Disponível em: <<https://geosgb.sgb.gov.br/>>. Acesso em: 05 fev. 2024.

SILVA, Carla Marçal. **Desenvolvimento de procedimento experimental para oxidação química por ozônio, em escala de laboratório, para degradação de tetracloroetileno em fase dissolvida**. 2014. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-04012016-170408/publico/DISS_CARLAMARCALSILVA.pdf. Acesso em: 19 fev. 2024.

SILVA, Thayse Tessaro da. **Técnicas de remediação utilizadas no tratamento da contaminação de solo e água subterrânea por vazamentos em postos de combustíveis**. 2020. 1 v. Monografia (Especialização) - Curso de Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/4f4c4890-ee04-4037-8735-8a4752448f04/THAYSE%20TESSARO%20DA%20SILVA%20PQI20.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2024.

SOARES, Adilson *et al.* **Mapeamento da Suscetibilidade a movimentos de massa no Município de Santo André - SP utilizando dados geológicos e de Sensoriamento Remoto**. Santos: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR, 2017. 8 p. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2017/10.27.15.49.26/doc/59514.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2024

SOUSA, Edson Martins Barbosa de. **Aplicação da técnica de oxidação química in situ com persulfato de sódio para remediação de aquíferos contaminados por compostos orgânicos: Uma revisão**. 2022. 1 v. Monografia (Especialização) - Curso de Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/62957ac1-9727-45ae-b5a8-c420fdfabfda/EdsonMartinsBarbosadeSousa%20PQI22.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2024.

TORRES, Eduardo Mc Mannis. **A evolução da indústria petroquímica brasileira**. Química Nova, Porto Alegre, v. 20, n. 49, nov. 1997. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/TngyJ8q66x9G37MmW6kv3ZH/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

US ARMY. **Multi-phase extraction – Engineering and design**. EM 1110-14001, Washington, DC, 1999.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Chemical oxidation in: how to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites: a guide for corrective action plan reviewers**. Washington D.C.: USEPA, 2004. (EPA 510-R-04-002)

VIANA, Fernando Luiz E. **Indústria petroquímica**. Caderno Setorial ETENE, [S.L.], v. 258, n. 7, dez. 2022. Disponível em: <https://g20mais20.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1489/3/2022_CDS_258.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2023.

WIMMER, Ana Christina Souza. **Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes de uma indústria petroquímica**. 2007. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11608@1>. Acesso em: 19 jan. 2024.