

ESTUDO DE MIGRAÇÃO DE VAPORES DO SOLO POR UTILIDADES SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DA GRANDE SÃO PAULO

Cristina Maluf¹ (cristina.maluf@ambscience.com), Rodrigo Cunha², Rafael Sato³,
Rafael Sousa³, Vitor Ponce⁴

Resumo

A intrusão de vapores é um fenômeno conhecido há pelo menos cinco décadas, mas ainda apresenta desafios, especialmente quanto à identificação das principais vias de entrada de vapores de contaminantes do solo e da água subterrânea em edificações.

Este estudo foi conduzido em uma antiga área industrial na Grande São Paulo, onde o solo e a água subterrânea estão contaminados por Tetracloroetano (PCE), Tricloroetano (TCE) e subprodutos. A investigação focou em edificações a jusante da fonte, seguindo o fluxo da água subterrânea. A pluma contaminante já ultrapassou os limites da área original, alcançando propriedades vizinhas e ampliando os riscos ambientais e à saúde humana.

O objetivo do trabalho foi investigar a intrusão de vapores por utilidades subterrâneas, com foco em: (1) avaliar qualitativamente o potencial

de conduítes elétricos e encanamentos de esgoto como vias de transporte de vapores e (2) verificar se essa abordagem pode auxiliar na escolha estratégica de pontos de amostragem de ar ambiente para otimizar a avaliação de risco à saúde por inalação de Compostos orgânicos voláteis (VOC).

Na primeira etapa, foi usada amostragem passiva em caixas de tomadas, interruptores e ralos. Na segunda, locais com possível intrusão foram avaliados com câmaras de fluxo, coletas de ar ambiente pela metodologia USEPA TO-15A e a amostragem passiva foi utilizada de forma complementar.

Os resultados confirmaram o papel das utilidades como vias de intrusão e destacam a eficácia da abordagem integrada das técnicas na avaliação de riscos.

Palavras Chave: Intrusão de vapores, vias preferenciais, risco de inalação, amostragem passiva, USEPA TO-15.

1. Ambscience Engenharia

2. Centro Universitário Senac

3. Vapor Solutions e VSOL Group

4. Éllu Ambiental

Abstract

Vapor intrusion has been a known phenomenon for at least five decades, but it still presents challenges, especially regarding the identification of the main pathways through which contaminant vapors from soil and groundwater enter buildings.

This study was conducted in a former industrial area in the greater São Paulo, where the soil and groundwater are contaminated with Tetrachloroethene (PCE), Trichloroethene (TCE) and their degradation byproducts. The investigation focused on buildings located downgradient from the source. Following the groundwater flow. The contaminant plume has already extended beyond the boundaries of the original site, reaching neighboring properties and increasing environmental and human health risks.

The objective of this study was to investigate vapor intrusion through underground utilities, focusing on: (1) qualitatively evaluate the potential of electrical conduits and sewer pipes as vapor intrusion pathways and (2) determine whether this approach can assist in the strategy for indoor air sampling locations selection to optimize the health risk assessment for inhalation of volatile organic compounds (VOCs).

In the first stage, passive sampling was used in outlet boxes, light switches, and drains. In the second stage, locations with potential vapor intrusion were evaluated using flux chambers, indoor air samples by the USEPA TO-15A and passive sampling was used as a complementary approach.

The results confirmed the role of utilities as vapor intrusion pathways and highlighted the ef-

fectiveness of the integrated approach using different techniques in risk assessment.

Keywords: Vapor Intrusion, preferential pathways, inhalation risk, passive sampling, USEPA TO-15.

1. Introdução

A intrusão de vapores é um fenômeno ambiental de crescente preocupação, especialmente em áreas urbanas onde a presença de compostos orgânicos voláteis (VOCs) no solo e na água subterrânea pode resultar na migração de vapores tóxicos para ambientes internos. Essa migração ocorre tipicamente através de caminhos preferenciais, como fissuras em fundações ou outras estruturas subterrâneas. No entanto, as estruturas subterrâneas, incluindo conduítes elétricos e encanamentos de esgoto, têm emergido como potenciais vias de transporte de vapores, podendo representar a maior via de risco à saúde humana (USEPA, 2015).

A caracterização e o monitoramento eficazes dessas vias são essenciais para compreender os mecanismos envolvidos na intrusão de vapores e para subsidiar estratégias de remediação e avaliação de risco. Embora a literatura científica tenha avançado significativamente no estudo da intrusão de vapores, o papel específico das utilidades subterrâneas ainda é pouco explorado, limitando a capacidade de projetar investigações ambientais abrangentes e conservadoras.

Neste contexto, este trabalho visa contribuir para uma melhor compreensão do papel das utilidades subterrâneas no processo de intrusão de vapores, por meio da investigação da intrusão de vapores por utilidades subterrâneas, avaliando não

apenas seu papel como vias de transporte, mas também a aplicabilidade desse tipo de estudo para o planejamento estratégico de amostragem de ar ambiente. A integração de técnicas de amostragem passiva e ativa de vapores, associada à técnica de câmaras de fluxo, oferece uma abordagem robusta para compreender os processos de migração de vapores e seus impactos potenciais na qualidade do ar interno e na saúde pública.

Este estudo foi realizado em uma área de uma antiga indústria localizada na região da Grande São Paulo. A área atualmente possui solo e água subterrânea impactados por PCE, TCE e demais subprodutos. Para a investigação, foram selecionadas edificações situadas a jusante da antiga unidade industrial, em conformidade com a direção do fluxo das águas subterrâneas contaminadas. Observa-se que a pluma de contaminação já extrapolou os limites da área original, atingindo propriedades vizinhas e potencialmente ampliando os riscos ambientais e à saúde humana.

2. Objetivos

O objetivo principal deste estudo foi investigar a intrusão de vapores por utilidades subterrâneas, abordando dois aspectos principais. O primeiro objetivo foi avaliar qualitativamente o potencial de conduítes elétricos e encanamentos de esgoto atuarem como vias de transporte de vapores. Para isso, foi utilizada a técnica de amostragem passiva de vapores, com dispositivos posicionados em locais estratégicos como caixas de tomadas, interruptores e ralos de chão em edificações situadas em áreas com potencial para a intrusão de vapores. Essa abordagem visou iden-

tificar se essas utilidades subterrâneas poderiam funcionar como rotas preferenciais para a migração de vapores a partir do solo ou da água subterrânea para o interior das edificações.

O segundo objetivo foi determinar se a investigação da intrusão de vapores por essas utilidades subterrâneas poderia auxiliar no posicionamento estratégico de pontos de amostragem de ar ambiente, com a finalidade de otimizar abordagens mais eficazes para a avaliação de risco à saúde humana, especificamente no que diz respeito à inalação de compostos orgânicos voláteis (VOCs). Para esse fim, os locais identificados como potenciais vias de intrusão na primeira etapa foram submetidos a medições adicionais utilizando câmaras de fluxo e amostragem ativa de ar, o que permitiu quantificar as taxas de migração de vapores e estimar as concentrações teóricas de VOCs no ar ambiente. Além disso, amostras de ar ambiente de forma ativa, pela metodologia USEPA TO-15, foram coletadas para uma avaliação direta do risco de inalação. Como parte da validação metodológica, amostradores passivos também foram utilizados em ar ambiente, permitindo uma comparação entre as diferentes técnicas de amostragem.

3. Metodologia

Foram selecionadas 2 edificações vizinhas à antiga unidade industrial que se situam sobre a pluma de contaminação de água subterrânea, as quais foram denominadas como Edificação 1 e Edificação 2.

Na Edificação 1 toda a parte elétrica é estruturada de forma exposta e aérea, ou seja, conduítes elétricos não se classificam como uma via potencial de intrusão de vapores, pois não propor-

cionam caminho para a migração do ar logo abaixo do piso para o ar interno da Edificação. Portanto, para esta Edificação a via mais relevante seriam os ralos. Dessa forma, foram selecionados 2 ralos localizados em banheiros. As Figuras 1 e 2 ilustram os pontos selecionados para a Edificação 1.

A Edificação 2 era composta por 2 escritórios e um banheiro. Foram então selecionados para o estudo o ralo localizado no banheiro e uma caixa

de conduítes de passagem de fios de eletricidade. Para este caso ambos são vias relevantes de intrusão de vapores. Entretanto, foi permitida somente a amostragem na caixa de conduítes. A Figura 3 ilustra o ponto selecionado para a Edificação 2.

Com os pontos selecionados o estudo foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira foi realizada a investigação qualitativa por meio de amostragem passiva de vapores.



Figura 1. Ralo 1 Edificação 1. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)



Figura 2. Ralo 2 Edificação 1. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

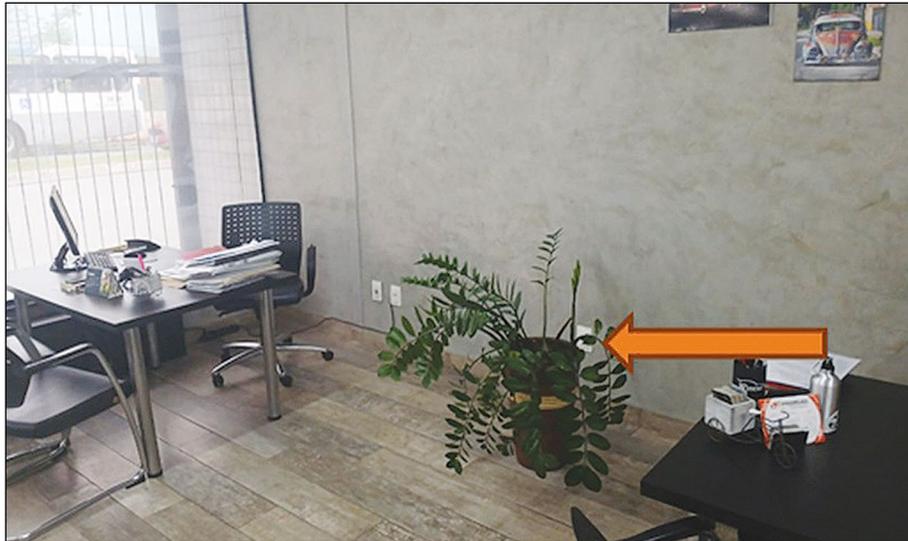


Figura 3. Caixa elétrica de passagem conduítes edificação 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

4. Material e método para o primeiro objetivo

A metodologia de amostragem passiva de vapores foi realizada com amostrador VSORBER®. Nesta etapa do estudo buscou-se uma técnica de alta robustez e sensibilidade. Em termos de robustez, a escolha da técnica de amostragem passiva traz grandes vantagens quanto aos efeitos de variação temporal das características ambientais de um determinado local como, por exemplo: temperatura, pressão e índice pluviométrico (ASTM, 2017). Isso se deve ao fato dos amostradores

passivos de vapores, de forma geral, terem períodos de amostragem longos, quando comparados a amostragens ativas, usualmente de 7-14 dias. Além disso, por ser um longo período de amostragem e por especificidades da análise, pode-se gerar sensibilidades de avaliação até sub parte por bilhão (ppbv) dependendo dos compostos que são avaliados (ASTM, 2017).

O período de amostragem adotado foi de 7 dias. Por se tratar de uma avaliação praticamente sem restrições de fluxos de ar e pelo fato das



Figura 4. Câmara de confinamento para teste qualitativo. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)



Figura 5. Teste da massa de calafetar. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

substâncias químicas de interesse (compostos ete-no clorados) terem alta volatilidade, o período de 7 dias foi suficiente para tal avaliação. Períodos mais longos de amostragem são utilizados quando se necessita ganhar ainda mais sensibilidade em níveis ainda mais baixos que sub ppbv, para a identificação de compostos menos voláteis, como naftaleno, por exemplo, para se avaliar tempos de exposição prolongados e em locais com alta restrição de fluxos de ar, como solos muito argilosos ou superfícies pouco permeáveis.

Como forma de confinamento, para se reduzir diluições dos vapores provenientes dos ralos de ambas as edificações, foram empregadas câmaras de fluxo, as Figura 4, sendo os amostradores passivos instalados internamente às câmaras. Como vedação, no contato das câmaras de fluxo com o chão, foi necessária a aplicação de massa para calafetação. A massa empregada, do Tipo

A, foi avaliada previamente por meio de um teste em confinamento com amostragem passiva, para garantir a ausência das SQIs na massa. A Figura 5 ilustra o teste, feito num mesmo período de amostragem passiva. A tabela 1 mostra os resultados das massas de calafetação.

Para a avaliação da intrusão pelo conduíte, o confinamento não foi necessário, pois entende-se que o próprio espelho protetor da estrutura elétrica já foi suficiente para reduzir relevante-mente a interferência do ar ambiente no resulta-do apresentado pelo amostrador passivo.

Após, instalados os amostradores passivos e as câmaras de fluxo, os amostradores passivos foram retirados após 7 dias de amostragem e enviados ao laboratório para análise. A análise foi realizada pelo laboratório Vapor Solutions por procedimento acreditado com base na norma ISO 17025. O método analítico utilizado foi a des-

TABELA 1– Resultados da Massa de Calafetar

MASSA DE CALAFETAR	UNIDADE	Tipo A	Tipo B	BRANCO CONTROLE
Tetracloroetano	ng	< 10,00	63,32	< 10,00

sorção térmica, seguida de cromatografia gasosa acoplada a um espectrômetro de massas conforme o USEPA TO-17 (USEPA, 1999).

5. Material e método para o segundo objetivo

O segundo objetivo trata-se da verificação da ocorrência de concentrações das SQIs no ar ambiente nos locais onde foi identificada a intrusão de vapores nas utilidades, com vistas a destacar a relevância desse tipo de investigação para a determinação do posicionamento de pontos de amostragem de ar ambiente. Foram, para este objetivo, utilizadas 3 técnicas de amostragem, buscando trazer robustez para os resultados do estudo.

5. 1. Amostragem Passiva em ar ambiente

Para estudos de quantificação de concentrações em ar ambiente e para a avaliação de risco de inalação, mesmo sendo possível o uso de cálculos estimados de concentração, a amostragem passiva nem sempre é a primeira opção. Isto se deve à incerteza associada à definição da

concentração, em vista da inexistência de um volume real quando se é realizada uma amostragem passiva. Apesar disso, a amostragem passiva de vapores em ar ambiente traz benefícios quanto à cobertura temporal da amostragem, tornando assim a amostragem mais robusta no quesito temporalidade (ISO, 2015). Dessa forma, muitas vezes essa técnica é utilizada como uma linha de evidência complementar, suplementando assim as conclusões sobre o risco de inalação (DTSC, 2023).

Para este trabalho a amostragem passiva foi realizada antes das outras amostragens, pois é a que proporciona o maior período de amostragem e a que menos impacta nos fluxos de vapores nos ambientes amostrados.

Nos locais em que foram identificadas qualitativamente a presença das SQIs, foram instalados amostradores passivos próximos às vias de intrusão identificadas com período de coleta de 7 dias. Nesta etapa foram utilizados dois tipos diferentes de amostradores passivos,

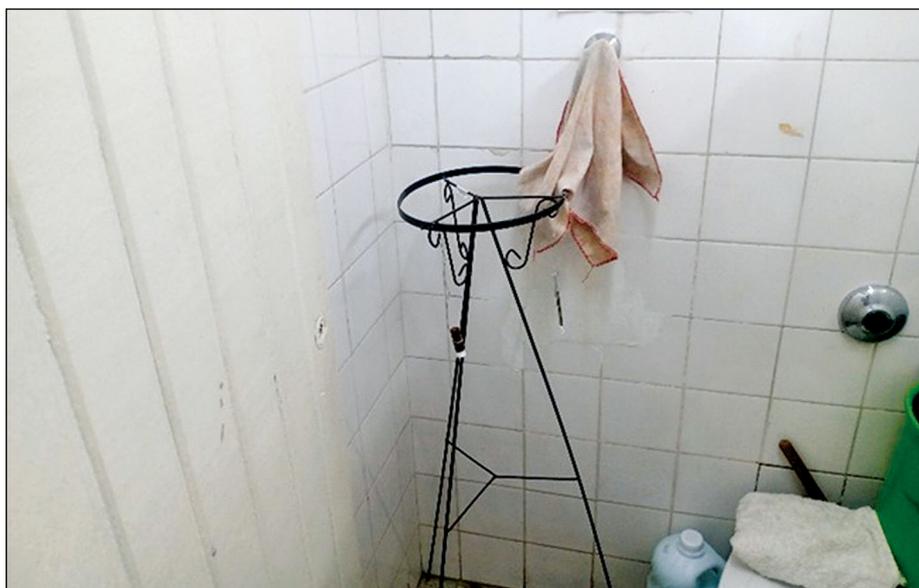


Figura 6. Vsorbers® e Hybrids® Edificação 1 próximo ao ralo 1. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)



Figura 7. Vsorbers® e Hybrids® Edificação 1 próximo ao ralo 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

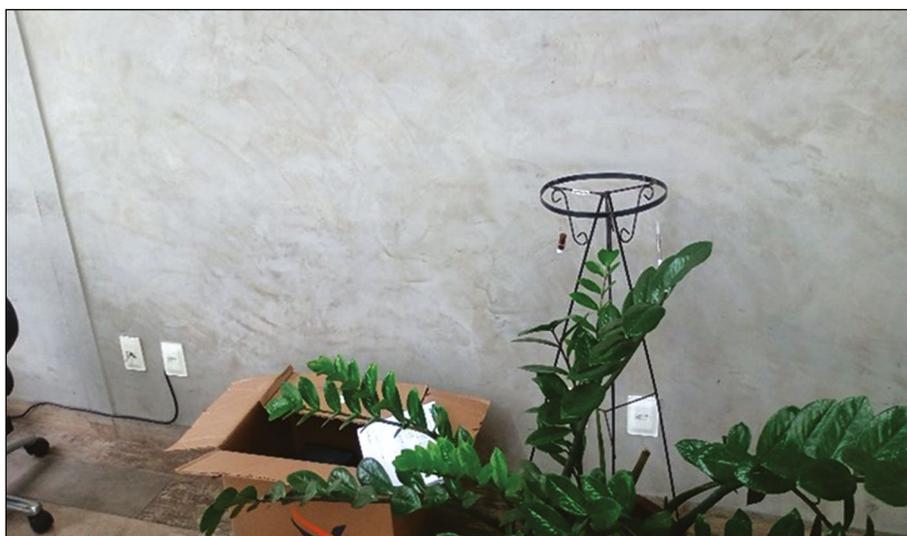


Figura 8. Vsorbers® e Hybrids® no escritório próximo a caixa elétrica na Edificação 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Vsorbers® e HybridsSS®, os quais foram posicionados em suportes na altura da zona de respiração média de adultos - 1,5m de altura.

As figuras 6, 7 e 8 ilustram os amostradores passivos instalados nos locais.

Após os 7 dias, a amostragem foi finalizada e as amostras foram enviadas para o laboratório, sendo analisadas pelo método USEPA TO-17, para os Vsorbers®, e pelo método USEPA 8260, para os Hybrids®.

5. 2. Ar Ambiente - USEPA TO-15

A metodologia de amostragem e análise USEPA TO-15 é a mais utilizada e com maior reconhecimento internacional para a avaliação de risco de inalação. Diferentemente das análises de amostradores passivos, pela metodologia USEPA TO-15A todos os parâmetros para se obter a concentração com precisão, pois o volume/alíquota da amostra analisada é controlado e a determinação dos parâmetros é realizada no labo-

ratório. As coletas são realizadas em recipientes evacuados sempre acompanhados de acessórios para regulagem dos fluxos de amostragem (USEPA, 2019). Os períodos de amostragem adotados para ar ambiente normalmente são de 24 horas, quando se trata de uma avaliação residencial, e 8 horas, quando se trata de exposição de um trabalhador à contaminação ambiental.

A amostragem de ar ambiente pela metodologia USEPA TO-15 é uma amostragem integrada, ou seja, ela representa uma média das concentrações encontradas durante todo o período da amostragem (USEPA, 2019). Dessa forma, o ponto crucial para que uma amostragem de ar ambiente por recipientes evacuados seja representativa, é a constância do fluxo de amostragem. Para que isto seja possível são utilizados controladores de fluxo que são acessórios que além de restrição de fluxo, possuem também um diafragma que se molda conforme o vácuo é perdido durante a coleta, garantindo a constância do fluxo. A constância do fluxo é muito mais importante que o fluxo

propriamente dito, pois, o mais importante para uma amostra integrada é que as alíquotas coletadas sejam iguais durante todo o período.

Para este estudo foram realizadas amostragens de 24h em todos os locais onde foram observadas as SQL's na avaliação inicial qualitativa. O aparato de amostragem foi posicionado com o ponto de captura de amostra posicionado a 1,5 m de altura. As figuras 9, 10 e 11 ilustram a amostragem realizada.

Após a coleta, as amostras foram enviadas ao laboratório e analisadas pelo método USEPA TO-15.

5. 3. Câmaras de Fluxo

Como linha de evidência adicional, foram utilizadas câmaras de fluxo, com a finalidade de estimar concentrações no ar ambiente e identificar a existência de fluxo de vapores, possibilitando avaliar a contribuição de cada via de intrusão. As câmaras de fluxos proporcionam o confinamento de um volume de ar sobre um ponto onde possa ocorrer intrusão de vapores (JUNIOR e ALBERTO,



Figura 9. Ar Ambiente Instalado na Edificação 1 Próximo ao Ralo 1. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)



Figura 10. Ar Ambiente Instalado Edificação 1 Próximo ao Ralo 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)



Figura 11. Ar Ambiente Instalado no Escritório Próximo a Caixa Elétrica na Edificação 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

2021). Na aplicação dessa técnica se busca-isolar a porção de ar avaliada de interferentes existentes em um ambiente fechado. Além disso, as trocas de ar podem ser simuladas ou consideradas inexistentes na aplicação da técnica. Para este estudo não foram consideradas trocas de ar, adotando-se uma forma conservadora para se estimar concentrações de vapores no ar ambiente.

Para a amostragem, as câmaras de fluxo foram posicionadas sobre os pontos em avaliação e

foi realizada a vedação lateral da câmara. Definiu-se um período de incubação de 24 horas, a partir do qual foram realizadas as coletas de amostras de ar no interior das câmaras. Para a análise das amostras adotou-se o método USEPA TO-15. Todos os pontos avaliados na primeira etapa do estudo foram contemplados na amostragem com as câmaras de fluxo, pois indicaram o potencial de intrusão.

Para a avaliação da intrusão a partir do conduíte, foi necessária a adaptação de uma câ-



Figura 12. Câmaras de Fluxo para Tomada na Edificação 2. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)



Figura 13. Câmaras de Fluxo na Edificação 1 próximo ao ralo 1. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)



Figura 14. Amostragem TO-15 Câmaras de Fluxo na Edificação 1 próximo ao ralo 1. Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

mara de fluxo, como mostra a Figura 12. A Figura 13 ilustra os demais pontos de amostragem com as câmaras instaladas. A Figura 14 ilustra a coleta utilizando recipientes evacuados para análise pelo método USEPA TO-15.

6. Resultados e Discussão

Os resultados qualitativos do estudo mostraram a possibilidade de ocorrência de intrusão em todos os pontos avaliados. A tabela 2 apresenta os resultados obtidos para os compostos eteno clorados, SQIs do estudo. É notável a presença do tetracloroeteno e, também, de compostos de sua cadeia de degradação, como o 1,1-dicloroeteno, cis-1,2-dicloroeteno e tricloroeteno. Nos pontos de amostragem da Edificação 1 foi identificado o composto clorofórmio, que pode ser produto de degradação do Tetracloroeteno, mas exige condições específicas para que a degradação ocorra. A principal hipóte-

se para justificar a presença do clorofórmio é que a amostragem foi realizada sobre ralos, que são locais de descarte de produtos de limpeza que podem conter clorofórmio ou podem proporcionar a formação desse composto com sua aplicação.

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos por amostragem ativa em recipientes evacuados pela metodologia USEPA TO-15. Os resultados confirmam os resultados dos testes qualitativos, podendo se observar que nos locais em que as maiores massas foram identificadas no teste qualitativo foram também os locais em que se observaram as maiores concentrações na análise de ar ambiente. Para esta amostragem foi observada somente a presença do composto Tetracloroeteno, para o qual foi observada a maior massa no primeiro estudo.

A hipótese do clorofórmio ser proveniente de fontes temporárias, como o uso de produtos de

Tabela 2. Estudo Qualitativo de Vias de Intrusão – compostos identificados e respectivas massas

PONTO DE COLETA	RALO 1 - EDIFICAÇÃO 1	RALO 2 - EDIFICAÇÃO 1	CONDUÍTE - EDIFICAÇÃO 2
Unidade	ng	ng	ng
Cis-1,2-Dicloroeteno	< 10,00	< 10,00	13,44
1,1-Dicloroeteno	77,10	< 10,00	< 10,00
Tricloroeteno	< 10,00	< 10,00	271,13
Clorofórmio	3839,57	1419,10	< 25,00
Tetracloroeteno	53,04	83v0,26	6499,23

Tabela 3. Resultados para análises de amostras de Ar Ambiente obtidas por Amostragem Ativa - TO-15

PONTO DE COLETA	RALO 1 - EDIFICAÇÃO 1	RALO 2 - EDIFICAÇÃO 1	CONDUÍTE - EDIFICAÇÃO 2
Unidade	ug/m ³	ug/m ³	ug/m ³
Tricloroeteno	< 2,69	< 2,69	< 2,69
Tetracloroeteno	< 3,39	10,92	35,40
Clorofórmio	< 2,44	< 2,44	< 2,44

limpeza, e não ser um composto de degradação do Tetracloroetano, é evidenciada pela ausência de concentrações desse composto nas amostras de ar ambiente, pois caso fosse uma fonte contínua, derivada da contaminação de água subterrânea, concentrações desse composto deveriam ser identificadas, pois no estudo qualitativo as massas para ele observadas estavam na mesma ordem de grandeza de concentrações do Tetracloroetano.

A amostragem passiva, utilizando o VSORBER® e HYBRIDSS®, converge qualitativamente para os mesmos resultados obtidos pela amostragem do ar ambiente pelo USEPA TO-15. Os

resultados obtidos em massa podem ser observados nas tabelas 4 e tabela 5.

Os resultados em massa foram convertidos para concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e são apresentados na tabela 6. Para essa conversão utiliza-se a equação 1. Essa equação utiliza o fator *Uptake rate* (UR), que é a taxa de volume de ar amostrado estimado para cada

$$C = \frac{m}{UR \times t}$$

T = Tempo de exposição do amostrador;
m = resultado em massa; C = Concentração

Equação 1 (ISO, 2015)

Tabela 4. Massa de compostos orgânicos no Ar Ambiente a partir do Vsorber®

VSORBER®			
PONTO DE COLETA	RALO 1 - EDIFICAÇÃO 1	RALO 2 - EDIFICAÇÃO 1	CONDUÍTE - EDIFICAÇÃO 2
Unidade	ng	ng	ng
Tetracloroetano	< 10,00	62,91	45,37

Tabela 5. Massa de compostos orgânicos no Ar Ambiente a partir do HYBRIDSS®

PONTO DE COLETA	RALO 1 EDIFICAÇÃO 1	RALO 2 EDIFICAÇÃO 1	CONDUÍTE EDIFICAÇÃO 2
Unidade	ng	ng	ng
Tetracloroetileno	< 100,00	324,43	402,59

Tabela 6. Resultados de Amostradores passivos convertidos em concentração

PONTO DE COLETA			RALO 1 EDIFICAÇÃO 1	RALO 2 EDIFICAÇÃO 1	CONDUÍTE EDIFICAÇÃO 2
AMOSTRADOR	UR (mL/min)	TEMPO (min)	Tetracloroetano ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
VSORBER	0,47	10080	< 5,00	13,30	9,60
HYBRIDSS	0,74	10080	< 13,40	43,50	54,50

Tabela 7. Resultados Brutos das Câmaras de Fluxo

PONTO DE COLETA	RALO 1 EDIFICAÇÃO 1	RALO 2 EDIFICAÇÃO 1	CONDUÍTE EDIFICAÇÃO 2
Unidade	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Tricloroetano	< 2,69	< 2,69	16,82
Tetracloroetano	5,02	252,65	2086,04
Clorofórmio	1071,05	1444,77	< 2,44

unidade de tempo. O UR é dependente do coeficiente de difusão e, desta forma, é específico para cada composto analisado. Por este motivo, cada composto deve ser estudado individualmente para que sejam determinados empiricamente os URs. Os URs obtidos empiricamente no laboratório para VSORBER® e HYBRIDSS® para o composto Tetracloroetano são 0,47mL/min e 0,74mL/min, respectivamente.

As câmaras de fluxo também apresentaram resultados convergentes com os demais estudos. Os resultados brutos das câmaras são apresentados na tabela 7. Além da presença do Tetracloroetano, nota-se a presença do clorofórmio e do tricloroetano. As concentrações de clorofórmio, assim como na amostragem passiva do estudo qualitativo, apresentaram altos valores que não foram confirmados na amostragem de ar ambiente, evidenciando, novamente, a possibilidade da presença desse composto estar associada a uma fonte de escala pequena e/ou temporária. O tricloroetano provavelmente não

foi identificado no ar ambiente pelas amostragens ativas e passivas principalmente pela diluição desse composto nos ambientes avaliados.

Partindo dos resultados brutos obtidos nas câmaras de fluxo é possível se estimar as concentrações em ar ambiente. A equação 2 mostra o cálculo utilizado e a tabela 8 apresenta os parâmetros das câmaras e as concentrações estimadas para o composto Tetracloroetano. Para se obter as concentrações provenientes da intrusão, dentro da câmara, é necessário se subtrair as concentrações já presentes no ar ambiente de cada local. Dessa

$$C_{ambiente} = \frac{C_{câmara} \times H_{câmara}}{H_{ambiente}}$$

$C_{ambiente}$ = Concentração em ar ambiente
 $C_{câmara}$ = Concentração interna da câmara;
 $H_{câmara}$ = Altura da câmara;
 $H_{ambiente}$ = Altura do pé direito do ambiente

Equação 2 (JUNIOR e ALBERTO, 2021)

Tabela 8. Parâmetros e concentrações estimadas no estudo de câmaras de fluxo

PONTO DE COLETA	H câmara	H ambiente fechado	Ar Ambiente TO-15	FLUX CHAMBER bruto	FLUX CHAMBER estimado
	cm	cm	Tetracloroetano (ug/m ³)		
RALO 1 EDIFICAÇÃO 1	12	300	< 3,39	5,02	0,20
RALO 2 EDIFICAÇÃO 1	12	300	10,92	252,65	9,70
CONDUÍTE EDIFICAÇÃO 2	10	300	35,40	2086,04	68,40

Tabela 9. Concentrações de PCE no ar ambiente a partir dos métodos avaliados

PONTO DE COLETA	USEPA TO-15 Ar Ambiente	Vsorber Estimado	Hybrid Estimado	FLUX CHAMBER estimado
	Tetracloroetano (ug/m ³)			
RALO 1 - EDIFICAÇÃO 1	< 3,39	< 5,00	< 13,40	0,20
RALO 2 - EDIFICAÇÃO 1	10,92	14,90	43,50	9,70
CONDUÍTE - EDIFICAÇÃO 2	35,40	10,70	54,00	68,40

forma, a concentração na câmara, seria a concentração que foi medida no ar ambiente pela metodologia USEPA TO-15 menos o resultado bruto da câmara de fluxo, como apresentado na tabela 8.

Por fim, todos os resultados de concentrações para ar ambiente, para todos os estudos, são apresentados na tabela 9.

Os resultados se mostram qualitativamente convergentes e quantitativamente similares em ordens de grandeza. Ressalta-se que as amostragens têm princípios diferentes e as amostras em si não são homogêneas entre os estudos, pois foram coletadas em diferentes períodos e não simultaneamente.

7. Conclusão

Em conclusão à série de estudos é notável que as estruturas subterrâneas se confirmam como uma via de intrusão de vapores importante e devem ser consideradas nas investigações ambientais. Além disso, a metodologia aplicada apresentou eficácia na localização de áreas para amostragem de ar ambiente dentro das edificações avaliadas.

A integração do uso de diferentes técnicas reafirma que a utilização de técnicas diferentes pode trazer mais linhas de evidência para se avaliar de forma robusta se o risco de inalação de vapores provenientes do solo se completa ou não.

Por fim, o estudo demonstra a necessidade de protocolos para a avaliação de intrusão de vapores por utilidades subterrâneas e de priorização de locais para amostragem de ar ambiente, pois os protocolos para estudos nesse tema são escassos internacionalmente e podem trazer informações importantes para as avaliações de risco por contaminantes do meio ambiente.

8. Referências

USEPA. **OSWER technical guide for assessing and mitigating the vapor intrusion pathway from subsurface vapor sources to indoor air**, USEPA OSWER, Estados Unidos da América, p. 1, 2015.

ASTM. **ASTM D7758-17**: Standard Practice for Passive Soil Gas Sampling in the Vadose Zone for Source Identification, Spatial Variability Assessment, Monitoring, and Vapor Intrusion Evaluations, os American Society for Testing and Materials, Estados Unidos da América, p. 3-4, 2017.

USEPA. **Compendium Method TO17**: Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ambient Air Using Active Sampling Onto Sorbent Tubes. United States Environmental Protection Agency, Estados Unidos da América, p. 1, 1999.

ISO. **ISO16017-2**: Indoor, Ambient and Workplace Air – Sampling and Analysis of Volatile Organic Compounds by Sorbent Tube/Thermal Desorption/Capillary gas Chromatography Part 2”, ISO, Suíça, p. 1, 2 e 23, 2015.

DTSC. Screening and Evaluating Vapor Intrusion, **Department of Toxic Substances Control**. Estados Unidos da América, California, p. 15, 2015.

USEPA. Compendium Method TO15A: Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air Collected in Specially Prepared Canisters and Analyzed by Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS). **United States Environmental Protection Agency**, Estados Unidos da América, p. 4-16, 2019.

JUNIOR, J. C. R. G.; ALBERTO, M. C. **Câmaras de Fluxo e suas Aplicabilidades para Avaliação de Cenários de Intrusão de Vapores**. NICOLE Latin America, São Paulo, p. 5-7, 2021.