

## Artigo Técnico

# Bombeamento e tratamento da fase livre em Aquífero Litorâneo

*Pump and treat free phase in Coastal Aquifer*

Priscyla Aparecida de Campos Freire<sup>1</sup>, Isabel Cristina de Barros Trannin<sup>2</sup>,  
Silvio Jorge Coelho Simões<sup>3</sup>

## RESUMO

O elevado consumo de combustíveis e sua inadequada disposição no passado geraram preocupações com a poluição do solo e de aquíferos. Essas preocupações tornaram-se ainda maiores pela necessidade de exploração de aquíferos para atender à crescente demanda por recursos hídricos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência e a eficácia da técnica de bombeamento e tratamento aplicada à remediação da pluma de fase livre de hidrocarbonetos na área do Auto Posto Baía do Sol, localizado em São Sebastião, no litoral norte do estado de São Paulo, sobre o Aquífero Sedimentar Litorâneo. Os resultados demonstraram que a técnica de bombeamento e tratamento foi eficiente na remediação da área deste Auto Posto, com a remoção total dos poluentes em fase livre. Por outro lado, a técnica apresentou baixa eficácia em razão da necessidade de um período prolongado de bombeamento.

**Palavras-chave:** águas subterrâneas; postos de combustíveis; remediação.

## ABSTRACT

High fuel consumption and its inadequate control in fuel stations caused the pollution of soil and aquifers. These consequences created more concern with the increased exploration of aquifers to supply the groundwater demand. The objective of this study was to evaluate the efficiency and effectiveness of the of pump and treat technique of the water applied to the Coastal Aquifer in the cleaning up of the plumes produced by the leaking of fuel in the gas station Auto Posto Baía do Sol Ltda. The gas station is located in São Sebastião, in the north coast of São Paulo State. In the case of Auto Posto Baía do Sol Ltda, the technique of pump and treat was efficient and the plume produced by the leakage was completely removed. However, the effectiveness of this technique was low due to the long time required for the complete operation.

**Keywords:** groundwater; gas stations; remediation.

## INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda por recursos hídricos, a exploração da água subterrânea é uma alternativa para o abastecimento público e para o desenvolvimento econômico da sociedade, pois, além de ser abundante, normalmente apresenta melhor qualidade comparada às águas superficiais (CETESB, 2005). De acordo com Giampá (2010), o consumo mundial de água subterrânea dobrou nas últimas quatro décadas; atualmente, estima-se que cerca de 75 a 80% dos municípios do interior paulista sejam abastecidos por aquíferos, e, para Ribeirão Preto, São Paulo, que abriga 605.114 habitantes (IBGE, 2010), essa dependência é total.

Por outro lado, o aumento do consumo de água subterrânea tem gerado preocupações relacionadas às principais fontes de poluição, entre essas as

provocadas por vazamentos em tanques de armazenamento de combustíveis como gasolina, diesel e álcool. Esses combustíveis são importantes fontes de contaminação do solo e do freático, e têm sido alvo de inúmeras pesquisas em razão da complexidade dos fenômenos de interação desses poluentes com o solo e do grande número de áreas contaminadas. De acordo com a Resolução CONAMA nº 273, de 29 de novembro de 2000, uma área é considerada contaminada por haver, comprovadamente, poluição ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural.

No Brasil, existem aproximadamente 36.730 postos de combustíveis; em 2009, o consumo de álcool, gasolina e diesel foi de 16,

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) - Guaratinguetá (SP), Brasil.

<sup>2</sup>Doutora em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Lavras - Lavras (MG); Professora do Departamento de Engenharia Civil da UNESP, Campus de Guaratinguetá - Guaratinguetá (SP), Brasil.

<sup>3</sup>Doutor em Geografia pela Universidade de São Paulo - São Paulo (SP); Professor Livre Docente do Departamento de Engenharia Civil da UNESP, Campus de Guaratinguetá - Guaratinguetá (SP), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Priscyla Aparecida de Campos Freire - Avenida Arlete Meirelles Ranieri, 202 - Parque das Árvores - 12506-310 - Guaratinguetá (SP), Brasil - E-mail: priscyla\_freire@hotmail.com

**Recebido:** 14/11/14 - **Aceito:** 14/11/14 - **Reg. ABES:** 122

25 e 49 milhões de metros cúbicos, respectivamente (ANP, 2009). De acordo com a CETESB (2010), os postos de combustíveis são responsáveis por 79% das áreas contaminadas no estado de São Paulo, porque a maioria foi deles construída na década de 1970, com uma vida útil média de 25 anos para tanques subterrâneos, o que indica que já estão comprometidos.

A contaminação de solos e águas subterrâneas por postos de armazenamento de combustível oferece riscos à saúde humana de forma direta e indireta. No contato direto, pode-se destacar a inalação, a ingestão, o contato com a pele e com os olhos; no contato indireto, tem-se a ingestão de alimentos e água contaminada com compostos presentes nos combustíveis, que, em sua maioria, são cancerígenos.

De acordo com os dados da CETESB (2010), entre as técnicas de remediação de aquíferos contaminados o bombeamento e tratamento (*Pump and Treat*) é uma das mais utilizadas atualmente no estado de São Paulo. Essa técnica consiste no bombeamento da água contaminada até a superfície para posterior tratamento externo e remoção de contaminantes e, em alguns casos, reinjeção da água tratada no aquífero (USEPA, 1996). Nesse processo de remediação, além das características físico-químicas inerentes ao contaminante, a eficiência do bombeamento na remoção ou atenuação da pluma depende diretamente de fatores como permeabilidade do solo, impedimentos físicos e extensão e profundidade da pluma (USEPA, 1996).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência e a eficácia da técnica de bombeamento e tratamento da pluma de hidrocarbonetos em fase livre presente no Aquífero Litorâneo Sedimentar, contaminado por vazamentos e derrames de combustíveis na área do Auto Posto Baía do Sol Ltda., no município de São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo.

## METODOLOGIA

### Caracterização da área de estudo

O posto de revenda de combustíveis, de razão social Auto Posto Baía do Sol Ltda., está localizado no município de São Sebastião, São Paulo, litoral

norte, à Avenida Manoel Teixeira, nº 1.000, no bairro São Francisco. A região de entorno do Auto Posto é composta por estabelecimentos comerciais e residenciais, um corpo d'água e encontra-se a uma distância inferior a 200 m do oceano Atlântico.

O município de São Sebastião localiza-se a 209 km de São Paulo e compõe com Ilhabela, Caraguatuba e Ubatuba o litoral norte paulista. O recurso paisagístico principal da região do litoral norte é, além da costa litorânea, a Serra do Mar e a Mata Atlântica (SILVA *et al.*, 2001).

Com base nos levantamentos realizados na área de estudo, por meio de perfurações acompanhadas, verificou-se que na geologia local há predomínio de areia, com textura variável de fina a grossa, com coloração escura e presença de rocha sedimentar (Figura 1).

No litoral norte do Estado de São Paulo, há dois principais sistemas de aquífero: o Aquífero Cristalino, que corresponde aos terrenos cristalinos da Serra do Mar, permeáveis por fraturamento de rochas, e o Aquífero Litorâneo, permeável por porosidade granular, correspondendo a sedimentos ao longo das praias (MELLO & ROMEIRO, 2010).

De acordo com o mapa de vulnerabilidade de aquíferos, gerado pelo Comitê de Bacias Hidrográficas do Litoral Norte (2009), a área em estudo está localizada sobre o aquífero litorâneo. Segundo Iritani e Ezaki (2009), este é um aquífero formado há menos de 2 milhões de anos e é composto por sedimentos de planície litorânea, variados e intercalados, que ocorrem como arenitos, siltitos e conglomerados depositados em ambiente fluvial constituídos por sedimentos depositados pela ação dos rios, ventos e mares, onde a água circula pelos poros existentes entre os grãos minerais. A qualidade das águas desse Aquífero pode ser afetada por fontes de poluição como fossas negras, fossas sépticas mal construídas e tanques de armazenamento de combustível (MELLO & ROMEIRO, 2010).

Por meio de levantamentos na área do Auto Posto Baía do Sol Ltda., foram identificados poluentes em fase livre com até 18 cm de espessura, no poço de monitoramento (PM) identificado

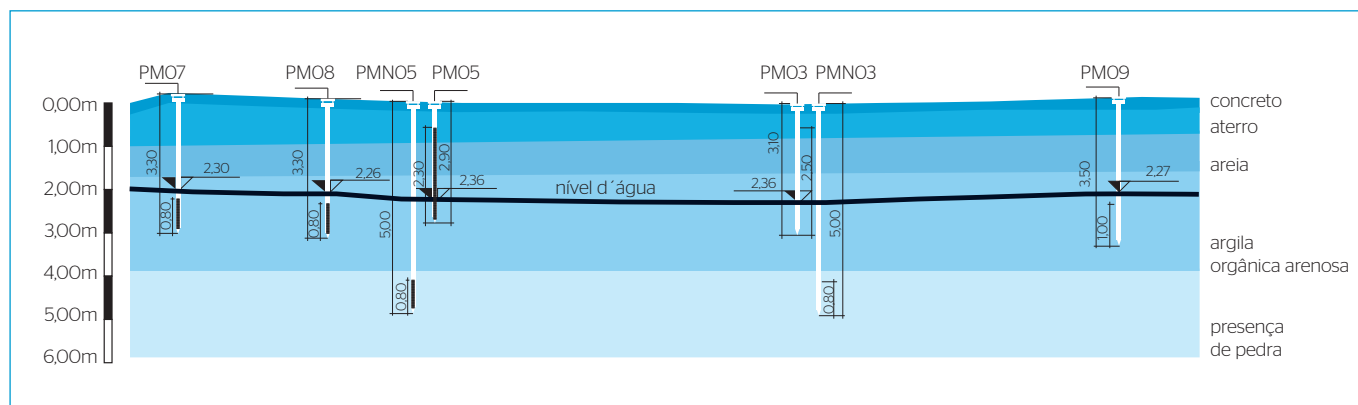


Figura 1 - Perfil estratigráfico da área do Auto Posto Baía do Sol Ltda., no município de São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo.

como PM 01, sendo adotada a técnica de remediação por bombeamento e tratamento da fase livre, que vem sendo desenvolvida desde setembro de 2008. Conforme o procedimento adotado pela CETESB — Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E de 22 de junho de 2007 — em episódios envolvendo contaminações por combustíveis decorrentes de vazamentos em empreendimentos que utilizam sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis e, de acordo com a Resolução CONAMA nº 273 de 29 de novembro de 2000, a área foi classificada como contaminada.

### A técnica do bombeamento e tratamento - *pump and treat*

O bombeamento e tratamento (*pump and treat*) é um dos sistemas de tratamento de aquíferos mais utilizado atualmente e consiste no bombeamento da água subsuperficial contaminada com LNAPL (líquido leve menos denso que a água) à superfície para posterior tratamento externo de remoção de contaminantes (USEPA, 1996). Esse sistema vem sendo adotado desde a década de 1980 nos EUA e consiste em instalar poços de bombeamento de maneira estratégica, buscando interceptar a pluma de LNAPL (líquido leve menos denso que a água), de modo a conter a migração e reduzir as concentrações do contaminante (USEPA, 1996). Após o bombeamento, a água passa pela caixa separadora de água e óleo (SAO) que contém três compartimentos nos quais grande parte dos contaminantes fica retida, sendo, em seguida, filtrada por carvão ativado para tratamento em superfície, e uma vez tratada é conduzida para poços de reinjeção (Figura 2).

Conforme apresentado na Figura 3, para a implantação da técnica de bombeamento e tratamento na área do Auto Posto Baía do Sol Ltda., foi instalado um poço para a retirada da fase livre, denominado de PRFL 01, para posterior remoção do contaminante LNAPL, verificado em vistorias ao PM 01.

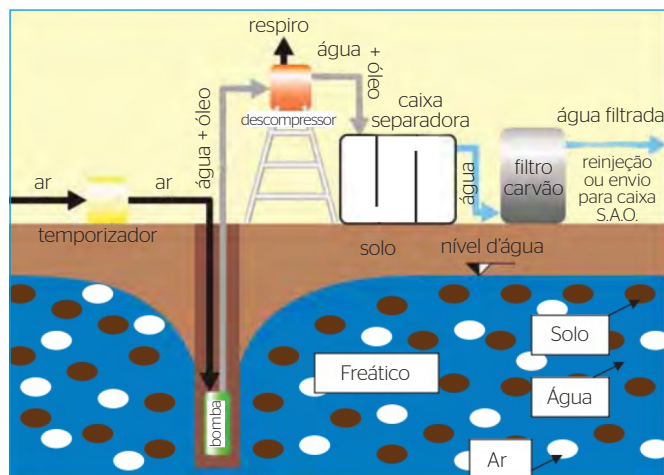


Figura 2 – Sistema de remediação por bombeamento e tratamento (CONSTRUFER, 2011).

### Avaliação do sistema de remediação

Para a avaliação da eficiência e da eficácia do sistema de remediação por bombeamento e tratamento da fase livre, os poços de monitoramento e as espessuras da pluma de contaminação foram inspecionados quinzenalmente, sendo verificadas as alterações causadas pelo bombeamento e o tempo necessário para tais alterações. O PM 01 foi o único que apresentou fase livre.

Para a avaliação da pluma de fase dissolvida, foram realizadas análises químicas da água subterrânea em laboratório certificado (ISO 17.025), e as amostragens seguiram os procedimentos descritos pela CETESB (Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E de 22 de junho de 2007). Amostras da água subterrânea bombeada e tratada também foram analisadas quimicamente antes de serem enviadas ao poço de injeção (PI), identificadas como caixa separadora de água e óleo (SAO). Também foram coletadas amostras de água do PM 01 em processo de remediação direta, identificado como *Hot Spot* do local. O PMN 03 correspondeu a um poço de monitoramento profundo, constituindo um conjunto multinível com o PM 03.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

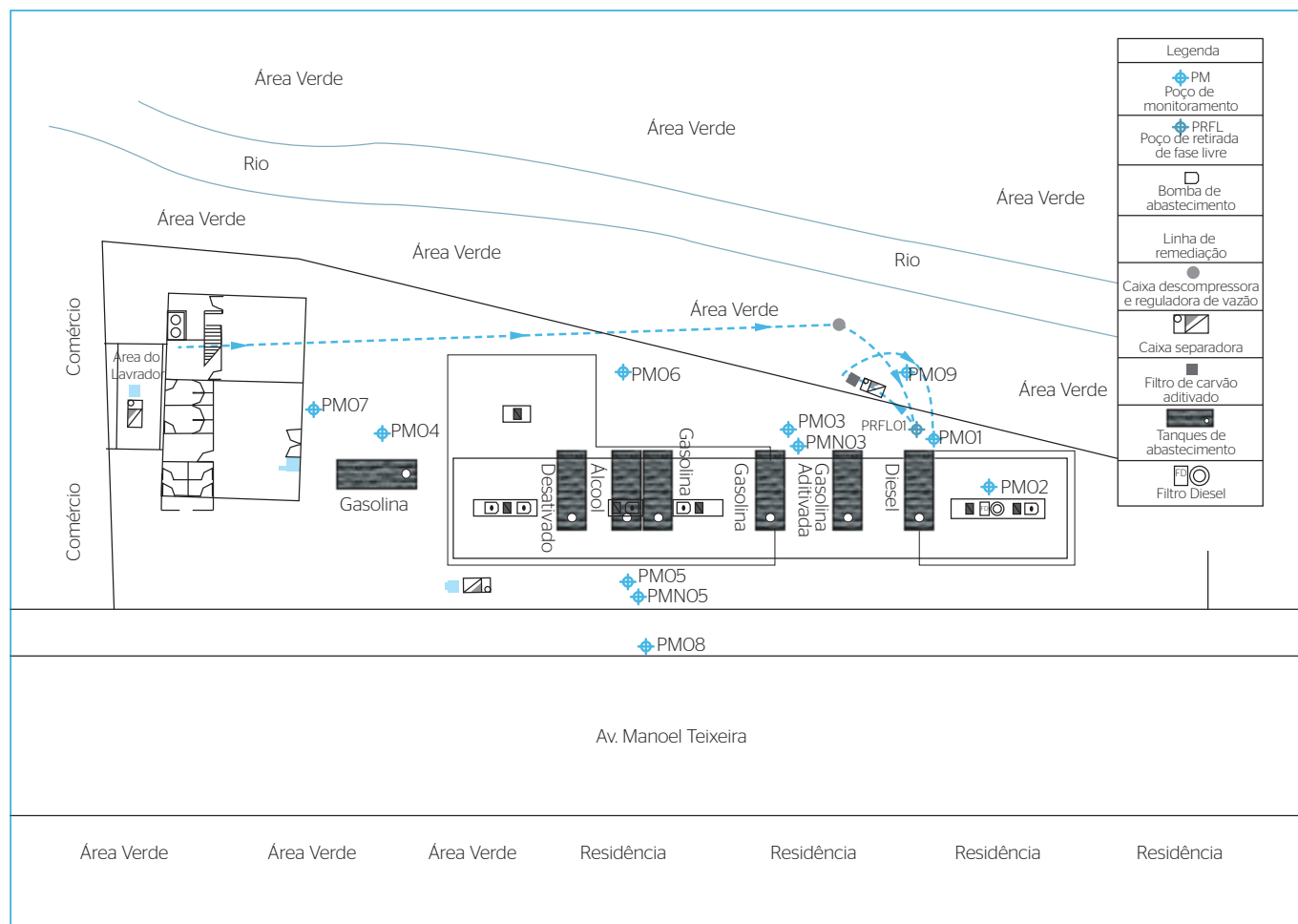
Nas investigações ambientais, realizadas entre julho de 2006 e agosto de 2008, os pontos amostrados não apresentaram concentrações de contaminantes em fase residual, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Neste mesmo período, foram vistoriados os pontos de monitoramento e coletadas amostras de água subterrânea para análise das concentrações de hidrocarbonetos monoaromáticos (BTEX: Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) e hidrocarbonetos policíclicos (PAHs), apresentadas na Tabela 2. A área apresentou contaminação em fase livre no PM 01 e em fase dissolvida nos poços PM 03, PM 04, PM 05 e 06 com valores de benzeno, tolueno, xileno e etilbenzeno acima dos valores de intervenção da CETESB (2005).

Em razão da identificação da existência de pluma de fase livre, em setembro de 2008, foi implantado o sistema de remediação por bombeamento e tratamento da fase livre no PM 01, mesmo sem a delimitação das plumas de fase dissolvida. A contaminação da água subterrânea foi originada por vazamentos e derrames de gasolina e diesel nos tanques e bombas de combustíveis.

Na Tabela 3, são apresentadas as espessuras da fase livre, obtidas no PM 01, no período de setembro de 2008 a dezembro de 2010, após a implantação do sistema de remediação por bombeamento e tratamento.

De acordo com esses resultados, verificou-se que houve persistência da fase livre no período de 18 meses, porém, após 6 meses, a espessura da pluma diminuiu de 5 para 1 cm, indicando que a técnica de bombeamento e tratamento foi eficiente para controlar a pluma de fase livre. No entanto, é preciso considerar que, embora essa técnica tenha sido eficiente para controlar a pluma de fase livre, não foi eficaz,



**Figura 3** - Croqui da área do Auto Posto Baía do Sol Ltda., em São Sebastião, São Paulo, com a localização dos poços de monitoramento e do poço de retirada da fase livre (CONSTRUFER, 2011).

em decorrência do longo período de bombeamento necessário, que, neste caso, foi de 18 meses, mesmo o solo da área sendo arenoso e de boa permeabilidade.

O longo período necessário à remediação total da fase livre pode ser atribuído à alta variação do nível freático, sendo necessário o ajuste constante da bomba do sistema à altura do nível freático para que a contaminação em fase livre, mesmo quando em pequenas espessuras, pudesse ser bombeada, evitando, com esse procedimento, possíveis atolamentos das bombas e o bombeamento de águas subterrâneas abaixo da zona contaminada.

Em 2010, foram retomadas as atividades de investigação ambiental, com delimitação das plumas de contaminação, de acordo com a Decisão de Diretoria nº 263/2009/P. Em dezembro de 2010 foram instalados dois poços de monitoramento profundos, PMN 03 e PMN 05, formando dois conjuntos de poços multiníveis com os poços de monitoramento rasos, PM 03 e PM 05, respectivamente, de modo a avaliar as concentrações de contaminantes próximas ao nível freático e a concentração de contaminantes 2 a 3 metros abaixo deste. Nessa ocasião, foram instalados mais três poços de monitoramento,

PM 07, PM 08 e PM 09, cujas localizações podem ser observadas no croqui apresentado na Figura 3.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, a pluma de contaminantes foi remediada, o que foi comprovado pelas vitórias feitas nos poços de monitoramento, não sendo constatadas espessuras de fase livre e, pelo laudo químico, que não identificou a presença de contaminantes dissolvidos na água subterrânea. No PM 01, a pluma permaneceu com concentrações inferiores às máximas aceitáveis para a área do autoposto, indicando que o sistema de bombeamento e tratamento implantado na área controlou os poluentes em fase livre e atenuou as concentrações de poluentes em fase dissolvida.

O sistema de remediação também atuou como barreira hidráulica, impedindo que a pluma de contaminação atingisse o corpo d'água localizado à jusante ao Auto Posto, conforme pode ser verificado nos resultados das concentrações de BTEX e PAH no poço de monitoramento PM 06.

Verificou-se também que a água bombeada do PM 01 e que passou por tratamento pela caixa SAO e por carvão ativado não

**Tabela 1 - Concentrações de hidrocarbonetos monoaromáticos (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) e hidrocarbonetos policíclicos no solo do Auto Posto Baía do Sol Ltda. e valores de intervenção da CETESB, 2005.**

Parâmetros	Poços de Monitoramento						Valores de intervenção da CETESB/2005						
	01		02		03			04		05		06	
	Julho/2006							Agosto/2008					
BTEX (mg.kg <sup>-1</sup> )	Benzeno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	80	
	Tolueno	<LD	<LD	1840	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	30.000	
	m-, Xileno	-	-	-	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	o-Xileno	-	-	-	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Xileno total	<LD	<LD	7.700	-	-	-	-	-	-	-	-	30.000
	Etilbenzeno	<LD	<LD	8.000	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	40.000
	BTEX total	-	-	17.540	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PAH (mg.kg <sup>-1</sup> )	Naftaleno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	60.000	
	Acenaftaleno	<LD	<LD	880	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Acenafteno	28.068	26.500	26.730	28.358	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Fluoreno	<LD	<LD	190	16	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Fenantreno	<LD	<LD	5.520	25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	40.000	
	Antraceno	<LD	<LD	3.850	820	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Fluoranteno	<LD	<LD	83	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Pireno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Benzo(a)antraceno	17	<LD	20	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	20.000	
	Criseno	140	220	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Benzo(b)fluoranteno	<LD	84	220	130	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Benzo(k)fluoranteno	210	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Benzo(a)pireno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.500	
	Indeno(1,2,3)pireno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	25.000	
	Dibenzo(a,h)antraceno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	600	
	Benzo(g,h,i)pirileno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
PAH total	28.435	26.804	37.493	29.349	-	-	-	-	-	-	-		

<LD: Inferir ao limite de detecção; PAH: hidrocarbonetos policíclicos; BTEX: hidrocarbonetos monoaromáticos.

**Tabela 2 - Concentrações de hidrocarbonetos monoaromáticos (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) e hidrocarbonetos policíclicos em fase livre, na água subterrânea do Auto Posto Baía do Sol Ltda. e valores de intervenção da CETESB/2005.**

Parâmetros	Poços de monitoramento										Valores de intervenção da Cetesb/2005		
	01		02		03		04		05			06	
	Jul/06	Jun/08	Jul/06	Jun/08	Jul/06	Jun/08	Jul/06	Jun/08	Out/08	Out/08		Out/08	Out/08
BTEX (mg.kg <sup>-1</sup> )	Benzeno	<LD	20,24	<LD	<LD	61,80	1535,7	<LD	94,06	771,87	4763,24	5	
	Tolueno	<LD	<LD	<LD	<LD	3888,3	6916,3	148,9	2,96	6,95	169,35	700	
	m-, p-Xileno	-	4,65	-	<LD	-	3355,5	-	86,34	75,93	1019,35	-	
	o-Xileno	-	1,59	-	<LD	-	1394,2	-	8,86	7,97	77,06	-	
	Xileno total	<LD	6,23	<LD	<LD	2733,5	4749,8	963,4	95,20	83,90	1096,41	500	
	Etilbenzeno	<LD	1,06	<LD	<LD	1038,6	865,9	836,4	105,97	75,83	738,20	300	
	BTEX total	-	27,53	-	-	7722,2	14067,6	1948,7	298,19	938,55	6767,22	-	
PAH (mg.kg <sup>-1</sup> )	Naftaleno	<LD	34,53	<LD	<LD	<LD	26,075	<LD	70,91	112,71	22,54	140	
	Acenaftaleno	4,38	73,49	9,28	<LD	15,54	<LD	15,36	<LD	1,16	<LD	-	
	Acenafteno	<LD	23,25	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,64	-	
	Fluoreno	1,29	50,81	1,36	<LD	3,03	<LD	0,39	<LD	7,43	0,67	-	
	Fenantreno	1,09	<LD	0,93	<LD	3,09	<LD	<LD	<LD	20,27	6,49	140	
	Antraceno	6,01	47,50	5,71	<LD	8,63	<LD	17,68	<LD	<LD	<LD	-	
	Fluoranteno	<LD	26,21	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1,50	1,26	-	
	Pireno	<LD	139,30	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	19,31	13,94	-	
	Benzo(a)antraceno	<LD	16,68	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1,75	
	Criseno	<LD	15,90	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2,08	-	
	Benzo(b)fluoranteno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Benzo(k)fluoranteno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
	Benzo(a)pireno	85,60	<LD	9,67	<LD	8,28	<LD	6,51	<LD	<LD	<LD	0,7	
	Indeno(1,2,3)pireno	<LD	<LD	<LD	<LD	103,94	<LD	5,81	<LD	<LD	<LD	0,17	
	Dibenzo(a,h)antraceno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,18	
	Benzo(g,h,i)pirileno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	
PAH total	98,37	427,66	26,95	0,00	142,51	26,08	45,75	70,91	162,38	47,61	-		

<LD: Inferir ao limite de detecção; PAH: hidrocarbonetos policíclicos; BTEX: hidrocarbonetos monoaromáticos.

apresentou concentrações de BTEX, podendo ser reinjetada no aquífero, livre de poluentes.

Com base nas últimas vistorias dos poços de monitoramento e nas análises químicas das amostras de água subterrânea, pode-se verificar que o sistema de bombeamento e tratamento remediou a contaminação em fase livre, mas a água subterrânea ainda apresentou contaminantes como benzeno, etilbenzeno, xileno e naftaleno, em fase dissolvida, em concentrações acima dos valores de intervenção da CETESB (2005).

Na Figura 4 pode ser observado que a pluma de fase dissolvida do benzeno no plano horizontal não foi totalmente delimitada pelos trabalhos executados em 2010, considerando que o PM 08, delimitante, apresentou concentrações de contaminantes superiores às estabelecidas pela CETESB (2005). No entanto, a localização do PM 08 a montante das principais fontes de contaminação e a presença de rochas sedimentares pouco alteradas são alguns dos fatores que não permitiram a instalação de mais poços delimitantes.

Conforme pode ser observado na Figura 5, a pluma de benzeno no plano vertical foi delimitada pelo nível freático. A instalação

de poços de monitoramento profundos permitiu verificar que os contaminantes se estabilizaram próximo à zona vadosa, não sendo observadas concentrações de contaminantes em águas mais profundas.

De um modo geral, o sistema de bombeamento e tratamento instalado no Auto Posto Baía do Sol Ltda. foi eficiente na remediação da pluma em fase livre e atenuação das concentrações em fase dissolvida. Por outro lado, a técnica apresentou baixa eficácia em decorrência do longo período de bombeamento necessário à completa remediação das plumas de contaminantes, período condizente com os relatados em outros trabalhos. Por exemplo, em estudos de Abdanur (2005), o sistema de bombeamento implementado para remediar o aquífero freático contaminado com hidrocarbonetos leves em fase livre não aquosa (LNAPL) operou no período de agosto de 2003 a junho de 2004, atingindo redução na espessura da pluma em aproximadamente 98% do valor encontrado no início da remediação.

No período de três anos, os responsáveis legais pelo Auto Posto Baía do Sol Ltda. somaram um custo de R\$ 50.000,00 referentes aos trabalhos de investigação ambiental e de remediação por bombeamento

**Tabela 3** - Espessuras da fase livre, obtidas no poço de monitoramento 01, no período de 3 de setembro de 2008 a 26 de dezembro de 2010, após a implantação da técnica de bombeamento e tratamento no Auto Posto Baía do Sol Ltda., no município de São Sebastião, São Paulo.

Data	PRFL 01		Tempo entre golpes da bomba (minutos)	Volume de água+óleo bombeado por período (L)	Volume total de água+óleo bombeado (L)	Volume de fase livre (óleo) removido por período (L)	Volume total de fase livre (óleo) removido (L)
	Nível da água (m)	Espessura da fase livre (cm)					
03/09/2008	2,30	5,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19/09/2008	2,23	1,00	10,00	11059,20	11059,20	2,00	2,00
03/10/2008	2,00	0,00	10,00	9676,8	20736,00	0,00	2,00
13/10/2008	2,55	1,00	5,00	13824,00	34560,00	0,00	2,00
27/10/2008	2,61	2,00	10,00	9676,80	44236,80	5,00	7,00
07/11/2008	2,49	1,00	15,00	16128,00	36864,00	0,00	7,00
08/12/2008	2,43	2,00	10,00	38707,20	73267,20	3,00	10,00
22/01/2009	2,40	2,00	10,00	60134,40	104371,20	4,00	14,00
07/04/2009	2,60	4,00	10,00	104371,20	141235,20	9,00	23,00
28/04/2009	2,14	1,00	10,00	97459,20	170726,40	2,00	25,00
17/05/2009	2,00	1,00	10,00	79488,00	183859,20	2,00	27,00
17/06/2009	2,28	1,00	15,00	32716,80	173952,00	0,00	27,00
28/07/2009	2,10	1,00	10,00	62899,20	233625,60	5,00	32,00
26/08/2009	2,15	1,00	10,00	69811,20	253670,40	0,00	32,00
21/10/2009	2,54	3,00	15,00	58060,80	232012,80	0,00	32,00
20/11/2009	2,25	18,00	15,00	52992,00	286617,60	3,00	35,00
16/12/2009	2,30	14,00	10,00	77414,40	331084,80	3,00	38,00
18/02/2010	2,40	13,00	10,00	82944,00	314956,80	1,00	39,00
11/03/2010	2,34	4,00	10,00	76723,20	363340,80	1,00	40,00
26/05/2010	2,34	filme	10,00	111283,20	442368,00	1,50	41,50
22/07/2010	2,33	0,00	10,00	106444,80	421401,60	0,00	41,50
10/09/2010	2,22	0,00	10,00	126489,60	489830,40	0,00	41,50
30/09/2010	2,32	0,00	10,00	87782,40	530150,40	0,00	41,50
16/11/2010	2,35	0,00	10,00	80870,40	502272,00	0,50	42,00
13/12/2010	2,37	0,00	10,00	64972,80	554803,20	0,00	42,00
26/12/2010	2,38	0,00	10,00	60134,40	590284,80	0,00	42,00

PRFL 01: Poço para a retirada da fase livre (óleo); PAH: hidrocarbonetos policíclicos; BTEX: hidrocarbonetos monoaromáticos.



e tratamento. Estimou-se que para a conclusão da investigação e da remediação por bombeamento e tratamento, com as campanhas semestrais de monitoramento da área contaminada, ainda seria necessário investir, aproximadamente, R\$ 30.000,00. Portanto, o custo total para a recuperação da pluma de fase livre da área do Auto Posto Baía do Sol Ltda. foi da ordem de R\$ 80.000,00 (valores referentes ao ano de 2010). Os custos de implantação e operação do sistema de remediação apresentados para o Auto Posto Baía do Sol Ltda. foram equivalentes aos citados por Cruz (2006), como pode ser observado na Tabela 5.

Cruz (2006) realizou uma comparação entre as diversas técnicas de remediação disponíveis e concluiu que a técnica de remediação por bombeamento e tratamento da água subterrânea apresenta alta aplicabilidade, podendo ser utilizada com sucesso em áreas de postos de combustíveis que apresentam contaminação por hidrocarbonetos. Por outro lado, Sillos (2006) relatou que, na opinião de proprietários de postos de combustíveis, a técnica de bombeamento e tratamento não é adequada em razão dos períodos prolongados de operação necessários à completa remediação das áreas contaminadas. Apesar disso, neste mesmo estudo, este autor apresentou resultados obtidos por uma empresa que implantou e operou 10 sistemas de remediação, entre

eles, extração multifásica, *air sparging* e *biosparging*, em áreas contaminadas por atividades de postos de combustíveis, e verificou que a média do tempo de recuperação da área foi de 23 meses e o custo médio de remediação foi de R\$ 198.000,00 (valores do ano de 2005). No entanto, como citado por Trovão (2006), para que qualquer tecnologia de remediação apresente resultados satisfatórios, a primeira medida a ser tomada é a eliminação das fontes contaminadoras, com reformas e manutenções nos postos de combustíveis. Lopes (2005) também evidencia que existe atualmente uma tendência mundial pela escolha de técnicas de remediação sustentáveis, o que implica a conformidade das atividades corretivas com os princípios de desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, Stier (2004) destaca que, no processo de tomada de decisão, o sucesso da remediação está diretamente relacionado à compreensão abrangente das condições do site e não do uso da tecnologia mais recente.

## CONCLUSÕES

Os postos de revenda de combustíveis, principalmente os que apresentam muito tempo de operação, são potencialmente poluidores do meio

**Tabela 4** – Concentrações de hidrocarbonetos monoaromáticos (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) e hidrocarbonetos policíclicos na água subterrânea do Auto Posto Baía do Sol, em dezembro de 2010 e valores de intervenção da CETESB/2005.

Parâmetros 01	Poços de monitoramento												Valores de Intervenção CETESB/2005	
	01	02	03	03	04	05	06	06	07	08	09	CAIXA SAO		
BTEX (mg.kg <sup>-1</sup> )	Benzeno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1721,8	3,75	<LD	<LD	323,41	<LD	<LD	5
	Tolueno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	52,97	0,94	<LD	<LD	44,12	<LD	<LD	700
	m-, p-Xileno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	365,06	2,37	<LD	<LD	764,64	<LD	<LD	-
	o-Xileno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	11,36	3,21	<LD	<LD	22,16	<LD	<LD	-
	Xileno total	-	-	-	-	-	376,42	5,58	-	-	786,80	-	-	500
	Etilbenzeno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	376,07	1,07	<LD	<LD	740,50	<LD	<LD	300
	BTEX total	-	-	-	-	-	2526,3	11,34	-	-	1894,8	-	-	-
PAH (mg.kg <sup>-1</sup> )	Naftaleno	148,97	6,82	24,33	92,99	1,39	145,39	0,53	<LD	<LD	237,53	<LD	-	140
	Acenaftaleno	539,91	27,55	2,17	<LD	2,49	7,04	2,83	<LD	<LD	0,58	<LD	-	-
	Acenafteno	23,61	27,55	0,35	1,67	0,49	0,83	0,35	<LD	<LD	0,87	<LD	-	-
	Fluoreno	60,97	11,56	1,61	<LD	0,87	0,46	0,87	<LD	<LD	0,55	<LD	-	-
	Fenantreno	108,71	2,77	<LD	<LD	<LD	1,77	1,03	<LD	<LD	0,66	<LD	-	140
	Antraceno	10,74	7,25	<LD	<LD	<LD	1,65	0,65	<LD	<LD	0,81	<LD	-	-
	Fluoranteno	37,88	6,21	<LD	<LD	<LD	1,83	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-
	Pireno	54,75	3,61	<LD	<LD	<LD	1,30	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-
	Benzo(a)antraceno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	1,75
	Criseno	5,42	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-
	Benzo(b)fluoranteno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-
	Benzo(k)fluoranteno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-
	Benzo(a)pireno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	0,7
	Indeno(1,2,3)pireno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	0,17
	Dibenzo(a,h)antraceno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	0,18
	Benzo(g,h,i)pirileno	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	-	-
	PAH total	990,93	93,32	28,45	94,66	5,27	160,26	6,26	-	-	241,00	-	-	-

<LD: Inferir ao limite de detecção; PAH: hidrocarbonetos policíclicos; BTEX: hidrocarbonetos monoaromáticos.

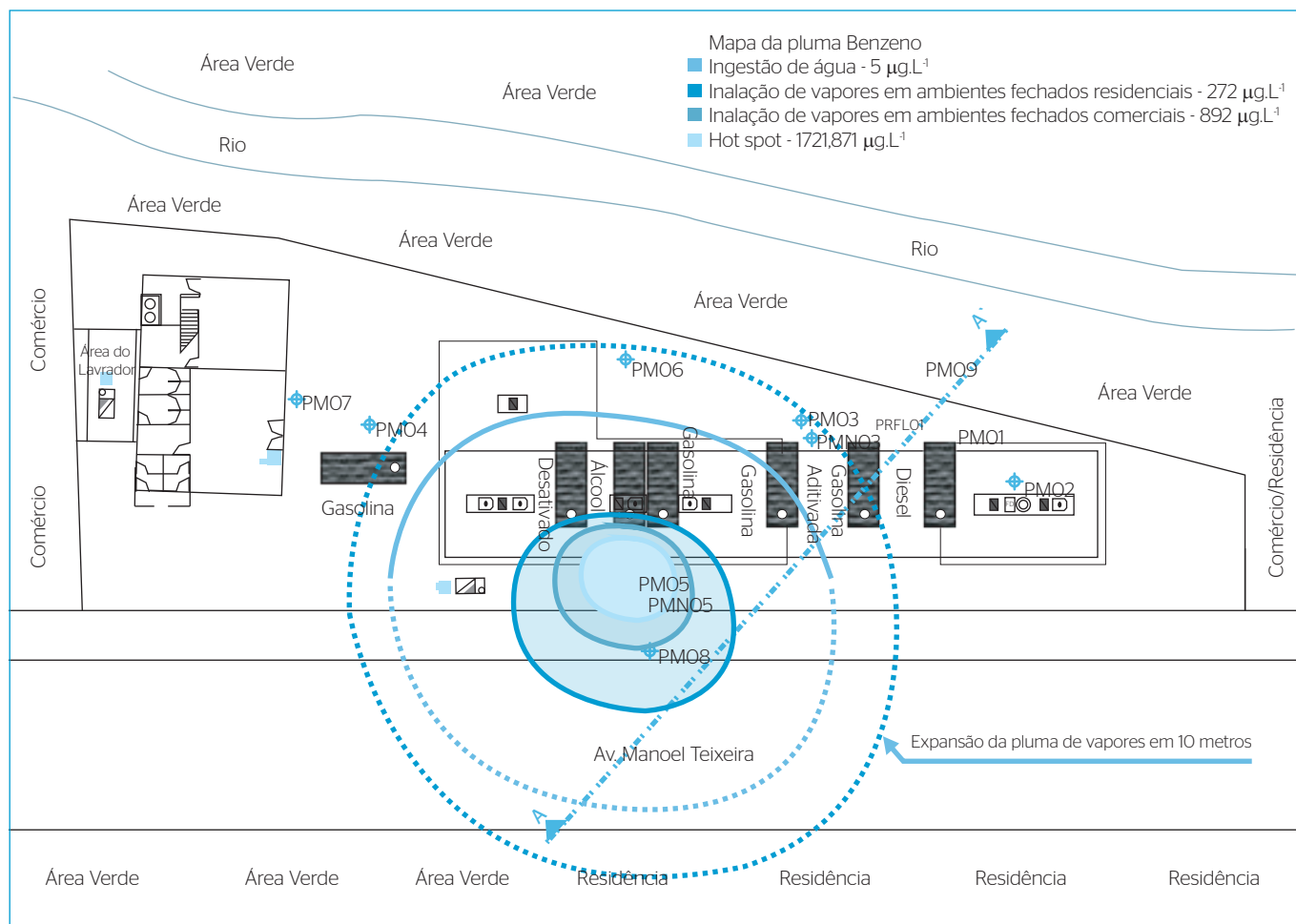


Figura 4 - Pluma dissolvida de benzeno no plano horizontal, na área do Auto Posto Baía do Sol Ltda. (CONSTRUFER, 2011).

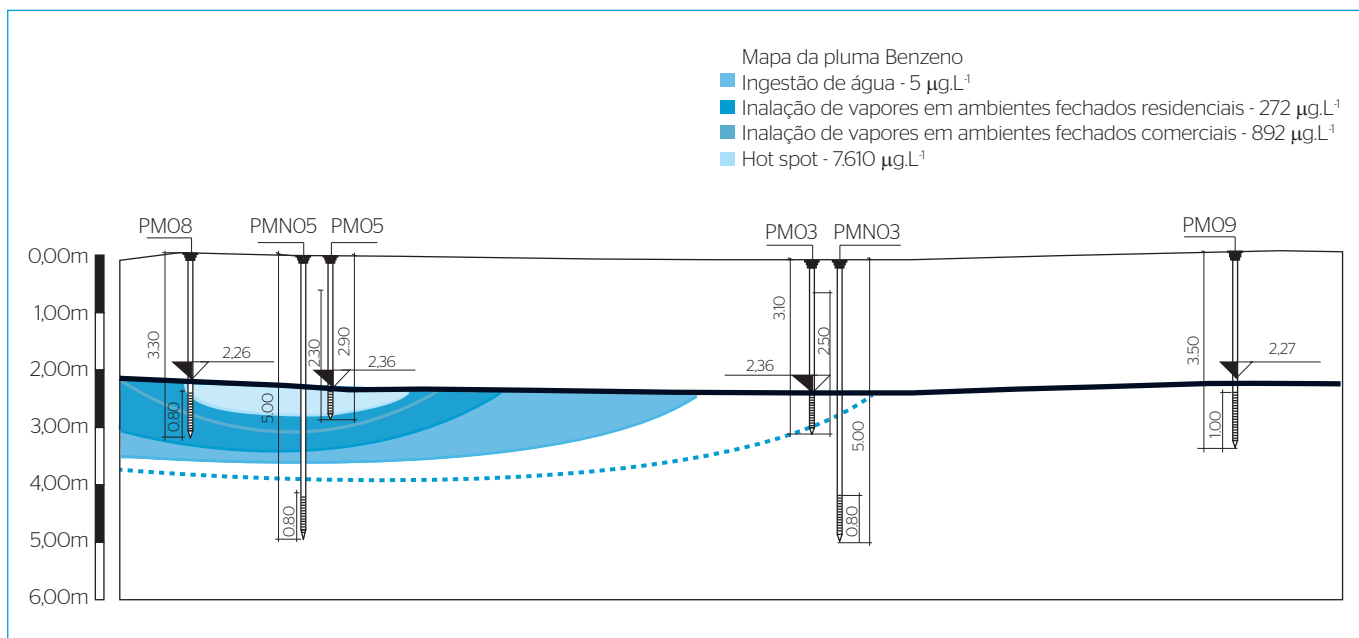


Figura 5 - Pluma dissolvida de benzeno no plano vertical, na área do Auto Posto Baía do Sol Ltda. (CONSTRUFER, 2011).



**Tabela 5 - Custos de investigação e remediação por bombeamento e tratamento em áreas de postos de combustíveis contaminados por hidrocarbonetos.**

Auto Posto	Valor de investigação (ambiental + remediação)	Valor estimado da remediação
Baía do Sol Ltda.	R\$ 50.000,00	R\$ 18.000,00
Em Caxias do Sul (Cruz, 2006)	-	R\$ 23.000,00

ambiente em decorrência de vazamentos e derrames de combustíveis que ocorreram, em sua maioria, no passado, quando inexistiam técnicas adequadas para conter tal combustível. Assim, a contaminação percola no solo e atinge os aquíferos.

Diante das exigências ambientais e da necessidade e importância da preservação dos aquíferos, os custos com investigação ambiental e remediação de solo e de águas subterrâneas devem ser considerados investimentos.

No Brasil, a preocupação com o potencial poluente de postos de combustíveis e a concentração de esforços na delimitação de plumas de contaminantes e remediação de aquíferos contaminados é evidente, visto que o consumo de água subterrânea aumentou nessas últimas décadas. No caso do Auto Posto Baía do Sol Ltda., a técnica de bombeamento e tratamento, implantada com o objetivo de recuperar os poluentes oriundos de vazamentos e derrames de combustíveis, mostrou-se eficiente, considerando que os poluentes em fase livre foram totalmente removidos. É preciso salientar ainda que o sistema de bombeamento da pluma de contaminantes atuou como uma barreira hidráulica, impedindo que esta atingisse os pontos a jusante, protegendo o corpo d'água presente.

O longo período para a realização das operações de bombeamento e tratamento da água subterrânea na área do Auto Posto Baía do Sol Ltda. pode ser atribuído à proximidade ao oceano, recebendo a área em processo de remediação grande influência das atividades das marés, o

que aumenta a necessidade de manutenções frequentes do sistema para manter o nível da bomba próximo ao do nível freático.

A água subterrânea contaminada, após passar pela caixa SAO e pelo carvão ativado, não apresentou concentrações de poluentes em fase livre e em fase dissolvida. Dessa forma, a água reinjetada a montante ao ponto remediado não apresentou concentrações de contaminantes, sendo devolvida ao meio ambiente com padrões de potabilidade aceitáveis.

A técnica de bombeamento e tratamento mostrou-se de fácil implantação e manutenção, e não apresentou maiores riscos para a continuidade segura das atividades de armazenamento e revenda nos postos de combustíveis.

A eficiência do bombeamento e tratamento no Aquífero Litorâneo contaminado por derivados de petróleo, classificados como NAPL, foi evidenciada pela remediação da fase livre e pela atenuação da contaminação em fase dissolvida.

## RECOMENDAÇÕES

- É imprescindível fazer a limpeza da caixa SAO e dar destino adequado aos resíduos gerados, bem como a realizar testes de estanqueidade nos equipamentos anualmente.
- As manutenções do sistema de remediação devem ser realizadas semanalmente para ajuste da altura da bomba ao nível do freático, para que o bombeamento tenha atuação direta na franja capilar, profundidade na qual, os contaminantes oriundos do petróleo estabilizam, tendo, portanto, um maior rendimento das operações de bombeamento e tratamento.
- É recomendável que haja maior fiscalização e intervenção dos órgãos responsáveis pela qualidade dos aquíferos, principalmente dos aquíferos mais vulneráveis, como o Aquífero Sedimentar Litorâneo.

## REFERÊNCIAS

ABDANUR, A. (2005) *Remediação de solo e água subterrânea contaminados por hidrocarbonetos de Petróleo: Estudo de caso na refinaria Duque de Caxias/RJ*. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 156 p.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2009) Boletim mensal da qualidade dos combustíveis automotivos brasileiros. Brasília.

CBH-LN - Comitê de Bacias Hidrográficas do Litoral Norte - UGRHI 03. (2009) *Revisão do Plano de Bacia da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos - 2008/2011*. Secretaria Executiva: Agência Ambiental - Ubatuba/CETESB, Ubatuba, 230 p.

CETESB. (2005) *Valores orientadores para solo e águas subterrâneas no Estado de São Paulo*. Decisão de Diretoria nº 195/2005 - E, de 23 de novembro de 2005. 4 p.

CETESB. (2007) *Procedimentos para Gerenciamento de Áreas Contaminadas*. Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007. 40 p.

CETESB. (2009) *Roteiro para execução de investigação detalhada e elaboração de plano de intervenção em Postos e Sistemas Retalhistas de Combustíveis*. Decisão de Diretoria nº 263/2009/P, de 20 de outubro de 2009. 55 p.

- CETESB. (2010) Texto explicativo: *relação de áreas contaminadas e reabilitadas no Estado de São Paulo*. 14 p.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2000) CONAMA nº 273. 4 p.
- CONSTRUFER ENGENHARIA. (2011) *Estudo Complementar a Investigação Detalhada do Auto Posto Baía do Sol Ltda.* - Guaratinguetá, São Paulo. 40 p.
- CRUZ, F. (2006) Remediação de solos contaminados por gasolina (Trabalho de conclusão de curso - engenharia química). Porto Alegre, UFRGS/DEQUI, 38 p.
- Giampá, C.E.Q. (2010) *Demanda por água na América Latina cresceu 76% em 15 anos*. Revista Água e o Meio Ambiente Subterrâneo. ABAS - Revista Técnica Águas Subterrâneas - ano 3, n. 18. pp 10-11.
- IBGE. (2010) *Censo Demográfico Brasil 2010: São Sebastião/SP*.
- IRITANI, M.A. & EZAKI, S. (2009) *As águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. Secretária do Estado do Meio Ambiente - SMA. São Paulo, 104 p.
- LOPES, R.F. (2005) Remediação Sustentável: Conceito e Exemplos - Golder Associates. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 10 p.
- MELLO, A.Y.I. & ROMEIRO, A.R. (2010) *Importância da escala para a valoração dos serviços ecossistêmicos*. V Encontro Nacional da Anppas. Florianópolis, 17 p.
- SILLOS, M.R.A. (2006) Valorização de processos de remediação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos do petróleo. São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológica, 122 p.
- SILVA, L.F.; CAMPOS, C.P.; MANOLESCU, F.M.K. (2001) *A região litorânea do cone leste paulista*. IX Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino Americano de Pós-graduação - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 4 p.
- STIER, T. (2004) Seguindo as tendências das tecnologias de remediação. Será que às vezes não escolhemos a abordagem errada? São Paulo.
- TEIXEIRA, R.M. (2008). *Postos de combustíveis - contaminação de aquíferos e solos por vazamento em tanques subterrâneos*. Saneamento Ambiental. Disponível em: <[http://sanambiental.blogspot.com/2008\\_10\\_01\\_archive.html](http://sanambiental.blogspot.com/2008_10_01_archive.html)>. Acesso em: 05 jun 2009
- TROVÃO, R.S. (2006) *Análise ambiental de solos e águas subterrâneas contaminadas com gasolina: estudo de caso no município de Guarulhos, São Paulo*. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mineral) - USP, São Paulo, 224 p.
- USEPA. (1995) *Light nonaqueousphase liquids*. United States Environmental Protection Agency. EPA, Washington, 28 p.
- USEPA. (1996) *Low-flow (minimal drawdown) groundwater sampling procedures*. United States Environmental Protection Agency. EPA, Washington, 12 p.