

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

JUDITE INÊS BERSCH

**Proposta de gerenciamento de risco para áreas contaminadas com solventes clorados
cuja decloração gera substâncias mais tóxicas que os compostos originais**

São Paulo

2022

**Proposta de gerenciamento de risco para áreas contaminadas com solventes clorados
cuja declaração gera substâncias mais tóxicas que os compostos originais**

Versão Corrigida

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: Vicente de Aquino Neto

São Paulo

2022

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.

Catalogação-na-publicação

Bersch, Judite Inês

Proposta de gerenciamento de risco para áreas contaminadas com solventes clorados cuja declaração gera substâncias mais tóxicas que os compostos originais / J. I. Bersch -- São Paulo, 2022.

88 p.

Monografia (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. Áreas contaminadas 2. Avaliação de risco 3. Gestão ambiental
4. Biodegradação 5. Remediação do solo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

RESUMO

BERSCH, Judite Inês. Proposta de gerenciamento de risco para áreas contaminadas com solventes clorados cuja declaração gera substâncias mais tóxicas que os compostos originais. 2022. 87f. Monografia (MBA em Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Esta monografia buscou avaliar a influência de concentrações remanescentes de solventes clorados alifáticos sobre o potencial de risco futuro à saúde humana relacionado aos produtos de sua degradação, mesmo após atingidas as metas de remediação individuais. Através de levantamento bibliográfico, foram obtidas as características físico-químicas e toxicológicas de etenos clorados, etanos clorados e metanos clorados de relevância para o contexto do gerenciamento de áreas contaminadas. Foram levantadas informações sobre os processos de degradação aos quais estes contaminantes podem estar expostos no ambiente subterrâneo. É de especial relevância o fato de que alguns produtos de degradação são mais tóxicos do que os contaminantes originais que lhes deram origem e tendem a se acumular no aquífero por períodos mais prolongados. Por meio do uso das planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas sob investigação da CETESB, foram calculadas as concentrações máximas aceitáveis de solventes clorados alifáticos em um cenário de exposição genérico, considerando a exposição de trabalhadores comerciais e industriais ao solo superficial, solo subsuperficial e água subterrânea contaminados, considerando-se as vias de ingresso por inalação de vapores em ambiente fechado e ingestão. Os resultados permitiram verificar que, nas três famílias de contaminantes consideradas – etenos clorados, etanos clorados e metanos clorados –, as metas de remediação mais restritivas estão relacionadas a substâncias que podem ser produzidas pela declaração redutiva de contaminantes existentes na área. Com base neste fato, foi proposto o conceito de toxicidade equivalente, e considerando o peso molar dos contaminantes, foi proposta uma rotina de cálculos para auxiliar na tomada de decisão referente à adequabilidade do encerramento de projetos de remediação em áreas contaminadas com solventes clorados. Por meio da aplicação da rotina proposta em um cenário hipotético, verificou-se que, mesmo em um caso em que as concentrações de todos os contaminantes são inferiores às concentrações máximas aceitáveis e os riscos acumulados não são excedidos, existe potencial para que a degradação dos contaminante remanescentes levem a um aumento futuro da massa do seu produto de degradação a concentrações que excedam os limites toleráveis de risco à saúde humana. A rotina de cálculos proposta se constitui em uma ferramenta para auxiliar a tomada de decisões em áreas contaminadas por solventes clorados, além de permitir o estabelecimento de metas de remediação complementares no caso de compostos para os quais não é possível calcular concentrações máximas aceitáveis específicas, por ausência de dados toxicológicos definidos para todas as vias de ingresso.

Palavras-chave: Organoclorados. Remediação. Gerenciamento de risco. Biodegradação. Declaração.

ABSTRACT

BERSCH, Judite Inês. A risk management proposition for sites with contamination of chlorinated solvents whose dechlorination generates substances more toxic than the original compounds. 2022. 87f. Monograph (MBA - Gestão de Áreas Contaminadas, Desenvolvimento Urbano Sustentável e Revitalização de Brownfields) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

This monograph aimed to evaluate the influence of residual concentration of chlorinated aliphatic solvents on potential risks to human health, including the products of their degradation after individual remediation targets are met. Herein the physicochemical and toxicological characteristics of relevant compound groups for contaminated site management (chlorinated ethylenes, chlorinated ethanes, and chlorinated methanes) were reviewed following the current literature, as well as the mechanisms through which these contaminants may be degraded in soil and groundwater environment. Some products are more toxic after degradation and are more likely to accumulate and persist longer in the groundwater. The remediation targets for aliphatic chlorinated solvents in a generic scenario were calculated using the CETESB spreadsheets for risk assessment in contaminated sites under investigation. Three kinds of workers exposure were considered: to subsurface soil and to groundwater through inhalation in a closed environment, and to topsoil through ingestion. The results showed that in all three groups – chlorinated ethylenes, chlorinated ethanes and chlorinated methanes – the most restrictive remediation targets are related to substances that may be produced by reductive dechlorination of contaminants existing in the site. A method to assess the closure of remediation projects in chlorinated-solvent sites was proposed, based on contaminants equivalent toxicity and molar weight. This method was tested in a hypothetical scenario and has shown that, even in a site where every remediation target was met, and where the cumulative risks were under the acceptable tolerance levels, the biodegradation of the remaining contaminants can lead to more products exceeding the risk levels for human health. The proposed procedure aims to be a tool to assist decision making in chlorinated solvents contaminated sites and allows defining remediation targets for compounds when the existing toxicity data prevent calculating maximum acceptable concentrations.

Palavras-chave: Organochlorine. Remediation. Risk management. Biodegradation. Dechlorination.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Decloração redutiva do tetracloroeteno a tricloroeteno | 28 |
| Figura 2 – Decloração redutiva dos etenos clorados | 29 |
| Figura 3 – Facilidade de ocorrência da decloração redutiva entre os etenos clorados | 30 |
| Figura 4 – Facilidade de ocorrência da decloração redutiva entre os etanos clorados | 31 |
| Figura 5 – Facilidade de ocorrência da decloração redutiva entre os metanos clorados..... | 32 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 – Mecanismos de biodegradação aplicáveis aos solventes clorados alifáticos | 27 |
|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Características físico-químicas das substâncias químicas de interesse | 20 |
| Tabela 2 – Fatores de toxicidade das substâncias químicas de interesse | 22 |
| Tabela 3 - Parâmetros de cálculo para caracterização do meio físico – referência CETESB para ambiente industrial..... | 37 |
| Tabela 4 – Concentrações máximas aceitáveis para os cenários considerados | 38 |
| Tabela 5 – Concentrações máximas aceitáveis mais restritivas e concentrações após remediação em exemplo hipotético | 50 |
| Tabela 6 – Riscos individuais e cumulativos em exemplo hipotético..... | 51 |
| Tabela 7 – Avaliação do potencial para risco futuro das concentrações remanescentes em exemplo hipotético: etenos clorados..... | 54 |
| Tabela 8 – Avaliação do potencial para risco futuro das concentrações remanescentes em exemplo hipotético: etanos clorados..... | 55 |
| Tabela 9 – Avaliação do potencial para risco futuro das concentrações remanescentes em exemplo hipotético: metanos clorados..... | 56 |

| | |
|--|----|
| Tabela 10 – Concentrações máximas aceitáveis equivalentes aos compostos de maior toxicidade em exemplo hipotético: etenos clorados | 59 |
| Tabela 11 – Concentrações máximas aceitáveis equivalentes aos compostos de maior toxicidade em exemplo hipotético: etanos clorados | 60 |
| Tabela 12 – Concentrações máximas aceitáveis equivalentes aos compostos de maior toxicidade em exemplo hipotético: metanos clorados | 61 |
| Tabela 13 – Comparaçao das metas de remediação originais e alternativas para o exemplo hipotético em estudo | 62 |
| Tabela 14 - Metas de remediação propostas para cenário hipotético: ingestão de solo superficial | 64 |
| Tabela 15 - Metas de remediação propostas para cenário hipotético: inalação de vapores a partir do solo subsuperficial em ambiente fechado | 65 |
| Tabela 16 - Metas de remediação propostas para cenário hipotético: inalação de vapores a partir da água subterrânea em ambiente fechado..... | 66 |

LISTA EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| Equação 1 - Quociente de risco: efeitos não carcinogênicos..... | 16 |
| Equação 2 - Risco: efeitos carcinogênicos | 16 |
| Equação 3 - Conversão da concentração remanescente em concentrações molal..... | 45 |
| Equação 4 – Cálculo das concentrações acumuladas, em molalidade | 45 |
| Equação 5 - Conversão de concentração molal em concentração equivalente do composto X | 46 |
| Equação 6 - Conversão de concentração máxima aceitável em concentração molal | 48 |
| Equação 7 – Cálculo da concentração máxima equivalente ao composto X..... | 48 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 2. OBJETIVOS | 11 |
| 2.1. Objetivos específicos..... | 11 |
| 3. METODOLOGIA..... | 12 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 4.1. Avaliação de risco à saúde humana..... | 14 |
| 4.2. Caracterização dos solventes clorados alifáticos..... | 17 |
| 4.2.1. Características físico-químicas e comportamento em ambiente subterrâneo..... | 18 |
| 4.2.2. Toxicidade..... | 20 |
| 4.2.3. Mecanismos de degradação..... | 23 |
| 5. CÁLCULO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS ACEITÁVEIS..... | 36 |
| 6. PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE RISCO | 41 |
| 6.1. Abordagem das concentrações equivalentes para avaliação do potencial de risco futuro | 44 |
| 6.2. Abordagem das concentrações equivalentes no estabelecimento de metas alternativas de remediação | 47 |
| 6.3. Exemplo de aplicação..... | 49 |
| 7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 67 |
| 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 69 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 71 |
| APÊNDICE A – CÁLCULO DE CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS ACEITÁVEIS EM UM CENÁRIO GENÉRICO COM USO DAS PLANILHAS PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DA CETESB | 73 |
| APÊNDICE B – CÁLCULO DE RISCO EM UM EXEMPLO HIPOTÉTICO COM USO DAS PLANILHAS PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DA CETESB | 79 |
| APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA RISCO FUTURO DAS CONCENTRAÇÕES REMANESCENTES, APÓS ATINGIDAS AS METAS DE REMEDIAÇÃO ALTERNATIVAS PROPOSTAS PARA UM CASO HIPOTÉTICO | 85 |

1. INTRODUÇÃO

Solventes clorados alifáticos são um subgrupo dos compostos orgânicos voláteis, caracterizados por conter cloro em substituição ao hidrogênio em cadeias abertas de carbono/hidrogênio (FERREIRA, 2018). No contexto do gerenciamento de áreas contaminadas, destacam-se, particularmente, os compostos tetracloroeteno e tricloroeteno, usados largamente como desengraxantes de superfícies metálicas a partir da década de 1920, e na lavagem a seco de produtos têxteis a partir da década de 1950 (JAFFÉ, 2008). Também o tetracloreto de carbono, o clorofórmio e os isômeros do tricloroetano são de grande importância na área industrial, sendo utilizados como solventes e desengraxantes (BERTOLO, 2017).

Estes contaminantes se caracterizam por terem densidade maior que a da água e solubilidade baixa a moderada. Estas características, decorrentes da presença do cloro em sua composição, conferem a estes contaminantes a possibilidade de formação de fase livre não aquosa mais densa que a água (DNAPL) quando presentes no meio subterrâneo, e sua consequente migração para camadas mais profundas do aquífero (FERREIRA, 2018).

Quando comparados com outros contaminantes, como os hidrocarbonetos de petróleo – que podem se biodegradar tanto em condições aeróbias quanto em condições anaeróbias –, os solventes organoclorados são menos propensos à degradação por meio de processos microbiológicos. Contudo, sob condições específicas, a biodegradação pode ocorrer (WIEDEMER et. al, 1999). Segundo Lima (2018), o principal processo de biodegradação de solventes clorados alifáticos é a sua decloração redutiva sequencial, em que ocorrem substituições progressivas de um átomo de cloro por um átomo de hidrogênio na molécula original. No caso dos etenos clorados, o tetracloroeteno é reduzido a tricloroeteno, o tricloroeteno aos isômeros de dicloroeteno (1,2-dicloroeteno-cis, 1,2-dicloroeteno-trans, 1,1-dicloroeteno), estes a cloreto de vinila e, em última instância, ao próprio eteno. No caso dos etanos clorados, os isômeros de tricloroetano são degradados a isômeros de dicloroetano, estes a cloreto de etila e em seguida a etano. No caso dos metanos clorados, o tetracloreto de carbono é degradado a clorofórmio, este a diclorometano, em seguida a cloreto de metila e por fim ao metano. Uma particularidade deste processo, é que os produtos finais e intermediários desta sequência de reações de biodegradação em ambiente redutor podem apresentar maior toxicidade e consequentemente representar um maior risco à saúde humana do que os

contaminantes originais (BERTOLO, 2017; BRADLEY, 2000). Além disso, os compostos menos clorados são mais resistentes à degradação em meio anaeróbio do que os contaminantes originais (WIEDEMEIER et al, 1999), tendendo a permanecer no aquífero por maiores períodos de tempo, o que alerta para as complicações da degradação dos solventes alifáticos clorados em ambiente natural sem o devido controle e monitoramento.

A Resolução CONAMA nº 420/2009 define que o gerenciamento de áreas contaminadas tem por objetivo a eliminação do perigo ou a redução dos riscos até níveis aceitáveis, evitando danos aos bens a proteger e ao bem-estar público, com foco em viabilizar a reabilitação da área para um uso determinado (CONAMA, 2009). Sendo assim, as intervenções para remediação de áreas contaminadas se baseiam em metas de remediação calculadas com base no risco potencial que cada substância química de interesse oferece. Estas metas são determinadas a partir das concentrações máximas aceitáveis, ou seja, da maior concentração que cada contaminante pode ter em determinada área sem que ofereça riscos inaceitáveis à saúde humana, calculadas individualmente para cada substância e via de exposição aplicável ao cenário considerado. Uma vez atingidas estas metas, e transcorrido o período de monitoramento definido pelo órgão ambiental competente, uma área pode ser declarada como reabilitada para uso declarado.

As concentrações máximas aceitáveis (e, portanto, as metas de remediação) levam em conta o risco individual oferecido por cada contaminante e também o risco total, que consiste na simples soma dos níveis de risco individuais de todos os contaminantes presentes na área. Contudo, não é comum que os estudos ambientais considerem também as transformações que os contaminantes podem sofrer ao longo do tempo, inclusive após o atingimento das metas de remediação definidas para cada substância, ou seja, mesmo após encerrado o processo de remediação.

Quando os produtos da degradação apresentam maior toxicidade que o contaminante original, as concentrações máximas aceitáveis do composto mais reduzido serão substancialmente inferiores às do composto mais oxidado. Assim, as metas de remediação para o tetracloroeteno, por exemplo, costumam ser menos restritivas do que as estabelecidas para o cloreto de vinila em uma mesma área sob gerenciamento. É possível, portanto, que uma área seja declarada como reabilitada para uso declarado contendo ainda massas remanescentes de tetracloroeteno que, embora atendam às metas de remediação específicas para este composto, podem vir a se transformar futuramente em massas de tricloroeteno ou cloreto de vinila que resultem em concentrações representativas de risco potencial para estes produtos de

degradação, ou seja, superiores às respectivas metas de remediação. Assim, uma vez que a decloração redutiva pode continuar acontecendo mesmo após o encerramento do período de monitoramento, não se pode desconsiderar o potencial do tetracloroeteno em se reduzir a tricloroeteno e cloreto de vinila ao longo do tempo. O mesmo pode acontecer, por exemplo, para o 1,2-dicloroeteno-cis, que apresenta potencial para se reduzir a cloreto de vinila. Para esta substância, não costumam ser estabelecidas metas específicas de remediação em cenários de inalação de vapores, uma vez que os dados toxicológicos disponíveis até o momento não permitem calcular concentrações máximas aceitáveis para esta via de ingresso. Sendo assim, é comum o encerramento de projetos de remediação com concentrações remanescentes de 1,2-dicloroeteno-cis que podem vir a se transformar, por processos de biodegradação, em cloreto de vinila no futuro, sem que tenham sido estabelecidas concentrações máximas aceitáveis para o 1,2-dicloroeteno-cis. Esta mesma questão também deve ser considerada para os etanos clorados e os metanos clorados.

Diante deste contexto, o presente trabalho se propõe a investigar, por meio de levantamento bibliográfico e do cálculo de risco em um cenário hipotético, em que medida estas concentrações remanescentes de compostos organoclorados podem vir a representar um potencial de aumento nas concentrações dos produtos de sua degradação, elevando-as acima de suas próprias metas de remediação em um momento futuro. Para tanto, serão levantadas as características físico-químicas e toxicológicas dos contaminantes de interesse, bem como os mecanismos de degradação destes contaminantes, com ênfase naqueles que podem ocorrer naturalmente após encerradas as atividades de remediação. Também será feito um apanhado das normas, conceitos e diretrizes relacionadas à avaliação de risco à saúde humana, visando caracterizar os aspectos envolvidos na determinação das concentrações máximas aceitáveis e metas de remediação para os compostos de interesse. Por fim, a partir da interpretação das informações assim obtidas, pretende-se propor alternativas que orientem a tomada de decisão no gerenciamento de áreas contaminadas, que levem em conta a continuidade da degradação dos compostos clorados após atingidas as metas de remediação.

2. OBJETIVOS

A presente monografia tem por objetivo avaliar em que medida as concentrações remanescentes de solventes organoclorados, após atingidas as metas de remediação, influenciam no potencial de risco à saúde humana relacionado aos produtos de sua degradação em cenários futuros, bem como propor critérios alternativos para a tomada de decisão no gerenciamento de áreas contaminadas por solventes clorados alifáticos.

2.1. Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral acima descrito, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- (a) levantar as características físico-químicas e toxicológicas de etenos clorados (tetracloroeteno, tricloroeteno, 1,2-dicloroeteno-cis, 1,2-dicloroeteno-trans, 1,1-dicloroeteno, cloreto de vinila), etanos clorados (1,1,1-tricloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano, e cloreto de etila) e metanos clorados (tetracloreto de carbono, clorofórmio, diclorometano e cloreto de metila);
- (b) levantar os processos de degradação de solventes clorados no ambiente subterrâneo, com ênfase nos que podem ocorrer naturalmente após o encerramento das atividades de remediação;
- (c) avaliar a contribuição de concentrações remanescentes de compostos organoclorados para o agravamento das condições de risco à saúde humana relacionadas aos produtos de sua degradação em cenários futuros;
- (d) propor alternativas de critérios para a tomada de decisão no gerenciamento de áreas contaminadas por solventes organoclorados, que considerem o incremento futuro nas concentrações de produtos da degradação do contaminante originalmente presente na área.

3. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho será realizada uma revisão bibliográfica sobre as principais diretrizes e conceitos relacionados à avaliação de risco à saúde humana aplicáveis ao gerenciamento de áreas contaminadas por substâncias orgânicas voláteis, especificamente solventes clorados.

Nesta revisão será dado um enfoque maior ao levantamento das principais características físico-químicas, características toxicológicas, e os principais mecanismos de degradação destes contaminantes que influenciam o seu comportamento em ambiente subterrâneo.

Com base nestas informações, serão calculadas as concentrações máximas aceitáveis para os solventes clorados alifáticos considerados neste estudo, considerando cenários de exposição genéricos para efeitos comparativos. As concentrações máximas aceitáveis serão calculadas por meio das planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas sob investigação da CETESB, na sua versão mais recente (versão 3_01), publicada em outubro de 2021. Será considerado o risco para trabalhador comercial e industrial. O cenário de exposição levará em conta o acesso a contaminantes presentes em solo superficial, solo subsuperficial e água subterrânea, por meio de inalação de vapores em ambiente fechado e ingestão de solo contaminado. Os parâmetros do meio físico serão aqueles constantes por padrão na planilha da CETESB.

As substâncias químicas consideradas serão:

- (a) dentre os etenos clorados, o tetracloroeteno, tricloroeteno, 1,2-dicloroeteno-cis, 1,2-dicloroeteno-trans, 1,1-dicloroeteno e cloreto de vinila;
- (b) dentre os etanos clorados, o 1,1,1-tricloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano e cloreto de etila; e
- (c) dentre os metanos clorados, o tetracloreto de carbono, clorofórmio, diclorometano e cloreto de metila;

Os resultados serão avaliados à luz das informações levantadas em bibliografia, no objetivo de propor alternativas de critérios para a tomada de decisão no gerenciamento de áreas

contaminadas por solventes clorados alifáticos, baseadas no conceito de concentrações equivalentes do composto mais tóxico de cada família de contaminantes.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para embasar o presente trabalho, foi feita consulta a literatura técnica e acadêmica específicas acerca dos procedimentos para avaliação de risco à saúde humana no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas, bem como da caracterização das substâncias químicas de interesse para este estudo. Esta caracterização levou em conta as características físico-químicas dos contaminantes, sua toxicidade, e os mecanismo de degradação aos quais eles podem estar expostos em ambiente subterrâneo. As informações levantadas são compiladas nos itens a seguir.

4.1. Avaliação de risco à saúde humana

A Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009, define os seguintes objetivos para o gerenciamento de áreas contaminadas:

Art. 22. O gerenciamento de áreas contaminadas deverá conter procedimentos e ações voltadas ao atendimento dos seguintes objetivos:

- I - eliminar o perigo ou reduzir o risco à saúde humana;
- II - eliminar ou minimizar os riscos ao meio ambiente;
- III - evitar danos aos demais bens a proteger;
- IV - evitar danos ao bem estar público durante a execução de ações para reabilitação; e
- V - possibilitar o uso declarado ou futuro da área, observando o planejamento de uso e ocupação do solo.

(CONAMA, 2009)

A partir da definição destes objetivos, fica estabelecido que a finalidade do gerenciamento de áreas contaminadas não está em restaurar integralmente a área contaminada, devolvendo-a à condição original, mas sim em possibilitar que os riscos associados à contaminação detectada sejam minimizados a níveis aceitáveis, considerando-se um determinado uso pré-estabelecido. No gerenciamento ambiental de uma área contaminada, devem ser consideradas, portanto, metas de remediação que assegurem a integridade da saúde humana e dos bens a proteger.

No que tange especificamente à avaliação do risco à saúde humana, a mesma Resolução considera tolerável uma probabilidade de ocorrência de até um caso adicional de câncer em uma população de 100.000 indivíduos, bem como o risco não carcinogênico causado pelo ingresso do contaminante em dose igual ou inferior ao limite de ingresso tolerável por seres humanos sem ocorrência de efeitos nocivos à saúde (CONAMA, 2009).

O conceito de ingresso é definido pela norma técnica ABNT NBR 16209:2013 – Avaliação de risco à saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas – como a “fração do composto químico que está na interface de contato com o organismo exposto (pele, pulmões, intestino) e disponível para absorção, por unidade de tempo” (ABNT, 2013, p. 4). Em linhas gerais, esta fração é calculada a partir dos seguintes componentes:

- (a) a concentração da substância química de interesse existente no ponto de exposição, podendo ser verificada através de análises químicas ou calculada a partir de modelagem matemática;
- (b) as taxas de exposição diária ao contaminante, que variam conforme o compartimento de interesse (água, solo, ar ambiente ou alimento contaminado) e a via de exposição (inalação, ingestão ou contato dérmico);
- (c) a frequência da exposição ao contaminante;
- (d) a duração da exposição ao contaminante;
- (e) a massa corpórea do indivíduo exposto;
- (f) o tempo médio para que ocorram efeitos deletérios à saúde humana.

O ingresso de uma substância varia, portanto, conforme o cenário de exposição considerado. Ainda de acordo com a mesma norma técnica, uma vez quantificado o ingresso de cada substância química de interesse presente na área e em cada cenário, é feita a caracterização do risco individual de cada contaminante, em cada cenário, considerando efeitos carcinogênicos e não-carcinogênicos.

Para quantificar o risco associado a efeitos não carcinogênicos, deve ser calculada a razão entre o ingresso quantificado e a dose de referência (RfD) desta mesma substância, ou seja, a dose máxima validada por estudos toxicológicos reconhecidos à qual um indivíduo pode estar exposto sem que ocorram efeitos deletérios à sua saúde. A esta razão, definida na Equação 1, dá-se o nome de quociente de risco (QR), e o seu resultado deve ser inferior a 1 para que o risco

à saúde humana seja considerado tolerável, conforme as diretrizes da Resolução CONAMA nº 420/2009.

Equação 1 - Quociente de risco: efeitos não carcinogênicos

$$QR = \frac{In}{RfD}$$

em que:

QR = quociente de risco para efeitos não carcinogênicos

In = ingresso da substância química de interesse

RfD = dose diária de referência

Já para o risco associado a efeitos carcinogênicos, o ingresso quantificado deve ser multiplicado por um fator de carcinogenicidade (SF) inerente à substância química de interesse. Este fator, proveniente de estudos toxicológicos reconhecidos, é definido como “a probabilidade de um indivíduo desenvolver câncer durante o tempo de vida, como resultado de exposição a uma concentração de uma SQI [substância química de interesse]” (ABNT, 2013, p. 33). A esta relação, definida pela Equação 2, dá-se o nome de Risco, e o seu resultado deve ser inferior a $1,0 \times 10^{-5}$ para que o risco seja considerado tolerável segundo as diretrizes da Resolução CONAMA nº 420/2009.

Equação 2 - Risco: efeitos carcinogênicos

$$RISCO = In \times SF$$

em que:

RISCO = risco para efeitos carcinogênicos

In = ingresso da substância química de interesse

SF = fator de carcinogenicidade

Os procedimentos específicos para o gerenciamento de áreas contaminadas, incluindo as diretrizes para a realização da avaliação de risco, são definidas pelo órgão ambiental de cada estado. Em São Paulo, a Decisão de Diretoria CETESB nº 038/2017/C define que a avaliação de risco à saúde humana deve ser realizada com uso das planilhas para avaliação de risco para áreas contaminadas sob investigação, disponibilizadas em meio eletrônico pela CETESB (CETESB, 2017). Estas planilhas são uma ferramenta eletrônica que permite a quantificação do risco e o cálculo das concentrações máximas aceitáveis, por meio de equações desenvolvidas para estimar a concentração de ingresso utilizando modelos matemáticos analíticos de transporte intra e inter-meios, e utilizando um extenso banco de dados com propriedades físico-químicas e toxicológicas das principais substâncias químicas associadas ao gerenciamento de

áreas contaminadas, bem como parâmetros de exposição para cenários de exposição específicos e genéricos.

Embora a Decisão de Diretoria nº 038/2017/C tenha aplicabilidade legal apenas ao Estado de São Paulo, é comum a utilização das diretrizes por ela determinadas como guia de boas práticas também em outros estados do território nacional. No Rio Grande do Sul, por exemplo, a Diretriz Técnica nº 003/2021 também exige que a avaliação de risco à saúde humana seja realizada com o uso das planilhas da CETESB, e que a interpretação dos resultados tenha como base os limites de risco aceitáveis definidos pela referida decisão de diretoria (FEPAM, 2021).

A partir das concentrações máximas aceitáveis e da quantificação dos riscos totais calculadas na etapa de avaliação de risco, são estabelecidas as metas de remediação para o gerenciamento de uma área contaminada, tendo em vista o uso atual ou futuro da área. Para tanto, devem ser consideradas as concentrações máximas aceitáveis relacionadas a efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos, sendo priorizada sempre a mais restritiva entre as duas. Uma vez atingidas estas metas de remediação, uma quantificação dos riscos totais é necessária para verificar se o risco potencial oferecido pelas concentrações remanescentes é tolerável e, permanecendo assim no decorrer de um período de monitoramento definido pelo órgão ambiental conforme cada caso, a área pode ser declarada como área reabilitada para uso declarado (CONAMA, 2009).

4.2. Caracterização dos solventes clorados alifáticos

O presente trabalho considera os seguintes solventes clorados alifáticos como substâncias químicas de interesse: etenos clorados (tetracloroeteno, tricloroeteno, 1,2-dicloroeteno-cis, 1,2-dicloroeteno-trans, 1,1-dicloroeteno e cloreto de vinila), etanos clorados (1,1,1-tricloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano e cloreto de etila) e metanos clorados (tetracloreto de carbono, clorofórmio, diclorometano e cloreto de metila).

Etenos são moléculas compostas por dois átomos de carbono ligados entre si por uma ligação dupla (insaturada) e complementadas por quatro átomos de hidrogênio. Os etenos clorados são, portanto, etenos em que os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de cloro, podendo ser em quantidade de um (cloreto de vinila), dois (dicloroetenos), três

(tricloroeteno) ou quatro (tetracloroeteno) átomos de cloro. Etanos clorados são moléculas compostas por dois átomos de carbono ligados entre si por uma ligação simples e complementadas por seis átomos de hidrogênio. Os etanos clorados correspondem a etanos em que os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de cloro, podendo ser em quantidade de um (cloreto de etila), dois (dicloroetano), três (tricloroetano), quatro (tetracloroetano), cinco (pentacloroetano) ou seis (hexacloroetano) átomos de cloro. Neste trabalho, serão considerados somente os etanos com até três átomos de cloro em sua composição. Metanos clorados são moléculas compostas por um átomo de carbono complementadas por quatro átomos de hidrogênio. Os metanos clorados são metanos em que os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de cloro, podendo ser em quantidade de um (cloreto de metila), dois (diclorometano), três (clorofórmio) ou quatro (tetracloreto de carbono) átomos de cloro.

O tetracloroeteno, tricloroeteno, isômeros de tricloroetano, tetracloreto de carbono e clorofórmio são largamente utilizados em processos industriais. Destacam-se seus usos como desengraxante de superfícies metálicas, como esmaltes industriais e na lavagem a seco de produtos têxteis (JAFFÉ, 2008; BERTOLO, 2017). Os demais contaminantes, embora possam ter utilização industrial, normalmente ocorrem em áreas contaminadas como produtos da degradação destes compostos originais. Ao longo do texto, será utilizada a seguinte denominação:

- (a) O termo “composto-pai” será utilizado para se referir aos compostos com maior número de átomos de cloro, ou seja, aqueles que podem ser transformados em moléculas menos cloradas através de processos de degradação.
- (b) O termo “composto-filho” será utilizado para se referir aos compostos que podem ser produzidos a partir da degradação destes contaminantes originais.

4.2.1. Características físico-químicas e comportamento em ambiente subterrâneo

Dentre as características dessa série de compostos, destacam-se a solubilidade baixa a moderada, baixa viscosidade e alta volatilidade. Com exceção do cloreto de vinila, cloreto de etila, e cloreto de metila, os demais são compostos mais densos do que a água. A alta densidade, aliada aos baixos índices de solubilidade e viscosidade, tornam estes contaminantes propícios

para a formação de fase líquida não aquosa mais densa que a água (DNAPL) quando atingem o meio subterrâneo (BERTOLO, 2017).

Isto significa que ao atingir a zona saturada, estas substâncias químicas tendem a seguir migrando no sentido vertical, deslocando-se por gravidade. Esta migração é influenciada também pela heterogeneidade da matriz e pela massa de contaminante em deslocamento, pois para que ocorra é necessário que a pressão hidrostática exercida por ele seja maior do que as forças de capilaridade que retém a água entre as paredes dos poros da matriz (FERREIRA, 2018).

A migração vertical do contaminante prossegue até que este atinja uma camada de menor permeabilidade, como um solo argiloso ou a própria rocha, sendo que ao longo do deslocamento o produto deixa uma fase residual que se imobiliza por entre os poros. Esta fase residual, bem como a fase livre formada pelo contaminante não dissolvido, atua como fonte secundária reabastecendo a pluma de fase dissolvida ao longo do tempo (PANKOW e CHERRY, 1996; FETTER, 1999 *apud* FERREIRA, 2018). Segundo Bertolo (2017), os valores observados para o coeficiente de partição entre o carbono orgânico do solo e a água (Koc) indicam uma baixa tendência destes compostos a serem absorvidos pela matriz, o que leva a uma facilidade de migração destes contaminantes.

Devido à alta pressão de vapor, estas substâncias volatilizam com facilidade quando em temperatura ambiente, se encontrando comumente em estado de líquido volátil. Particularmente o cloreto de vinila e o cloreto de metila se encontram preferencialmente em estado gasoso à temperatura ambiente (CRUZ, 1999). Dessa forma, uma vez alcançando o meio subterrâneo, os contaminantes podem ser também volatilizados, formando uma pluma de vapor na zona não saturada (BERTOLO, 2017).

Ferreira (2018) considera que a volatilidade das substâncias tende a aumentar com a perda do cloro, enquanto a tendência à adsorção tende a diminuir, o que faz com que os compostos com menor quantidade de cloro em sua composição sejam, em geral, mais móveis no aquífero.

As planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas disponibilizadas pela CETESB trazem as principais características físico-químicas dos compostos em questão, sintetizados abaixo na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físico-químicas das substâncias químicas de interesse

| Substância | Peso molar (g/mol) | Densidade (g/ml) | Solubilidade (mg/L) | Koc (L/Kg) | Log Kow | Constante de Henry | Pressão de vapor (mmHg) |
|--------------------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------|---------|--------------------|-------------------------|
| Etenos clorados | | | | | | | |
| Tetracloroeteno | 1,7E+02 | 1,6E+00 | 2,1E+02 | 9,5E+01 | 3,4E+00 | 7,2E-01 | 1,9E+01 |
| Tricloroeteno | 1,3E+02 | 1,5E+00 | 1,3E+03 | 6,1E+01 | 2,4E+00 | 4,0E-01 | 6,9E+01 |
| 1,1-dicloroeteno | 9,7E+01 | 1,2E+00 | 2,4E+03 | 3,2E+01 | 2,1E+00 | 1,1E+00 | 6,0E+02 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 9,7E+01 | 1,3E+00 | 6,4E+03 | 4,0E+01 | 1,9E+00 | 1,7E-01 | 2,0E+02 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 9,7E+01 | 1,3E+00 | 4,5E+03 | 4,0E+01 | 2,1E+00 | 3,8E-01 | 3,3E+02 |
| Cloreto de vinila | 6,2E+01 | 9,1E-01 | 8,8E+03 | 2,2E+01 | 1,4E+00 | 1,1E+00 | 3,0E+03 |
| Etanos clorados | | | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 1,3E+02 | 1,3E+00 | 1,3E+03 | 4,4E+01 | 2,5E+00 | 7,0E-01 | 1,2E+02 |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,3E+02 | 1,4E+00 | 4,6E+03 | 6,1E+01 | 1,9E+00 | 3,4E-02 | 2,3E+01 |
| 1,1-dicloroetano | 9,9E+01 | 1,2E+00 | 5,0E+03 | 3,2E+01 | 1,8E+00 | 2,3E-01 | 2,3E+02 |
| 1,2-dicloroetano | 9,9E+01 | 1,2E+00 | 8,6E+03 | 4,0E+01 | 1,5E+00 | 4,8E-02 | 7,9E+01 |
| Cloreto de etila | 6,5E+01 | 8,9E-01 | 6,7E+03 | 2,2E+01 | 1,4E+00 | 4,5E-01 | 1,0E+03 |
| Metanos clorados | | | | | | | |
| Tetracloreto de carbono | 1,5E+02 | 1,6E+00 | 7,9E+02 | 4,4E+01 | 2,8E+00 | 1,1E+00 | 1,2E+02 |
| Clorofórmio | 1,2E+02 | 1,5E+00 | 8,0E+03 | 3,2E+01 | 2,0E+00 | 1,5E-01 | 2,0E+02 |
| Diclorometano | 8,5E+01 | 1,3E+00 | 1,3E+04 | 2,2E+01 | 1,3E+00 | 1,3E-01 | 4,4E+02 |
| Cloreto de metila | 5,0E+01 | 9,1E-01 | 5,3E+03 | 1,3E+01 | 9,1E-01 | 3,6E-01 | 4,3E+03 |

Fonte: CETESB, 2021

4.2.2. Toxicidade

Os solventes clorados estão relacionados a uma série de efeitos deletérios à saúde humana, podendo variar desde enjoos e irritação nas mucosas, até patologias no fígado, nos rins e no sistema nervoso central, podendo inclusive ocasionar desmaios e convulsões quando em concentrações muito elevadas. Alguns compostos podem provocar, ainda, efeitos carcinogênicos (JAFFE, 2018).

Devido à característica de alta volatilidade destes compostos, as vias de exposição preferenciais para estes contaminantes são a inalação e o contato dérmico. Por este contato, a pele, mucosas e o trato respiratório de forma geral são suscetíveis aos seus efeitos tóxicos, o que explica sintomas relacionados a irritações e lesões superficiais. Já os efeitos relacionados

ao sistema nervoso central se devem à dissolução das moléculas na membrana celular, levando à necrose das células. Além disso, as moléculas podem ser biotransformadas no próprio organismo humano, sendo que os metabólitos têm também potencial para induzir efeitos deletérios no fígado, rins e sistema cardiovascular (CRUZ, 1999).

O guia do usuário das tabelas de avaliação de risco da agência ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2021) apresenta os principais conceitos na avaliação da toxicidade de um contaminante, no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas. São eles:

- (a) Dose de referência (RfD): é uma estimativa da dose diária de exposição a uma substância química à qual a população humana pode ser exposta sem que se observem efeitos deletérios à sua saúde ao longo da vida. Podem se dividir entre doses de referência crônicas, quando a exposição é de longo prazo, ou doses de referência subcrônicas, quando a exposição é de curto prazo. Este valor de toxicidade é empregado para avaliar o risco tóxico não carcinogênico dos contaminantes presentes na área.
- (b) Concentração de referência (RfC): é uma estimativa da dose diária de exposição por inalação contínua a uma substância química à qual uma população humana pode ser exposta, sem que se observem efeitos deletérios à sua saúde ao longo da vida. Assim como no caso anterior, podem se dividir entre concentração de referência crônicas ou subcrônicas.
- (c) Fator de carcinogenicidade (SF): é a medida de probabilidade de resposta de um indivíduo desenvolver câncer como resultado de uma exposição a uma determinada substância, durante o tempo de vida.
- (d) Unidade de risco de inalação (IUR): é a medida da probabilidade de resposta de um indivíduo desenvolver câncer quando exposto a um contaminante, por inalação.

As planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas disponibilizadas pela CETESB adotam os fatores de toxicidade dos compostos em questão definidos nos níveis de triagem de risco (Risk Screening Levels - RSL) da agência ambiental americana (USEPA), em sua atualização de maio de 2021, sintetizados abaixo na Tabela 02.

Tabela 2 – Fatores de toxicidade das substâncias químicas de interesse

| Série | Substância | SF (mg/kg.dia) ⁻¹ | IUR (μ g/m ³) ⁻¹ | RfD (mg/kg.dia) | RfC (mg/m ³) |
|------------------|----------------------------|---------------------------------|---|--------------------|-----------------------------|
| Etenos clorados | Tetracloroeteno | 2,1E-03 | 2,6E-07 | 6,0E-03 | 4,0E-02 |
| | Tricloroeteno | 4,6E-02 | 4,1E-06 | 5,0E-04 | 2,0E-03 |
| | 1,1-dicloroeteno | - | - | 5,0E-02 | 2,0E-01 |
| | 1,2-dicloroeteno-cis | - | - | 2,0E-03 | - |
| | 1,2-dicloroeteno-trans | - | - | 2,0E-02 | 4,0E-02 |
| Etanos clorados | Cloreto de vinila | 7,2E-01 | 4,4E-06 | 3,0E-03 | 1,0E-01 |
| | 1,1,1-tricloroetano | - | - | 2,0E+00 | 5,0E+00 |
| | 1,1,2-tricloroetano | 5,7E-02 | 1,6E-05 | 4,0E-03 | 2,0E-04 |
| | 1,1-dicloroetano | 5,7E-03 | 1,6E-06 | 2,0E-01 | - |
| | 1,2-dicloroetano | 9,1E-02 | 2,6E-05 | 6,0E-03 | 7,0E-03 |
| Metanos clorados | Cloreto de etila | - | - | - | 1,0E+01 |
| | Tetracloroetano de carbono | 7,0E-02 | 6,0E-06 | 4,0E-03 | 1,0E-01 |
| | Clorofórmio | 3,1E-02 | 2,3E-05 | 1,0E-02 | 9,8E-02 |
| | Diclorometano | 2,0E-03 | 1,0E-08 | 6,0E-03 | 6,0E-01 |
| | Cloreto de metila | - | - | - | 9,0E-02 |

Fonte: CETESB, 2021.

Os valores mais usualmente utilizados nos cálculos de risco, como visto no *item 4.1* são o fator de carcinogenicidade (SF) e a dose de referência (RfD). No primeiro caso, quanto maior o fator de carcinogenicidade, maior o risco carcinogênico associado à exposição de uma determinada substância química de interesse. Já para a dose de referência a relação é inversamente proporcional, sendo que menores doses de referência implicam em maiores riscos tóxicos associados a uma determinada substância. Cabe ressaltar que muitas substâncias químicas estão associadas a riscos tóxicos e carcinogênicos, devendo ser considerado aquele mais restritivo.

Dentre a série dos etenos clorados, observa-se que o fator de carcinogenicidade para o cloreto de vinila, ou seja, a probabilidade de este composto ocasionar câncer ao indivíduo exposto, é de uma a duas ordens de grandeza superior ao dos respectivos compostos-pai (tricloroeteno e tetracloroeteno). Já em relação aos efeitos não carcinogênicos, observa-se que, de forma geral, o organismo humano tolera menores doses dos compostos mais clorados do que das moléculas mais degradadas, sendo que a menor dose de referência corresponde ao tricloroeteno. Ressaltamos, ainda, a ausência de dados toxicológicos para determinadas vias de

exposição para SQIs intermediárias. É o caso do 1,2-dicloroeteno-cis, para o qual a insuficiência dos dados toxicológicos disponíveis não permite que sejam definidas metas de remediação para a via de inalação de vapores em projetos de avaliação de risco.

Dentre a série dos etanos clorados, o maior fator de carcinogenicidade corresponde ao 1,2-dicloroetano. Quanto aos efeitos não carcinogênicos, a menor dose de referência é relativa ao 1,1,2-tricloroetano.

Dentre a série dos metanos clorados, os índices de toxicidade mais restritivos, ou seja, o maior fator de carcinogenicidade e a menor dose de referência, estão associados ao composto-pai tetracloreto de carbono.

4.2.3. Mecanismos de degradação

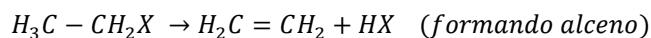
A degradação dos solventes clorados alifáticos ocorre no sentido das moléculas mais cloradas para as menos cloradas, e os mecanismos que promovem esta transformação podem ser bióticos ou abióticos. Embora a degradação abiótica seja possível, os processos bióticos são mais comuns em ambiente natural e variam conforme o contaminante em questão, podendo ser processos de oxidação, em que o contaminante doa elétrons no processo metabólico, processos de redução, em que o contaminante funciona com acceptor de elétrons, e também processos de cometabolismo, associados a efeitos colaterais das rotas metabólicas de outras substâncias químicas presentes no meio (BERTOLO, 2017).

Wiedemeier et al (1999) afirmam que a maioria dos solventes clorados pode sofrer processos de decloração redutiva, atuando nesses processos como acceptores de elétrons. Já alguns dos produtos de sua degradação, por já se encontrarem em formas reduzidas, são mais propensos a se degradar por mecanismos de oxidação. Os mesmos autores afirmam que, em um ambiente natural, os processos de degradação não ocorrem de forma individualizada, mas sim são o resultado de variados processos, bióticos e abióticos, que ocorrem de forma simultânea, dentre os quais se destacam a hidrólise, a desidrohalogenação, o cometabolismo, a oxidação direta e a decloração redutiva, e descrevem estes mecanismos conforme abaixo:

- (a) A hidrólise de contaminantes orgânicos é um processo de degradação abiótica, na qual um halogênio presente em um composto orgânico reage com o radical hidroxila na presença de água. Como resultado, pode ser formada uma combinação de ácidos e álcoois, ou ainda pode ocorrer a eliminação de um halogênio com formação de uma dupla ligação entre os carbonos resultando em uma combinação de ácidos e alcenos, conforme as reações abaixo:



OU

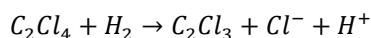


McCarty (1996 apud WIEDEMEIER et al, 1999) afirma que o único solvente organoclorado passível de degradação por hidrólise é o 1,1,1-tricloreto, que se converte a 1,1-dicloroeteno nesse processo. O autor afirma, ainda, que apenas 20% das reações de hidrólise do 1,1,1-tricloroetano resulta na formação de 1,1-dicloroeteno, enquanto no restante dos casos este composto tende a se degradar a ácido acético. De acordo com Wiedemeier et al (1999), a degradação por hidrólise é influenciada por fatores como pH, presença de argila, presença de matéria orgânica dissolvida e íons metálicos.

- (b) A desidrohalogenação é o processo pelo qual um etano sofre a remoção de um halogênio seguida pela remoção de um átomo de hidrogênio do carbono adjacente, tendo um alceno como produto. No caso dos solventes clorados alifáticos, temos, portanto um etano clorado sendo convertido a eteno clorado. Conforme Vogel e McCarty (1987, apud WIEDEMEIER et al, 1999), o 1,1,1-tricloroetano é um composto passível de degradação por desidrohalogenação, tendo o 1,1-dicloroeteno como produto. Cruz (1999) complementa que a transformação do etano clorado em eteno clorado também pode ocorrer a partir da eliminação de dois átomos de cloro em carbonos adjacentes, formando uma dupla ligação entre eles, particularidade que a autora nomeia de haloeliminação.
- (c) No cometabolismo, o contaminante não é utilizado como fonte de energia ou biomassa para os microorganismos envolvidos no processo, mas sim sofre uma degradação indireta pela ação de uma enzima ou cofator produzido por este microorganismo durante o metabolismo de outro substrato. Wiedemeier et al (1999) afirmam que este processo

é lento, tendo pouca relevância nos processos naturais de degradação. No caso dos solventes organoclorados, um exemplo de cometabolismo seria a oxidação de tricloroeteno utilizando a mesma enzima produzida por bactérias metanotróficas durante a oxidação de metano. Embora esta rota metabólica seja possível, a ocorrência abundante e simultânea de metano e oxigênio é rara no meio subterrâneo, motivo pelo qual este mecanismo de degradação se torna pouco relevante em ambientes naturais.

- (d) A oxidação biológica é o mecanismo pelo qual um contaminante atua como doador de elétrons em reações de oxirredução realizadas por microorganismos, servindo como fonte de energia e/ou biomassa para estes microorganismos. Este processo não costuma acontecer com os compostos mais clorados, como o tetracloroeteno, o tricloroeteno e o tricloroetano, já que o estado de oxidação destas moléculas é elevado. Já alguns compostos clorados com menores níveis de oxidação, como os dicloroetenos, dicloroetanos e cloreto de vinila, podem sofrer o processo de oxidação biológica, especialmente em condições aeróbicas.
- (e) A decloração redutiva, também chamada de halorrespiração, é um processo biológico de redução pelo qual um contaminante atua como acceptor de elétrons em reações de oxirredução realizadas por microorganismos, tendo um átomo de cloro substituído por um átomo de hidrogênio, conforme reação abaixo, referente à decloração redutiva do tetracloroeteno.



Sendo assim, um mol do composto original (composto-pai) gera um mol do produto da degradação (composto-filho). Uma particularidade da decloração redutiva é que este processo depende da disponibilidade de hidrogênio livre em abundância no meio. Dessa forma, para que a decloração redutiva ocorra, é necessário que antes aconteça a fermentação de um substrato orgânico, produzindo hidrogênio que é então usado como doador de elétrons para a redução dos compostos clorados. O substrato inicialmente fermentado pode ser um composto orgânico naturalmente presente no meio ou então outro contaminante não clorado presente na área, por exemplo hidrocarbonetos de petróleo.

A hidrólise e a desidrohalogenação são processos abióticos, enquanto a oxidação direta, o cometabolismo e a decloração redutiva são processos intermediados por microorganismos.

Embora os processos abióticos sejam possíveis de ocorrer, e tenham relevância nos casos em que as condições do meio não permitem a ocorrência de biodegradação, estes se tratam de processos de baixa velocidade em comparação com os biológicos, de forma que se tornam pouco expressivos no contexto da atenuação natural (WIEDEMEIER et al, 1999).

Dessa forma, quando consideramos os mecanismos pelos quais os solventes clorados podem continuar se degradando, mesmo após encerradas as atividades de remediação de uma área contaminada, se destacam a decloração redutiva, a oxidação direta e o cometabolismo, sendo que estes dois últimos podem ocorrer em ambientes aeróbios e anaeróbios. É importante destacar que nem todos os compostos são passíveis de degradação por todos os mecanismos. O Quadro 01 relaciona os mecanismos de biodegradação aplicáveis aos principais solventes clorados alifáticos.

É possível observar que os compostos com três e quatro cloros não são passíveis de degradação por oxidação biológica direta. Isto se explica porque o estado de oxidação das moléculas aumenta com o número de átomos de cloro presente. Assim, moléculas com três e quatro cloros têm estados de oxidação elevados, estando mais suscetíveis a sofrer redução, enquanto os compostos menos clorados apresentam baixos estados de oxidação e estão suscetíveis a sofrer oxidação (FERRAZ, 2014).

Quadro 1 – Mecanismos de biodegradação aplicáveis aos solventes clorados alifáticos

| Composto | Decloração redutiva | Oxidação aeróbia direta | Oxidação anaeróbia direta | Cometabolismo aeróbio | Cometabolismo anaeróbio |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Etenos clorados | | | | | |
| Tetracloroeteno | X | | | | X |
| Tricloroeteno | X | | | X | X |
| Dicloroetenos | X | X | X | X | X |
| Cloreto de vinila | X | X | X | X | X |
| Etanos clorados | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | X | | | X | X |
| 1,2-dicloroetano | X | X | | X | X |
| Cloreto de etila | | X | | X | |
| Metanos clorados | | | | | |
| Tetracloroetano de carbono | X | | | | X |
| Clorofórmio | X | | | X | X |
| Cloreto de metila | | X | X | X | |

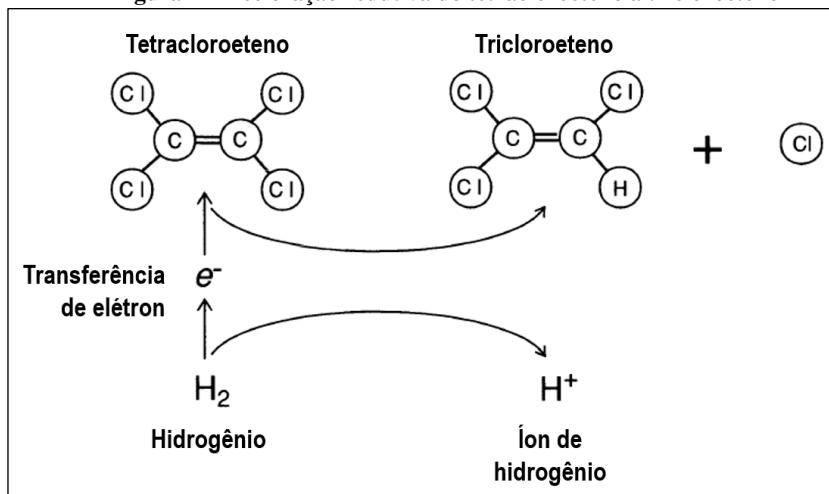
Fonte: Wiedemeier et al, 1999, p. 243

Quanto aos processos de cometabolismo, embora estes sejam possíveis de ocorrer, Wiedemeier et al (1999) afirma que eles são pouco expressivos em comparação à decloração redutiva. Isto porque no cometabolismo o solvente clorado não é o substrato da rota metabólica do microorganismo, sendo que a sua degradação é um evento fortuito e colateral de processos metabólicos que não o envolvem. Por este motivo, o processo é lento e pouco eficiente.

Complementarmente, os autores destacam que o ambiente subterrâneo, em especial o interior das plumas de contaminação, tende a apresentar condições anaeróbias devido à presença de outros contaminantes – como por exemplo os hidrocarbonetos de petróleo – que atuam como doadores de elétrons em reações de oxidação que causam uma rápida redução nos níveis de oxigênio inicialmente presentes, combinada com a baixa interação do meio com a superfície. Sendo assim, considera-se que as reações anaeróbias são mais relevantes para os mecanismos naturais de biodegradação.

Tomando todos esses fatores em conjunto, considera-se que no contexto do presente estudo, ou seja, para avaliarmos a possibilidade de massas remanescentes de compostos-pai seguirem sendo degradadas por vias naturais após encerradas as atividades de remediação, o principal mecanismo de degradação a ser considerado é a decloração redutiva em ambiente anaeróbio. Cabe observar que a biodegradação dos contaminantes residuais pode ocorrer independentemente da técnica empregada no próprio projeto de remediação, desde que o ambiente seja propício para tal. Ou seja, mesmo em uma área que foi remediada por processos abióticos, a biodegradação devida às condições ambientais pode ocorrer concomitantemente às intervenções realizadas ou após o encerramento das atividades. A Figura 1 ilustra o processo de decloração redutiva do tetracloroeteno a tricloroeteno.

Figura 1 – Decloração redutiva do tetracloroeteno a tricloroeteno

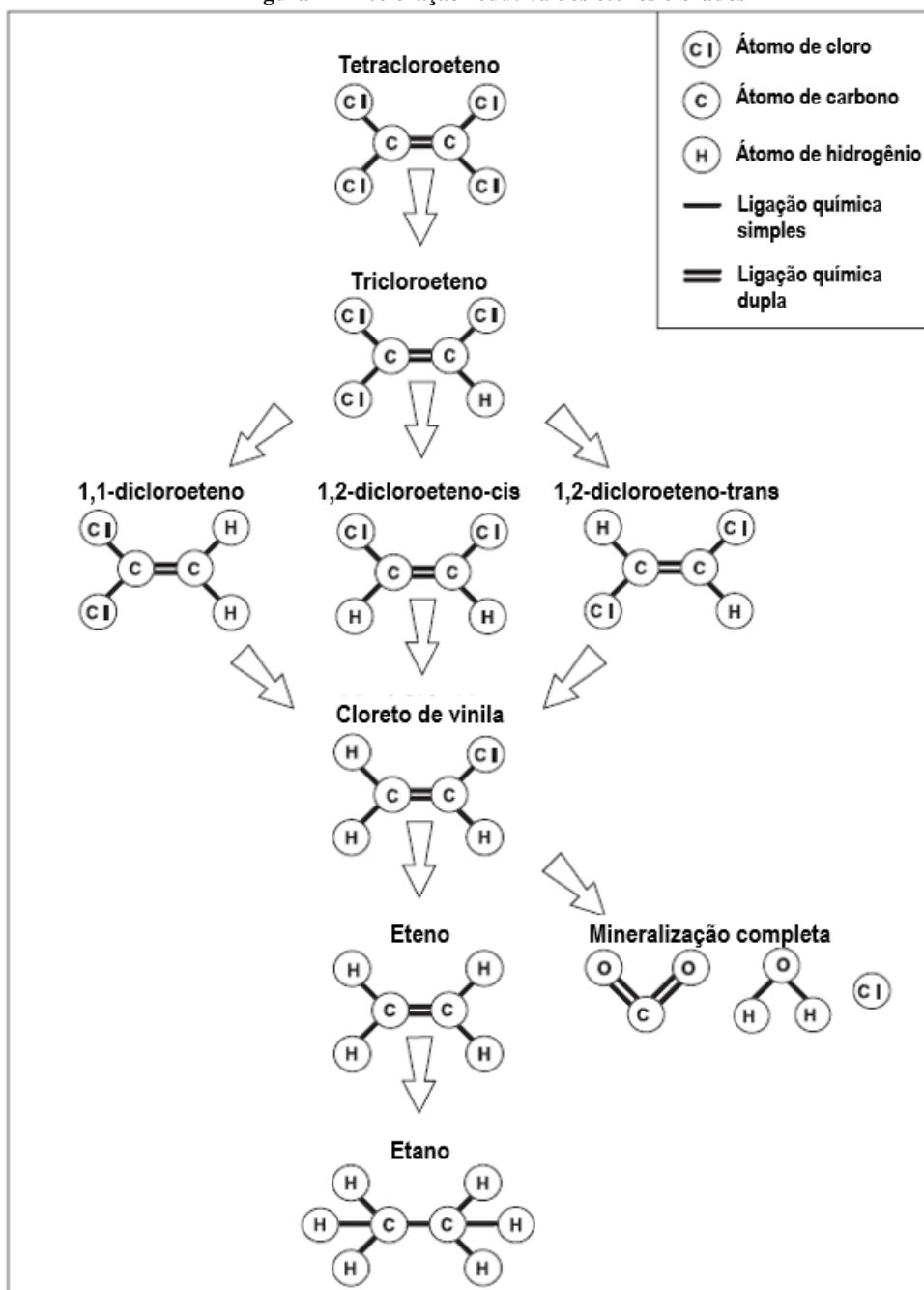


Fonte: Traduzido de Wiedemeier, 1999, p. 244

Conforme Wiedemeier et al (1999), o mesmo mecanismo é capaz de degradar o tricloroeteno a dicloroetenos, estes a cloreto de vinila e, em última instância, o cloreto de vinila a eteno, conforme indicado na Figura 2.

Bower (1994, *apud* USEPA, 1998) destaca que, na etapa de transformação do tricloroeteno a dicloroetenos, o resultado da degradação pode ser qualquer um dos três possíveis isômeros de dicloroeteno. Contudo, em condições naturais de degradação biológica, é observada uma prevalência da produção de 1,2-dicloroeteno-cis, seguida por 1,2-dicloroeteno-trans, e tendo o 1,1-dicloroeteno com isômero menos provável de resultar deste processo.

Figura 2 – Decloração redutiva dos etenos clorados



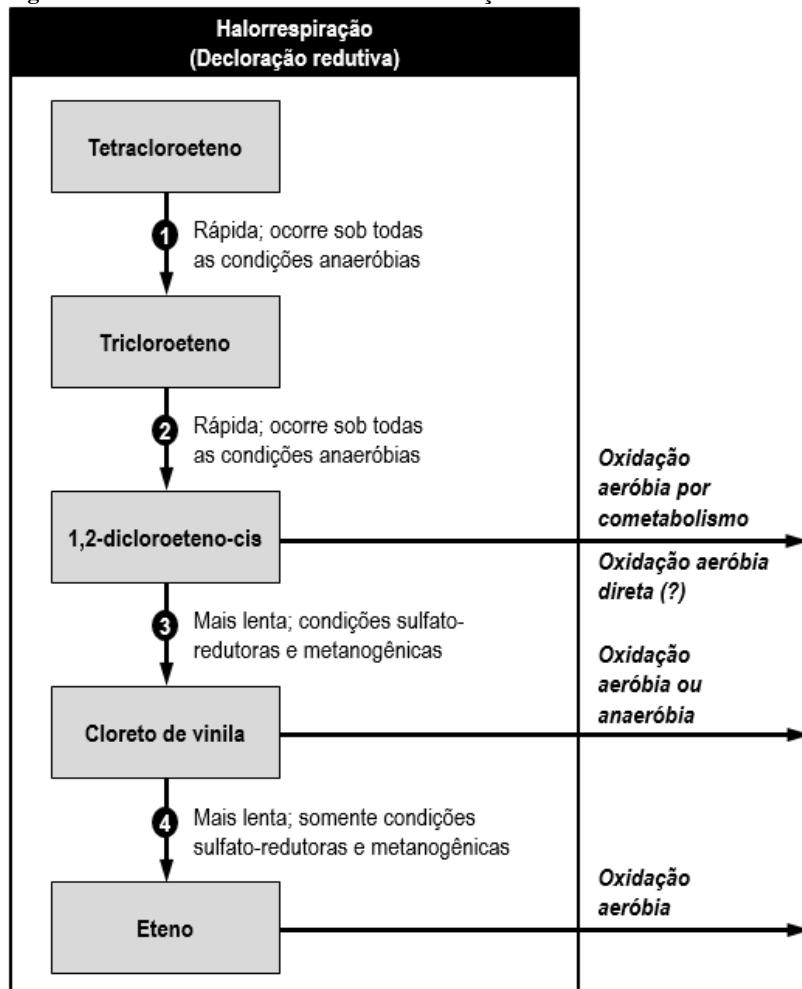
Fonte: Traduzido de USEPA, 1998, p. 24

Assim também, este mecanismo é capaz de degradar, de forma sequencial, os etenos clorados e os metanos clorados. Lima (2017) nomeia de decloração redutiva sequencial a série de reações em que esta substituição é feita em sequência até chegar, possivelmente, ao contaminante com apenas um cloro em sua composição ou mesmo às moléculas não cloradas (eteno, etano e metano, respectivamente).

É importante destacar que este processo tem maior eficácia nas formas mais oxidadas de cada família de compostos clorados. À medida que as etapas sequenciais deste mecanismo

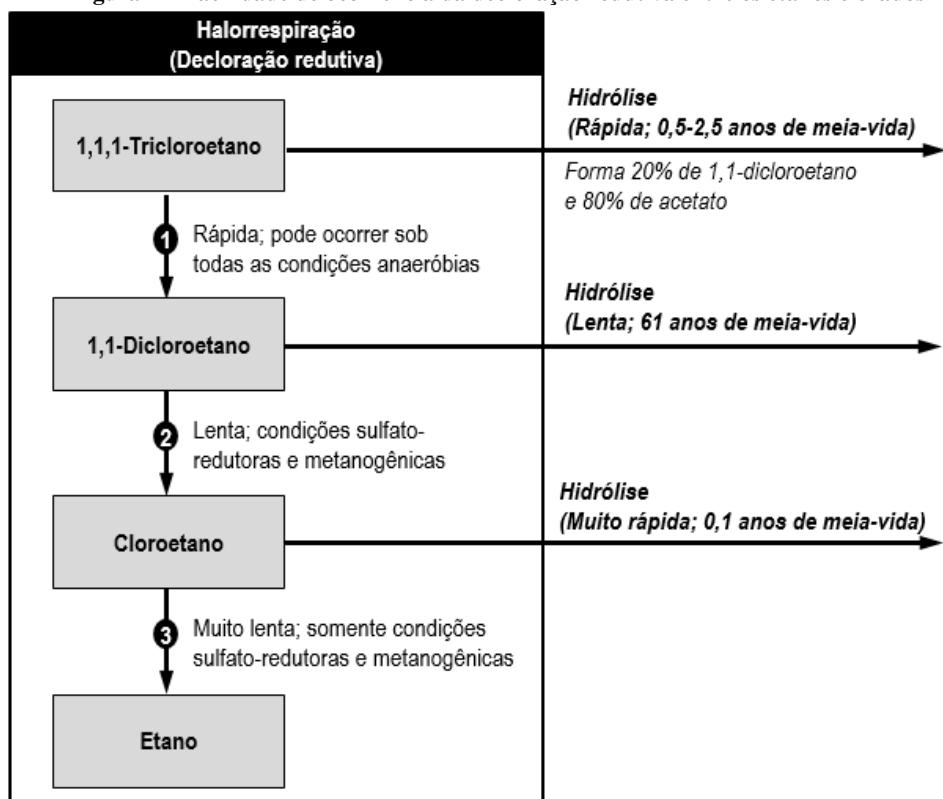
avancam e a molécula vai se tornando cada vez mais reduzida, ela se torna mais resistente a uma nova reação de redução. Conforme indicado no Quadro 01, os compostos situados no final da cadeia de decloração redutiva se degradarão preferencialmente por mecanismos oxidativos, ao invés do processo redutivo aqui descrito. Uma vez que a degradação iniciou sob condições redutoras, esta característica propicia condições para que os compostos-filho se acumulem no aquífero ao longo do tempo (NOBRE & NOBRE, 2004; BERTOLO, 2017; WIEDEMEIER et al, 1999). As Figuras 3, 4 e 5 ilustram a facilidade de ocorrência da decloração redutiva em cada etapa do processo de degradação sequencial, para cada família de compostos clorados. Observa-se que no caso dos etenos clorados, a partir dos dicloroetenos a reação se torna mais lenta, levando a maiores acúmulos do produto no meio. No caso dos etanos clorados, o mesmo ocorre a partir dos dicloroetanos, e no caso dos diclorometanos já a partir do clorofórmio.

Figura 3 – Facilidade de ocorrência da decloração redutiva entre os etenos clorados



Fonte: Adaptado de WIEDEMEIER et al, 1999, p. 265

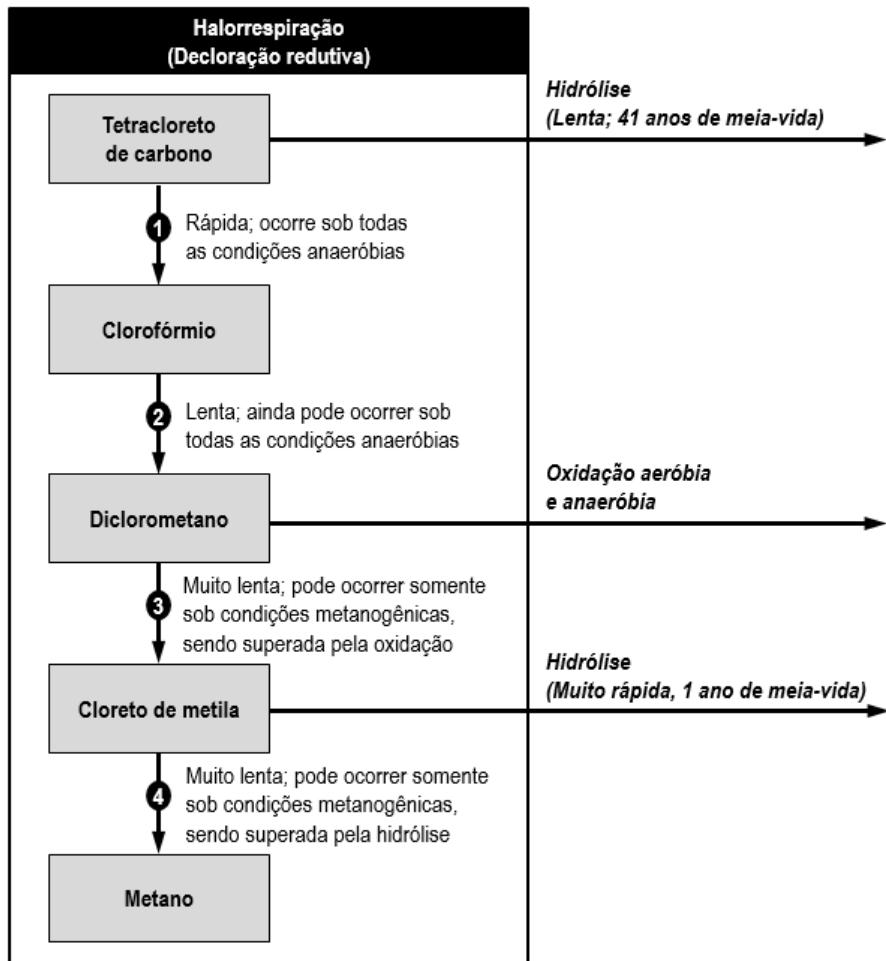
Figura 4 – Facilidade de ocorrência da decloração redutiva entre os etanos clorados



Fonte: Adaptado de WIEDEMEIER, et al 1999, p. 266

Wiedemeier et al (1999) destacam que a decloração redutiva, ou halorrespiração, depende diretamente de um ambiente subterrâneo anaeróbio e com baixo potencial de oxirredução, bem como da abundância de compostos orgânicos que sirvam como substrato para a reação de fermentação, produzindo hidrogênio dissolvido. É importante ressaltar que no meio subterrâneo há uma grande variedade de bactérias que competem com as halorrespiradoras pelo hidrogênio disponível, tais como as bactérias denitrificadoras, ferrorredutoras, sulfatorredutoras e metanogênicas. Segundo os autores, as bactérias halorrespiradoras têm vantagem sobre as metanogênicas e as sulfatorredutoras na competição por hidrogênio, em qualquer concentração deste condicionante. Já nos casos em que há bactérias denitrificadoras no meio, as halorrespiradoras apresentam desvantagem. Sendo assim, ambientes ricos em nitrato desfavorecem o mecanismo de decloração redutiva.

Figura 5 – Facilidade de ocorrência da decloração redutiva entre os metanos clorados



Fonte: Adaptado de WIEDEMEIER et al, 1999, p. 267

Wiedemeier et al (1996a, 1988, apud WIEDEMEIER et al, 1999) classificam o ambiente subterrâneo, no que diz respeito ao comportamento de plumas de solventes clorados, em três tipos de acordo com os substratos de fermentação que possibilitam a decloração redutiva:

- (a) Tipo 1: trata-se de um ambiente anaeróbio devido à abundância de matéria orgânica de origem antropogênica, que provoca um aumento substancial na demanda por aceptores de elétrons. Nestas condições, ocorre a fermentação desta matéria orgânica, criando condições para que a decloração redutiva ocorra. São características de um ambiente *tipo 1* as baixas concentrações de oxigênio, sulfato e nitrato e as altas concentrações de Fe(II) e metano. Quanto às concentrações de hidrogênio livre, estas costumam ser superiores a 1nM, ou seja, faixas de pH menores ou iguais a 9.0 podem ser observadas nestes ambientes. Este tipo de ambiente costuma ocorrer em áreas contaminadas por vazamento de combustíveis e áreas contaminadas por aterros de resíduos, e são propícias para a degradação de solventes clorados de maiores estados de oxidação. Já

os compostos menos clorados tendem a se degradar de forma mais lenta, se acumulando e formando plumas mais extensas que os compostos originais. Estes ambientes também apresentam extensas plumas de cloreto e de metano, que são formados ao longo do processo e não se degradam no ambiente anaeróbio.

- (b) Tipo 2: trata-se de um ambiente semelhante ao *tipo 1*, com a diferença de que a matéria orgânica abundante tem origem natural. Este tipo de situação pode ocorrer em ambientes com zona de recarga passando por áreas costeiras, depósitos sedimentares e áreas de banhados, por exemplo. As características são semelhantes às descritas no caso acima, porém as taxas de degradação tendem a ser menores do que no *tipo 1*.
- (c) Tipo 3: trata-se de ambientes com baixa carga orgânica que, portanto, são bem oxigenados, uma vez que a demanda por aceptores de elétrons é baixa. Nestes ambientes, a decloração redutiva não ocorre e as plumas dos solventes organoclorados nas suas formas mais reduzidas se ampliam por longas extensões, sendo atenuadas somente de forma sutil por processos abióticos. Em contrapartida, se houver um aporte antropogênico dos contaminantes menos clorados, como por exemplo o cloreto de vinila e o 1,2-dicloroetano, as plumas destes compostos terão menores dimensões, uma vez que estes contaminantes são passíveis de oxidação. Este ambiente é encontrado em regiões de rochas metamórficas ou cristalinas sem aporte antropogênico de fonte de carbono.

Cabe destacar que uma mesma pluma de contaminação pode atravessar mais de um dos tipos de ambientes acima descritos, produzindo modelos conceituais mistos para o seu comportamento em ambiente subterrâneo.

Ainda conforme Wiedemeier et al (1999), alguns parâmetros são indicativos de que o ambiente subterrâneo é propício para a decloração redutiva: baixas concentrações de oxigênio dissolvido; altas concentrações de hidrogênio; presença de metano, indicando que está ocorrendo fermentação no ambiente; elevada concentração de cloreto livre na água subterrânea, indicando que o processo de decloração está ocorrendo; e aumento nas concentrações dos produtos da degradação ao longo do tempo. Além disso, no caso dos etenos clorados, considerando que a decloração redutiva do tricloroeteno ao dicloroeteno tende a resultar no isômero *cis* como produto, uma alta proporção de 1,2-dicloroeteno-*cis* em comparação ao 1,2-dicloroeteno-*trans* é um indicativo de que o dicloroeteno presente na área é provável produto

de degradação do tricloroeteno. Como regra geral, quando a razão entre a concentração de 1,2-dicloroeteno-cis e a soma das concentrações de 1,2-dicloroeteno-trans e 1,1-dicloroeteno é maior do que 5:1, isto indica que o dicloroeteno presente na área tem provável origem no processo de decloração redutiva do tricloroeteno. A presença de etanos, etenos e cloreto de vinila também podem ser indicativos de que a decloração está ocorrendo na área. Assim, os autores apresentam três linhas de evidência utilizadas para avaliar se a atenuação natural está ocorrendo em um determinado ambiente, descritas a seguir.

- (a) Observação dos dados históricos relativos à concentração de contaminantes, com o objetivo de verificar se há uma tendência para estabilização da pluma em condições naturais. Lemes (2021) traz como exemplos desta linha de evidência a análise visual ou quantitativa da alteração das plumas de contaminação ao longo do tempo, a análise de tendências através do tratamento estatístico do histórico de resultados analíticos, a avaliação dos fluxos de massa ao longo do tempo e o cálculo de taxas de atenuação por meio da regressão linear da relação entre concentração e distância da fonte. Em todos os casos, devem ser considerados os contaminantes originais e os produtos da sua degradação de forma integrada. Se, por exemplo, for observado um aumento das plumas de produtos de degradação, mas a isto estiver associada uma retração nas dimensões e concentrações da pluma do contaminante original, este comportamento indica a ocorrência de mecanismos de degradação.
- (b) Observação de dados geoquímicos, com o objetivo de verificar se as condições do aquífero são compatíveis com a biodegradação, como por exemplo a redução de doares e aceptores de elétrons ao longo do tempo, aumento dos produtos colaterais do metabolismo microbiano, e alta proporção na razão entre os isômeros de dicloroeteno. Em documento que orienta os procedimentos para avaliação da atenuação natural de solventes clorados, a USEPA (1998) apresenta exemplos para esta linha de evidência. Observa-se, de um lado, que em áreas com concentrações de oxigênio dissolvido superiores a 0,5 mg/L, a decloração redutiva não ocorre, uma vez que as reações microbiológicas aeróbias serão favorecidas nestes ambientes. De forma semelhante, concentrações de nitrato superiores a 1 mg/L e concentrações de sulfato superiores a 20 mg/L também desfavorecem, embora não impeçam, o processo de decloração redutiva, por fornecerem vantagem competitiva a outros grupos microbianos, não envolvidos na degradação dos solventes clorados. Por outro lado, um aumento das concentrações de

metano na água subterrânea é sugestivo de condições redutoras no meio. O pH da água subterrânea influencia a capacidade de atenuação natural de um meio, uma vez que afeta diretamente a atividade microbiana, favorecendo determinados grupos de microorganismos. De forma geral, os microorganismos envolvidos na degradação de solventes clorados são favorecidos em uma faixa de pH de 6,0 a 8,0. Um incremento nas concentrações de cloro livre na água subterrânea também pode ser utilizado para avaliar as condições da área, já que pode ser resultado do processo de decloração redutiva dos solventes clorados alifáticos.

- (c) Observação de dados microbiológicos que indiquem a disponibilidade de microorganismos degradadores compatíveis com o contaminante em estudo. A USEPA (1998) recomenda a observação desta linha de evidência por meio da realização de estudos de microcosmos com o uso de material representativo do aquífero, no objetivo de avaliar o potencial microbiológico de degradação das substâncias químicas de interesse. A mesma agência ambiental, contudo, ressalva que esta categoria de estudos demanda um alto custo e consumo de tempo, sendo por isso indicada apenas quando as incertezas sobre o meio não são dirimidas através das linhas de evidência anteriores.

5. CÁLCULO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS ACEITÁVEIS

Para comparar o risco associado a cada um dos compostos organoclorados aqui considerados, foi feito o cálculo das concentrações máximas aceitáveis para cada um deles em solo subsuperficial, solo superficial e em água subterrânea, utilizando as planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas sob investigação da CETESB, em sua versão 03_01, publicada em outubro de 2021. As concentrações em ar ambiente não foram consideradas, uma vez que este trabalho está focado nos efeitos dos mecanismos de biodegradação dos contaminantes em ambiente subterrâneo.

No contexto deste estudo, o objetivo dos cálculos é a comparação do risco relacionado a cada substância química de interesse dentro de um mesmo cenário de exposição. Sendo assim, os parâmetros que definem este cenário não têm relevância para a interpretação dos resultados, desde que sejam mantidos inalterados ao longo de todo o estudo. Por este motivo, foram utilizados cenários genéricos para a execução dos cálculos, privilegiando, para cada compartimento ambiental de interesse, a situação de maior risco para a saúde humana.

Consideraram-se como receptores os trabalhadores industriais expostos ao solo e à água subterrânea contaminados, na fonte de contaminação. Para a contaminação em solo subsuperficial e água subterrânea, o caminho de exposição considerado foi a inalação de vapores em ambiente fechado. A inalação de vapores em ambiente aberto não foi considerada por ser menos restritiva do que o caso anterior. Os cenários que envolvem ingestão ou contato dérmico com água subterrânea não foram considerados, porque neste caso os padrões legais aplicáveis relativos à potabilidade prevalecem sobre as concentrações máximas aceitáveis no estabelecimento de metas de remediação. Já para solo superficial, o caminho de exposição considerado foi a ingestão. A inalação de vapores a partir de solo superficial não foi considerada, uma vez que este cenário já está contemplado a partir da exposição ao solo subsuperficial, que apresenta valores mais restritivos para cenários de inalação. O contato dérmico com o solo superficial e a inalação de partículas de contaminante não foram consideradas, uma vez que as substâncias químicas de interesse volatilizam com facilidade, o que torna estes cenários pouco representativos.

Para caracterização do meio físico, foram utilizados os valores de cálculo que constam como padrão na planilha da CETESB para ambiente industrial, sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de cálculo para caracterização do meio físico – referência CETESB para ambiente industrial

| PARÂMETROS | UNIDADE | VALORES DE CÁLCULO |
|--|-------------------|--------------------|
| Área das Fundações | cm ² | 200.000 |
| Pé Direito | cm | 300 |
| Espessura das fundações/paredes de construções | cm | 15,00 |
| Fator de atenuação | - | 0,03 |
| Profundidade da Fonte no Solo Subsuperficial | cm | 100 |
| Espessura do Solo Subsuperficial Impactado | cm | 345 |
| Largura do solo subsuperficial impactado | cm | 4.500 |
| Profundidade do Nível d'Água | cm | 450 |
| Temperatura da Água Subterrânea | K | 298 |
| Largura da área fonte na direção paralela ao fluxo da água subterrânea | cm | 1.000 |
| Espessura da pluma dissolvida na água subterrânea | cm | 200 |
| Porosidade Total | - | 0,460 |
| Densidade do Solo | g/cm ³ | 1,300 |
| Fração de Carbono Orgânico no Solo | g-C/g-solo | 0,003 |
| Espessura do Solo Superficial Impactado | cm | 100 |
| Área de Emissão de Vapores | cm ² | 20.250.000 |
| Largura do solo superficial impactado | cm | 4.500 |

Fonte: CETESB, 2021

A partir dos parâmetros acima definidos, foram calculadas as concentrações máximas aceitáveis para cada cenário, por meio da planilha “*CETESBRisk-v3_01-TrabComInd-Ago2021*”, disponibilizada a público pela CETESB. Os resultados estão sintetizados na Tabela 4. Na tabela são destacados, para cada família de contaminantes, as concentrações máximas aceitáveis mais restritivas de cada cenário (destaque em verde). As planilhas completas, incluindo os dados de entrada, são apresentadas no Apêndice A, ao final deste trabalho.

Tabela 4 – Concentrações máximas aceitáveis para os cenários considerados

| CENÁRIO | INGESTÃO | | | INALAÇÃO DE VAPORES (AMBIENTE FECHADO) |
|-------------------------|-------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| | MEIO FÍSICO | SOLO SUPERFICIAL | SOLO SUBSUPERFICIAL | |
| CONTAMINANTE | EFEITO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL (mg/kg) | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL (mg/kg) | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL (mg/L) |
| Etenos clorados | | | | |
| Tetracloroeteno | C | 3,01E+04 | 7,93E+01 | 6,17E+01 |
| | NC | 1,21E+04 | 2,63E+01 | 2,05E+01 |
| Tricloroeteno | C | 1,37E+03 | 5,03E+00 | 4,93E+00 |
| | NC | 1,01E+03 | 1,32E+00 | 1,29E+00 |
| 1,1-dicloroeteno | C | - | - | - |
| | NC | 1,01E+05 | 1,32E+02 | 4,37E+01 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | C | - | - | - |
| | NC | 4,03E+03 | - | - |
| 1,2-dicloroeteno-trans | C | - | - | - |
| | NC | 4,03E+04 | 2,63E+01 | 2,15E+01 |
| Cloreto de vinila | C | 8,78E+01 | 4,69E+00 | 1,19E+00 |
| | NC | 6,04E+03 | 6,58E+01 | 1,67E+01 |
| Etanos clorados | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | C | - | - | - |
| | NC | 4,03E+06 | 3,29E+03 | 2,10E+03 |
| 1,1,2-tricloroetano | C | 1,11E+03 | 2,48E+00 | 1,05E+01 |
| | NC | 8,06E+03 | 2,53E-01 | 1,07E+00 |
| 1,1-dicloroetano | C | 1,11E+04 | 1,29E+01 | 1,71E+01 |
| | NC | 4,03E+05 | - | - |
| 1,2-dicloroetano | C | 6,94E+02 | 7,93E-01 | 3,75E+00 |
| | NC | 1,21E+04 | 4,60E+00 | 2,17E+01 |
| Cloreto de etila | C | - | - | - |
| | NC | - | 6,58E+03 | 3,99E+03 |
| Metanos clorados | | | | |
| Tetracloreto de carbono | C | 9,03E+02 | 3,44E+00 | 1,60E+00 |
| | NC | 8,06E+03 | 6,58E+01 | 3,06E+01 |
| Clorofórmio | C | 2,04E+03 | 8,97E-01 | 1,80E+00 |
| | NC | 2,01E+04 | 6,45E+01 | 1,29E+02 |
| Diclorometano | C | 3,16E+04 | 2,06E+03 | 3,60E+03 |
| | NC | 1,21E+04 | 3,95E+02 | 6,89E+02 |
| Cloreto de metila | C | - | - | - |
| | NC | - | 5,92E+01 | 3,68E+01 |

NOTA: C = efeitos carcinogênicos. NC = efeitos não carcinogênicos. Destaque em verde = CMA mais restritiva dentro da família de contaminantes, para cada cenário considerado.

Fonte: dados calculados com o uso das Planilhas para Avaliação de Risco da CETESB.

Observa-se que, dentre os etenos clorados, as concentrações máximas aceitáveis mais restritivas são relativas ao cloreto de vinila e ao tricloroeteno. O cloreto de vinila requer as metas de remediação mais restritivas para solo superficial e água subterrânea, considerando, respectivamente, os cenários de ingestão de solo e inalação de vapores em ambiente fechado. O risco considerado está associado aos efeitos carcinogênicos do contaminante. Já no caso do solo subsuperficial, as metas mais restritivas se referem ao tricloroeteno, considerando o cenário

de inalação de vapores em ambiente fechado, e o risco está associado a efeitos não carcinogênicos. As concentrações máximas aceitáveis de cloreto de vinila em solo subsuperficial se encontram na mesma ordem de grandeza que as do tricloroeteno. Cabe destacar que não são calculadas concentrações máximas aceitáveis para o 1,2-dicloroeteno-cis nos cenários de inalação de vapores, fato que advém da insuficiência dos dados toxicológicos relativos a este contaminante. Em decorrência desta característica, é comum que não sejam estabelecidas metas de remediação específicas para este contaminante, quando considerados cenários de inalação de vapores.

Para os etanos clorados, a concentração máxima aceitável mais restritiva para solo superficial, considerando o cenário de ingestão, diz respeito ao 1,2-dicloroetano e está associada aos efeitos carcinogênicos deste contaminante. Já no caso do solo subsuperficial e da água subterrânea, as concentrações máximas aceitáveis mais restritivas correspondem ao 1,1,2-tricloroetano, que é considerado composto-pai na linha de decloração redutiva. Contudo, pode-se observar que o seu isômero 1,1,1-tricloretano tem concentrações máximas aceitáveis (e, portanto, metas de remediação) mais abrangentes. Sendo assim, ao considerar os compostos-filho desta família de contaminantes, é possível verificar que os isômeros de dicloroetano apresentam concentrações máximas aceitáveis entre duas e quatro ordens de grandeza mais restritivas do que o 1,1,1-tricloretano. Observa-se, ainda, que não são calculadas concentrações máximas aceitáveis para o cloreto de etila no cenário de ingestão de solo contaminado. Nos cenários que envolvem inalação de vapores em ambiente fechado, as concentrações máximas aceitáveis do cloreto de etila são superiores às de todos os compostos que o precedem na cadeia de decloração redutiva.

Para os metanos clorados, as concentrações máximas aceitáveis mais restritivas em solo superficial e água subterrânea, nos cenários considerados, dizem respeito ao tetracloreto de carbono, que é o primeiro na linha de degradação deste grupo de contaminantes. Já para solo subsuperficial, considerando o cenário de inalação de vapores em ambiente fechado, a concentração máxima aceitável mais restritiva é relativa ao clorofórmio, que pode ser produzido a partir da degradação do tetracloreto de carbono. Ainda, para os cenários de inalação de vapores em ambiente fechado, as concentrações máximas aceitáveis de cloreto de metila são mais restritivas que as do diclorometano, que o precede na cadeia de decloração redutiva. Destaca-se que no cenário de ingestão de solo não são calculadas as concentrações máximas aceitáveis de cloreto de metila.

Ao comparar os resultados das diferentes substâncias dentro de uma mesma família de contaminantes, observa-se que os compostos-filho podem ter concentrações máximas aceitáveis (e, portanto, metas de remediação) mais restritivas do que as de substâncias que os precedem na linha de decloração redutiva. Esta relação varia com o meio físico, a via de exposição e a substância alvo da comparação, podendo chegar a até quatro ordens de grandeza nos casos da comparação entre cloreto de vinila e 1,1-dicloroeteno. Ou seja, a depender do cenário de exposição considerado, as metas de remediação dos compostos-pai podem ser até 10.000 vezes maiores do que as metas de remediação do produto de degradação mais tóxico da mesma família de contaminantes.

6. PROPOSTA DE GERENCIAMENTO DE RISCO

As diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 420/2009 definem que, uma vez que os riscos tenham sido reduzidos a níveis toleráveis, ou seja, uma vez que as metas de remediação forem atingidas, a área de estudo deverá passar por um período de monitoramento após o qual, mantendo-se as mesmas condições ou com tendência a melhora, poderá ser declarada como reabilitada para uso declarado. Sendo assim, uma área poderá ser considerada reabilitada mesmo que existam na área, ainda, concentrações remanescentes de contaminantes, desde que estas sejam inferiores às concentrações máximas aceitáveis calculadas na avaliação de risco à saúde humana, e que o risco total não ultrapasse o máximo aceitável.

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, os solventes clorados alifáticos tendem a se degradar naturalmente em ambiente subterrâneo principalmente por meio da decloração redutiva. Este processo é favorecido em ambientes anaeróbios, em condições redutoras, com abundância de substrato orgânico disponível para fermentação. Ou seja, mesmo após o processo de remediação ter sido finalizado e o respectivo monitoramento ser encerrado, a degradação destes compostos pode seguir ocorrendo, fazendo com que ao longo do tempo as concentrações dos compostos-pai diminuam e as concentrações dos compostos-filho aumentem, com uma possível tendência de paralização do processo de degradação.

No caso dos solventes clorados, esta característica desperta preocupação, já que alguns dos produtos da degradação oferecem maior risco à saúde humana, tendo concentrações máximas aceitáveis mais restritivas do que a dos respectivos compostos-pai. Além disto, destaca-se o caso específico do 1,2-dicloroeteno-cis, para o qual não costumam ser definidas metas de remediação para cenários de inalação de vapores, uma vez que não há dados toxicológicos disponíveis que sustentem a quantificação dos riscos relacionados a esta via de ingresso para este composto. Esta situação é particularmente delicada, pois o produto da degradação do 1,2-dicloroeteno-cis, o cloreto de vinila, demonstrou ser o mais tóxico dentre os etenos clorados, geralmente com as concentrações máximas aceitáveis mais restritivas, especialmente no que tange a efeitos carcinogênicos.

Cabe destacar que os produtos da degradação também tendem a se acumular no aquífero por maiores períodos, já que possuem estado de oxidação mais baixos do que os contaminantes

originais, de forma que a declaração redutiva é menos eficiente para estes compostos, enquanto mecanismos de biodegradação alternativos – tais como oxidação biológica e cometabolismo – requerem condições pouco frequentes no ambiente subterrâneo.

Sendo assim, mesmo que as concentrações remanescentes de todos os compostos atendam às respectivas metas de remediação, estas plumas de contaminação não necessariamente se encontram em equilíbrio químico, de forma que não se pode descartar a possibilidade de que as condições ambientais sejam alteradas e, devido à continuidade da degradação, as concentrações dos compostos-filho mais tóxicos aumentem a ponto de superar as respectivas metas de remediação, em um momento em que a área não esteja mais sendo monitorada.

Convém, portanto, avaliar em que medida as concentrações remanescentes dos compostos-pai podem potencialmente provocar um incremento nas concentrações dos compostos-filho mais tóxicos de cada família de contaminantes, elevando os riscos potenciais a patamares superiores aos máximos aceitáveis e levando, consequentemente, à necessidade de reabrir um caso que já havia sido encerrado. Com base nesta avaliação, seria possível manter o monitoramento da área, após a finalização dos trabalhos de remediação, de forma a viabilizar a identificação eventuais alterações nas condições de risco à saúde humana. Complementarmente, poderiam ser estabelecidas metas de remediação mais restritivas, com o objetivo de prevenir este cenário de risco futuro.

No caso dos etenos clorados, os compostos mais tóxicos são o cloreto de vinila e o tricloroeteno. Assim, devem ser avaliadas as contribuições das concentrações remanescentes do tetracloroeteno, tricloroeteno e isômeros de dicloroeteno para um possível incremento futuro nas concentrações de cloreto de vinila, bem como a contribuição das concentrações remanescentes do tetracloroeteno para um possível incremento futuro nas concentrações de tricloroeteno. Nesta família de contaminantes, destaca-se também a particularidade do 1,2-dicloroeteno-cis, cujos dados de toxicidade não permitem o estabelecimento de concentrações máximas aceitáveis para a via de inalação de vapores, mas cujo produto de degradação (o cloreto de vinila) apresenta elevada toxicidade para a mesma via de exposição.

No caso dos etanos clorados, os compostos mais tóxicos são o 1,2-dicloroetano e o 1,1,2-tricloroetano. O 1,1-dicloroetano também apresenta concentrações máximas aceitáveis mais restritivas do que as de substâncias que o precedem na linha de degradação. Assim, devem ser

avaliadas as contribuições das concentrações remanescentes dos isômeros de tricloroetano para um possível incremento futuro nas concentrações de 1,2-dicloroetano e 1,1-dicloroetano.

No caso dos metanos clorados, os compostos mais tóxicos são o tetracloreto de carbono e o clorofórmio. O cloreto de metila também apresenta concentrações máximas aceitáveis mais restritivas que as de compostos que o precedem na linha de degradação. Assim, devem ser avaliadas as contribuições das concentrações remanescentes de tetracloreto de carbono para um possível incremento futuro nas concentrações de clorofórmio, bem como das concentrações remanescentes de tetracloreto de carbono, clorofórmio e diclorometano para um possível incremento futuro nas concentrações de cloreto de metila.

Dentre os mecanismos de degradação possíveis de ocorrer naturalmente no ambiente subterrâneo, o que mais se destaca pela frequência e efetividade é a decloração redutiva. Neste processo, ocorre a substituição de um átomo de cloro por um átomo de hidrogênio na molécula do composto orgânico. Desta forma um mol de tetracloroeteno, por exemplo, produz um mol de tricloroeteno, e assim por diante ao longo de todo o restante da cadeia de decloração. Ou seja, considerando um sistema fechado, pode-se considerar que o número total de mols dos contaminantes de uma mesma família se conserva ao longo do processo, havendo apenas a transformação das moléculas mais oxidadas para as formas mais reduzidas. Assim, 01 mol do composto-pai oferece potencial para geração de 01 mol do composto-filho.

A partir das observações aqui levantadas, propõe-se uma avaliação dos cenários de contaminação com base no conceito de concentrações equivalentes, verificando, para cada substância química de interesse, a concentração equivalente de seu composto-filho mais tóxico com potencial para ser gerada a partir de processos de atenuação natural. Esta avaliação pode ser feita após o atingimento das metas de remediação, visando estabelecer critérios para a continuidade do monitoramento da área e uma métrica para o seu encerramento. Além disso, o conceito pode ser considerado desde o início do projeto de remediação, visando estabelecer metas de remediação alternativas, mais restritivas do que as definidas a partir das concentrações máximas aceitáveis, com o objetivo de encaminhar o caso para o encerramento do projeto sem o risco de que o cenário seja alterado no futuro. A mesma abordagem pode ser utilizada também para estabelecer metas de remediação para o 1,2-dicloroeteno-cis em cenários de inalação, tendo por base o risco potencial de geração de cloreto de vinila a partir deste composto.

A seguir, serão descritas as rotinas de cálculo propostas para avaliar o potencial de risco futuro, apoiando a tomada de decisão na fase de monitoramento para o encerramento, e para estabelecer metas de remediação alternativas para áreas contaminadas com solventes clorados alifáticos. Por fim, o uso destas rotinas será exemplificado através de sua aplicação em um caso hipotético.

6.1. Abordagem das concentrações equivalentes para avaliação do potencial de risco futuro

Uma vez atingidas as metas de remediação, sugere-se que as concentrações de solventes clorados remanescentes na área de estudo sejam convertidas em concentração equivalente dos compostos de maior toxicidade em cada família de contaminantes, através dos passos abaixo descritos. Cabe destacar que esta conversão deve ser feita de forma separada para cada meio físico (solo superficial, solo subsuperficial e água subterrânea), uma vez que estes resultados serão interpretados de forma separada.

- (a) PASSO 1: converter as concentrações remanescentes de cada substância química de interesse em concentração molal, de acordo com a Equação 3.

Equação 3 - Conversão da concentração remanescente em concentrações molal

$$C_M = \frac{C}{P.M.}$$

em que:

C_M = concentração molal $\frac{[mol]}{[Kg]}$

C = concentração¹ do contaminante $\frac{[mg]}{[Kg]}$

P.M. = peso molar do contaminante $\frac{[mg]}{[mol]}$

- (b) **PASSO 2:** em cada família de contaminantes e para cada meio físico, calcular as concentrações molais cumulativas até os compostos de maior toxicidade, somando a concentração molal do contaminante de interesse com as de todos os compostos que o precedem na cadeia de decloração redutiva (Equação 4). Isto resultará na concentração molal total com potencial de se transformar no produto de maior toxicidade, incluindo a própria concentração deste produto. Realizar este procedimento considerando os seguintes compostos como tendo maior toxicidade: cloreto de vinila e tricloroeteno, no caso dos etenos clorados; 1,1-dicloroetano e 1,2-dicloroetano, no caso dos etanos clorados; clorofórmio e cloreto de metila no caso dos metanos clorados.

Equação 4 – Cálculo das concentrações acumuladas, em molalidade

$$CC_X = \sum_{i=A}^X C_{M,i}$$

em que:

CC_X = concentração molal acumulada até o contaminante X $\frac{[mol]}{[Kg]}$

$C_{M,i}$ = concentração molal do composto $i \frac{[mol]}{[Kg]}$

A = composto-pai no grupo de contaminantes

X = composto de maior toxicidade no grupo de contaminantes

- (c) **PASSO 3:** converter as concentrações molais – individuais e acumuladas – calculadas nos passos 1 e 2, para concentrações equivalentes do composto de maior toxicidade, de acordo com a Equação 5. Realizar este procedimento considerando os seguintes compostos como tendo maior toxicidade: cloreto de vinila e tricloroeteno, no caso dos

¹ NOTA: para a conversão de concentrações em matriz aquosa, considera-se as unidades mg/Kg e mg/L como intercambiáveis. Parte-se da simplificação de que, para fins de cálculo, H₂O é predominante na amostra, considerando a relação de que 1 L de amostra terá massa aproximada de 1 Kg a 25 °C.

etenos clorados; 1,1-dicloroetano e 1,2-dicloroetano, no caso dos etanos clorados; clorofórmio e cloreto de metila no caso dos metanos clorados.

Equação 5 - Conversão de concentração molal em concentração equivalente do composto X

$$C_{EQ_X} = C_M \times P.M._X$$

em que:

C_{EQ_X} = concentração² equivalente do composto X $\frac{[mg_X]}{[Kg]}$

C_M = concentração molal $\frac{[mol]}{[Kg]}$

$P.M._X$ = peso molar do composto X $\frac{[mg]}{[mol]}$

(d) **PASSO 4:** para cada família de contaminantes, comparar as concentrações equivalentes dos compostos de maior toxicidade com as concentrações máximas aceitáveis para o mesmo composto, considerando as concentrações equivalentes individuais e acumuladas. Para comparação, devem ser utilizadas as concentrações máximas aceitáveis mais restritivas entre efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos, calculadas por meio das planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas sob investigação da CETESB, para cada unidade de exposição que tenha sido definida para o estudo de avaliação de risco à saúde humana.

Considera-se que enquanto as concentrações (individuais ou acumuladas) equivalentes aos compostos de maior toxicidade forem superiores às concentrações máximas aceitáveis do mesmo composto, existe potencial para risco³ futuro na área de estudo, sendo necessária a manutenção do monitoramento no objetivo de avaliar a tendência de transformação dos contaminantes remanescentes, o qual deve perdurar enquanto persistir este potencial de risco futuro.

² Idem

³ Pode-se, ainda, quantificar os riscos equivalentes, por meio da razão entre a concentração molal equivalente e a concentração máxima aceitável (molal) do contaminante de maior toxicidade.

6.2. Abordagem das concentrações equivalentes no estabelecimento de metas alternativas de remediação

De complementar aos procedimentos já reconhecidos para o estabelecimento de metas de remediação, a abordagem das concentrações equivalentes pode também ser utilizada para definir metas alternativas que, embora mais conservadoras, podem oferecer uma opção viável para evitar a continuidade do monitoramento por tempos prolongados. Além disso, o procedimento aqui sugerido também permite a determinação de metas de remediação preventivas para o 1,2-dicloroeteno-cis em cenários de inalação de vapores, com base nos riscos associados ao produto de sua degradação (cloreto de vinila), uma vez que esta via de ingresso não é contemplada no estabelecimento de metas de remediação para este composto, pelas metodologias tradicionais.

Inicialmente devem ser calculadas, para cada substância química de interesse, as concentrações máximas equivalentes ao composto de maior toxicidade, através dos passos descritos a seguir.

- (a) PASSO 1: calcular as concentrações máximas aceitáveis para cada substância química de interesse com o uso das planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas sob investigação da CETESB.
- (b) PASSO 2: para as substâncias de maior toxicidade de cada família de contaminantes, converter as concentrações máximas aceitáveis, calculadas no passo 1, em concentrações molais por meio da Equação 6. Devem ser consideradas as concentrações máximas aceitáveis mais restritivas entre efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos. Realizar este procedimento considerando os seguintes compostos de maior toxicidade: cloreto de vinila e tricloroeteno, no caso dos etenos clorados; 1,1-dicloroetano e 1,2-dicloroetano, no caso dos etanos clorados; clorofórmio e cloreto de metila no caso dos metanos clorados. A concentração máxima aceitável molal corresponde à máxima concentração de solventes clorados, em mol/Kg, que combinados equivalem à concentração máxima aceitável do contaminante de maior toxicidade.

Equação 6 - Conversão de concentração máxima aceitável em concentração molal

$$CMA_{M_X} = \frac{CMA}{P.M.}$$

em que:

CMA_{M_X} = concentração máxima aceitável molal equivalente ao composto X $\frac{[mol]}{[Kg]}$

CMA = concentração⁴ máxima aceitável do contaminante X $\frac{[mg]}{[Kg]}$

$P.M.$ = peso molar do contaminante X $\frac{[mg]}{[mol]}$

- (c) **PASSO 3:** para cada substância química de interesse (i), calcular a concentração máxima equivalente ao composto-filho de maior toxicidade (X), por meio da Equação 7. Realizar este procedimento considerando como compostos-filho de maior toxicidade os seguintes: cloreto de vinila e tricloroeteno, no caso dos etenos clorados; 1,1-dicloroetano e 1,2-dicloroetano, no caso dos etanos clorados; clorofórmio e cloreto de metila no caso dos metanos clorados.

Equação 7 – Cálculo da concentração máxima equivalente ao composto X

$$CMA_{EQ_X} = CMA_X \times P.M._i$$

em que:

CMA_{EQ_X} = concentração⁵ máxima aceitável equivalente ao composto X $\frac{[mg_X]}{[Kg]}$

CMA_X = concentração máxima aceitável (molal) do composto X $\frac{[mol]}{[Kg]}$

$P.M._i$ = peso molar da substância química de interesse $i \frac{[mg]}{[mol]}$

- (d) **PASSO 4:** avaliar as concentrações máxima aceitáveis equivalentes do composto de maior toxicidade, de forma integrada com as concentrações máximas aceitáveis em termos molais para a área de estudo, para o estabelecimento das metas de remediação alternativas.

Em alguns casos a concentração máxima aceitável equivalente poderá ser inferior à concentração máxima aceitável originalmente calculada. Isto pode ocorrer no caso de compostos que cujas características de toxicidade são mais restritivas do que a de algum dos produtos de sua degradação em determinado cenário. Portanto, após calcular as concentrações

⁴ NOTA: para a conversão de concentrações em matriz aquosa, considera-se as unidades mg/Kg e mg/L como intercambiáveis. Parte-se da simplificação de que, para fins de cálculo, H₂O é predominante na amostra, considerando a relação de que 1 L de amostra terá massa aproximada de 1 Kg a 25 °C.

⁵ Idem.

máximas aceitáveis equivalentes, estas devem ser comparadas com as concentrações máximas aceitáveis específicas do próprio contaminante, sendo adotada sempre a mais restritiva.

É importante observar, ainda, que mesmo que todas as concentrações máximas equivalentes individuais para cada substância química de interesse sejam atendidas, o efeito cumulativo das concentrações remanescentes deve ser considerado. Dessa forma, após estabelecidas as concentrações máximas equivalentes aos compostos de maior toxicidade, deve ser realizada a avaliação do potencial para risco futuro conforme os passos já descritos no item 6.1.

Sugere-se que sejam estabelecidas metas de remediação alternativas inferiores às concentrações máximas mais restritivas, que simultaneamente atendam ao critério das concentrações cumulativas. Em outras palavras, as concentrações acumuladas equivalentes aos compostos de maior toxicidade, relativas às metas de remediação estabelecidas, devem ser inferiores à concentração máxima mais restritiva para o mesmo composto.

6.3. Exemplo de aplicação

Para fins ilustrativos, apresentamos a seguir um exemplo da aplicação desta proposta de avaliação de risco considerando o potencial de transformação das massas de contaminantes remanescentes em produtos com maior toxicidade.

Imaginemos uma área de estudo hipotética contaminada por solventes clorados alifáticos, para a qual tenham sido definidas as concentrações máximas aceitáveis calculadas no capítulo 5 desta monografia, e após decorrido o período de monitoramento estabelecido pelo órgão ambiental, as concentrações remanescentes na área de estudo sejam as descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Concentrações máximas aceitáveis mais restritivas e concentrações após remediação em exemplo hipotético

| CONTAMINANTE | SOLO SUPERFICIAL (mg/kg) | | SOLO SUBSUPERFICIAL (mg/kg) | | ÁGUA SUBTERRÂNEA (mg/L) | |
|-------------------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| | CMA* | CONC. NA ÁREA | CMA* | CONC. NA ÁREA | CMA* | CONC. NA ÁREA |
| Etenos clorados | | | | | | |
| Tetracloroeteno | 1,21E+04 | 1,00E+02 | 2,63E+01 | 1,00E+00 | 2,05E+01 | 1,00E+00 |
| Tricloroeteno | 1,01E+03 | 1,00E+01 | 1,32E+00 | 1,00E-01 | 1,29E+00 | 1,00E-01 |
| 1,1-dicloroeteno | 1,01E+05 | 1,00E+01 | 1,32E+02 | 1,00E+00 | 4,37E+01 | 1,00E+00 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 4,03E+03 | 1,00E+02 | - | 1,00E+02 | - | 1,00E+01 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 4,03E+04 | 1,00E+01 | 2,63E+01 | 1,00E+00 | 2,15E+01 | 1,00E+00 |
| Cloreto de vinila | 8,78E+01 | 1,00E-01 | 4,69E+00 | 1,00E-01 | 1,19E+00 | 1,00E-01 |
| Etanos clorados | | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 4,03E+06 | 1,00E+03 | 3,29E+03 | 1,00E+00 | 2,10E+03 | 1,00E+01 |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,11E+03 | 1,00E+01 | 2,53E-01 | 1,00E-01 | 1,07E+00 | 1,00E-01 |
| 1,1-dicloroetano | 1,11E+04 | 1,00E+02 | 1,29E+01 | 1,00E+00 | 1,71E+01 | 1,00E+00 |
| 1,2-dicloroetano | 6,94E+02 | 1,00E+01 | 7,93E-01 | 1,00E-01 | 3,75E+00 | 1,00E-01 |
| Cloreto de etila | - | 1,00E+00 | 6,58E+03 | 1,00E+00 | 3,99E+03 | 1,00E-01 |
| Metanos clorados | | | | | | |
| Tetracloro de carbono | 9,03E+02 | 1,00E+01 | 3,44E+00 | 1,00E+00 | 1,60E+00 | 1,00E-01 |
| Clorofórmio | 2,04E+03 | 1,00E-01 | 8,97E-01 | 1,00E-01 | 1,80E+00 | 1,00E-01 |
| Diclorometano | 1,21E+04 | 1,00E+01 | 3,95E+02 | 1,00E+00 | 6,89E+02 | 1,00E+02 |
| Cloreto de metila | - | 1,00E+00 | 5,92E+01 | 1,00E+00 | 3,68E+01 | 1,00E+00 |

CMA* = concentração máxima aceitável mais restritiva para a substância, considerando efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos | CONC. = concentração | Fonte: dados calculados com o uso das Planilhas para Avaliação de Risco da CETESB.

Como é possível observar, todas as concentrações encontradas na área de estudo hipotética se encontram abaixo das concentrações máximas aceitáveis. Destacam-se os casos do 1,2-dicloroeteno-cis, do cloreto de metila e do cloreto de etila, para os quais não há concentração máxima aceitável definida em alguns cenários de exposição.

Inserindo estas concentrações remanescentes na mesma planilha para avaliação de risco utilizada para o cálculo das concentrações máximas aceitáveis, é possível calcular os riscos individuais para cada contaminante e os riscos cumulativos por substância química de interesse e por cenário. A Tabela 6 sintetiza os resultados obtidos. As planilhas completas preenchidas com os dados de entrada e resultados deste exemplo hipotético são apresentadas no Apêndice B.

Tabela 6 – Riscos individuais e cumulativos em exemplo hipotético

| CONTAMINANTE | EFEITO | RISCO ASSOCIADO À CONTAMINAÇÃO EM SOLO | | | RISCO ASSOCIADO À CONTAMINAÇÃO EM ÁGUA SUBTERRÂNEA | |
|-------------------------------------|--------|--|---------------------|--------------------|--|--------------------|
| | | Individual | Individual | Cumulativo por SQI | Individual | Cumulativo por SQI |
| | | Ingestão solo superficial | Inalação de vapores | | Inalação de vapores | |
| Etenos clorados | | | | | | |
| Tetracloroeteno | C | 3,32E-08 | 1,26E-07 | 1,59E-07 | 1,62E-07 | 1,62E-07 |
| | NC | 8,27E-03 | 3,80E-02 | 4,63E-02 | 4,89E-02 | 4,89E-02 |
| Tricloroeteno | C | 7,28E-08 | 1,99E-07 | 2,72E-07 | 2,03E-07 | 2,03E-07 |
| | NC | 9,93E-03 | 7,60E-02 | 8,59E-02 | 7,76E-02 | 7,76E-02 |
| 1,1-dicloroeteno | C | - | - | - | - | - |
| | NC | 9,93E-05 | 7,60E-03 | 7,70E-03 | 2,29E-02 | 2,29E-02 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | C | - | - | - | - | - |
| | NC | 2,48E-02 | - | 2,48E-02 | - | - |
| 1,2-dicloroeteno-trans | C | - | - | - | - | - |
| | NC | 2,48E-04 | 3,80E-02 | 3,83E-02 | 4,64E-02 | 4,64E-02 |
| Cloreto de vinila | C | 1,14E-08 | 2,13E-07 | 2,25E-07 | 8,38E-07 | 8,38E-07 |
| | NC | 1,65E-05 | 1,52E-03 | 1,54E-03 | 5,97E-03 | 5,97E-03 |
| Etanos clorados | | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | C | - | - | - | - | - |
| | NC | 2,48E-04 | 3,04E-04 | 5,52E-04 | 4,76E-03 | 4,76E-03 |
| 1,1,2-tricloroetano | C | 9,02E-08 | 4,03E-07 | 4,93E-07 | 9,54E-08 | 9,54E-08 |
| | NC | 1,24E-03 | 3,95E-01 | 3,96E-01 | 9,35E-02 | 9,35E-02 |
| 1,1-dicloroetano | C | 9,02E-08 | 7,76E-07 | 8,66E-07 | 5,86E-07 | 5,86E-07 |
| | NC | 2,48E-04 | - | 2,48E-04 | - | - |
| 1,2-dicloroetano | C | 1,44E-07 | 1,26E-06 | 1,40E-06 | 2,67E-07 | 2,67E-07 |
| | NC | 8,27E-04 | 2,17E-02 | 2,25E-02 | 4,60E-03 | 4,60E-03 |
| Cloreto de etila | C | - | - | - | - | - |
| | NC | - | 1,52E-04 | 1,52E-04 | 2,51E-05 | 2,51E-05 |
| Metanos clorados | | | | | | |
| Tetracloro de carbono | C | 1,11E-07 | 2,91E-06 | 3,02E-06 | 6,25E-07 | 6,25E-07 |
| | NC | 1,24E-03 | 1,52E-02 | 1,64E-02 | 3,27E-03 | 3,27E-03 |
| Clorofórmio | C | 4,91E-10 | 1,12E-06 | 1,12E-06 | 5,55E-07 | 5,55E-07 |
| | NC | 4,96E-06 | 1,55E-03 | 1,56E-03 | 7,73E-04 | 7,73E-04 |
| Diclorometano | C | 3,17E-09 | 4,85E-09 | 8,01E-09 | 2,78E-07 | 2,78E-07 |
| | NC | 8,27E-04 | 2,53E-03 | 3,36E-03 | 1,45E-01 | 1,45E-01 |
| Cloreto de metila | C | - | - | - | - | - |
| | NC | - | 1,69E-02 | 1,69E-02 | 2,71E-02 | 2,71E-02 |
| RISCO CUMULATIVO POR CENÁRIO | C | 5,56E-07 | 7,01E-06 | | 3,61E-06 | |
| | NC | 4,80E-02 | 6,15E-01 | | 4,81E-01 | |

Fonte: dados calculados com o uso das Planilhas para Avaliação de Risco da CETESB

Todos os riscos para efeitos carcinogênicos foram inferiores a 1×10^{-5} e todos os riscos para efeitos não carcinogênicos foram inferiores a 1. Dessa forma, de acordo com as diretrizes da Resolução CONAMA nº 420/2009, os riscos individuais, riscos cumulativos por cenário e riscos cumulativos por substância são considerados toleráveis, e esta área hipotética poderia ser encaminhada para o monitoramento para encerramento ou declarada como reabilitada para uso declarado uma vez transcorrido o período de monitoramento. Contudo, convém avaliar se as concentrações de compostos-pai que permanecem na área oferecem potencial para, futuramente, elevar as concentrações dos compostos-filho até a níveis que excedam os níveis de risco tolerável à saúde humana.

Seguindo os passos descritos no item 6.1, e utilizando os pesos molares descritos na Tabela 1 no item 4.2.1, é possível calcular as concentrações molais remanescentes de cada contaminante em cada compartimento ambiental. Em seguida, calculam-se as concentrações molais cumulativas, somando-se as concentrações molais de cada composto-pai com as dos produtos de sua degradação. Por fim, é feita a conversão das concentrações molais, individuais e cumulativas, em concentrações equivalentes dos compostos de maior toxicidade, através da multiplicação da concentração molal pelo peso molar do contaminante equivalente. No caso dos etenos clorados, por exemplo, calculam-se as concentrações equivalentes de tricloroeteno (multiplicando-se a concentração molal do tetracloroeteno – seu composto-pai – pelo peso molar do tricloroeteno, e a concentração molal cumulativa até tricloroeteno pelo seu peso molar) e as concentrações equivalentes de cloreto de vinila (multiplicando-se as concentrações molais de seus compostos-pai – tetracloroeteno, tricloroeteno e cada dicloroeteno – pelo peso molar do cloreto de vinila, e a concentração cumulativa até cloreto de vinila pelo seu peso molar). Adotando o mesmo raciocínio, calculam-se as concentrações equivalentes de 1,1-dicloroetano e 1,2-dicloroetano, utilizando os pesos molares destes contaminantes e as relações de declaração dos etanos clorados, e as concentrações equivalentes de clorofórmio e cloreto de metila, utilizando os pesos molares destes contaminantes e as relações de declaração dos metanos clorados.

Os cálculos foram executados por meio do software Microsoft Excel em sua versão Microsoft Office Home and Student 2013, utilizando uma planilha previamente programada pela autora para execução das equações apresentadas no item 6.1. Foram utilizadas funções matemáticas combinadas com funções condicionais e funções de texto, no objetivo de automatizar os cálculos minimizando a possibilidade de erro humano na sua

execução. Também foi utilizada a ferramenta de formatação condicional no objetivo de auxiliar a interpretação dos resultados.

As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam os resultados para etenos clorados, etanos clorados e metanos clorados, respectivamente. São apresentados:

- (a) a concentração remanescente de cada contaminante, em mg/Kg ou mg/L (C);
- (b) a concentração remanescente de cada contaminante, convertida em concentração molal (C_M);
- (c) a concentração remanescente de cada contaminante, convertida em concentração equivalente do composto de maior toxicidade (CC_{EQ_xx});
- (d) as concentrações remanescentes cumulativas, compostas pela soma das concentrações molais de cada contaminante com as concentrações molais de seus compostos-pai (CC_x);
- (e) as concentrações remanescentes cumulativas, convertidas em concentração equivalente do composto de maior toxicidade, em mg/Kg ou mg/L (CC_{EQ_xx});
- (f) as concentrações máximas aceitáveis dos contaminantes de maior toxicidade, em mg/Kg ou mg/L (CMA);
- (g) a interpretação da comparação entre as concentrações equivalentes e as concentrações máximas aceitáveis.

Pode-se observar que, embora todas as concentrações remanescentes atendam às metas de remediação, por serem inferiores às concentrações máximas aceitáveis de cada contaminante e terem risco cumulativo aceitável em todos os cenários, existe um potencial para que, no futuro, a área volte a oferecer condições de risco à saúde humana. Ao avaliarmos o caso em termos de concentrações equivalentes percebemos que as concentrações de contaminantes remanescentes na área, caso venham a se converter no produto de maior toxicidade, poderão elevar a massa deste produto até a níveis superiores aos respectivos limites de risco. Ainda que este seja um cenário conservador, permanece sendo um cenário potencial que precisa, no mínimo, ser avaliado ao longo do tempo.

Tabela 7 – Avaliação do potencial para risco futuro das concentrações remanescentes em exemplo hipotético: etenos clorados

| COMPOSTO | SOLO SUPERFICIAL – CENÁRIO DE INGESTÃO | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
|--|--|----------------|---------------------|--------------------|-----------------|----------------------|---------------------|----------|-------------------------------------|--|--|
| | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_TCE} | C _{EQ_CV} | CC _X | C _{CEQ_TCE} | C _{CEQ_CV} | mg/Kg | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mgtce/Kg | mgcv/Kg | mol/Kg | mgtce/Kg | mgcv/Kg | mg/Kg | | | |
| Tetracloroeteno | 1,00E+02 | 5,88E-04 | 7,65E+01 | 3,65E+01 | 5,88E-04 | 7,65E+01 | 3,65E+01 | - | NÃO | | |
| Tricloroeteno | 1,00E+01 | 7,69E-05 | 1,00E+01 | 4,77E+00 | 6,65E-04 | 8,65E+01 | 4,12E+01 | 1,01E+03 | NÃO | | |
| 1,1-dicloroeteno | 1,00E+01 | 1,03E-04 | NÃO SE APLICA | 6,39E+00 | 7,68E-04 | NÃO SE APLICA | 4,76E+01 | - | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 1,00E+02 | 1,03E-03 | NÃO SE APLICA | 6,39E+01 | 1,70E-03 | NÃO SE APLICA | 1,05E+02 | - | SIM | | |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 1,00E+01 | 1,03E-04 | NÃO SE APLICA | 6,39E+00 | 7,68E-04 | NÃO SE APLICA | 4,76E+01 | - | NÃO | | |
| Cloreto de vinila | 1,00E-01 | 1,61E-06 | NÃO SE APLICA | 1,00E-01 | 1,90E-03 | NÃO SE APLICA | 1,18E+02 | 8,78E+01 | SIM | | |
| SOLO SUBSUPERFICIAL - CENÁRIO DE INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_TCE} | C _{EQ_CV} | CC _X | C _{CEQ_TCE} | C _{CEQ_CV} | mg/Kg | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mgtce/Kg | mgcv/Kg | mol/Kg | mgtce/Kg | mgcv/Kg | mg/Kg | | | |
| Tetracloroeteno | 1,00E+00 | 5,88E-06 | 7,65E-01 | 3,65E-01 | 5,88E-06 | 7,65E-01 | 3,65E-01 | - | NÃO | | |
| Tricloroeteno | 1,00E-01 | 7,69E-07 | 1,00E-01 | 4,77E-02 | 6,65E-06 | 8,65E-01 | 4,12E-01 | 1,32E+00 | NÃO | | |
| 1,1-dicloroeteno | 1,00E+00 | 1,03E-05 | NÃO SE APLICA | 6,39E-01 | 1,70E-05 | NÃO SE APLICA | 1,05E+00 | - | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 1,00E+02 | 1,03E-03 | NÃO SE APLICA | 6,39E+01 | 1,04E-03 | NÃO SE APLICA | 6,43E+01 | - | SIM | | |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 1,00E+00 | 1,03E-05 | NÃO SE APLICA | 6,39E-01 | 1,70E-05 | NÃO SE APLICA | 1,05E+00 | - | NÃO | | |
| Cloreto de vinila | 1,00E-01 | 1,61E-06 | NÃO SE APLICA | 1,00E-01 | 1,06E-03 | NÃO SE APLICA | 6,57E+01 | 4,69E+00 | SIM | | |
| ÁGUA SUBTERRÂNEA – CENÁRIO DE INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_TCE} | C _{EQ_CV} | CC _X | C _{CEQ_TCE} | C _{CEQ_CV} | mg/L | | | |
| | mg/L | mol/Kg | mgtce/L | mgcv/L | mol/Kg | mgtce/L | mgcv/L | mg/L | | | |
| Tetracloroeteno | 1,00E+00 | 5,88E-06 | 7,65E-01 | 3,65E-01 | 5,88E-06 | 7,65E-01 | 3,65E-01 | - | NÃO | | |
| Tricloroeteno | 1,00E-01 | 7,69E-07 | 1,00E-01 | 4,77E-02 | 6,65E-06 | 8,65E-01 | 4,12E-01 | 4,93E+00 | NÃO | | |
| 1,1-dicloroeteno | 1,00E+00 | 1,03E-05 | NÃO SE APLICA | 6,39E-01 | 1,70E-05 | NÃO SE APLICA | 1,05E+00 | - | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 1,00E+01 | 1,03E-04 | NÃO SE APLICA | 6,39E+00 | 1,10E-04 | NÃO SE APLICA | 6,80E+00 | - | SIM | | |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 1,00E+00 | 1,03E-05 | NÃO SE APLICA | 6,39E-01 | 1,70E-05 | NÃO SE APLICA | 1,05E+00 | - | NÃO | | |
| Cloreto de vinila | 1,00E-01 | 1,61E-06 | NÃO SE APLICA | 1,00E-01 | 1,32E-04 | NÃO SE APLICA | 8,18E+00 | 1,19E+00 | SIM | | |

CMA = concentração máxima aceitável | C = concentração de contaminante remanescente na área de estudo | C_M = concentração molal | CC_X = concentração cumulativa |

EQ_TCE = equivalente de tricloroeteno | EQ_CV = equivalente de cloreto de | Destaque em vermelho: concentrações com potencial para elevar o risco de produtos da degradação além dos limites de risco | Células em bege = dados de entrada na planilha programada

Fonte: Dados calculados por meio de planilha desenvolvida pela autora

Tabela 8 – Avaliação do potencial para risco futuro das concentrações remanescentes em exemplo hipotético: etanos clorados

| COMPOSTO | SOLO SUPERFICIAL – CENÁRIO DE INGESTÃO | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
|--|--|----------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------|-------------------------------------|--|--|
| | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_1,1-DCA} | C _{EQ_1,2-DCA} | CC _x | C _{CEQ_1,1-DCA} | C _{CEQ_1,2-DCA} | mg/Kg | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mg/Kg | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 1,00E+03 | 7,69E-03 | 7,62E+02 | 7,62E+02 | 7,69E-03 | 7,62E+02 | 7,62E+02 | - | SIM | | |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,00E+01 | 7,69E-05 | 7,62E+00 | 7,62E+00 | 7,69E-05 | 7,62E+00 | 7,62E+00 | - | NAO | | |
| 1,1-dicloroetano | 1,00E+02 | 1,01E-03 | 1,00E+02 | NÃO SE APLICA | 8,78E-03 | 8,69E+02 | NÃO SE APLICA | 1,11E+04 | NAO | | |
| 1,2-dicloroetano | 1,00E+01 | 1,01E-04 | NÃO SE APLICA | 1,00E+01 | 7,87E-03 | NÃO SE APLICA | 7,79E+02 | 6,94E+02 | SIM | | |
| Cloreto de etila | 1,00E+00 | 1,54E-05 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | 8,90E-03 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | - | NAO | | |
| SOLO SUBSUPERFICIAL - CENÁRIO DE INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_1,1-DCA} | C _{EQ_1,2-DCA} | CC _x | C _{CEQ_1,1-DCA} | C _{CEQ_1,2-DCA} | mg/Kg | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mg/Kg | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 1,00E+00 | 7,69E-06 | 7,62E-01 | 7,62E-01 | 7,69E-06 | 7,62E-01 | 7,62E-01 | - | NAO | | |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,00E-01 | 7,69E-07 | 7,62E-02 | 7,62E-02 | 7,69E-07 | 7,62E-02 | 7,62E-02 | - | NAO | | |
| 1,1-dicloroetano | 1,00E+00 | 1,01E-05 | 1,00E+00 | NÃO SE APLICA | 1,86E-05 | 1,84E+00 | NÃO SE APLICA | 1,29E+01 | NAO | | |
| 1,2-dicloroetano | 1,00E-01 | 1,01E-06 | NÃO SE APLICA | 1,00E-01 | 9,47E-06 | NÃO SE APLICA | 9,38E-01 | 7,93E-01 | SIM | | |
| Cloreto de etila | 1,00E+00 | 1,54E-05 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | 3,50E-05 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | - | NAO | | |
| ÁGUA SUBTERRÂNEA – CENÁRIO DE INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_1,1-DCA} | C _{EQ_1,2-DCA} | CC _x | C _{CEQ_1,1-DCA} | C _{CEQ_1,2-DCA} | mg/L | | | |
| | mg/L | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /L | mg _{1,2-DCA} /L | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /L | mg _{1,2-DCA} /L | mg/L | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 1,00E+01 | 7,69E-05 | 7,62E+00 | 7,62E+00 | 7,69E-05 | 7,62E+00 | 7,62E+00 | - | SIM | | |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,00E-01 | 7,69E-07 | 7,62E-02 | 7,62E-02 | 7,69E-07 | 7,62E-02 | 7,62E-02 | - | NAO | | |
| 1,1-dicloroetano | 1,00E+00 | 1,01E-05 | 1,00E+00 | NÃO SE APLICA | 8,78E-05 | 8,69E+00 | NÃO SE APLICA | 1,71E+01 | NAO | | |
| 1,2-dicloroetano | 1,00E-01 | 1,01E-06 | NÃO SE APLICA | 1,00E-01 | 7,87E-05 | NÃO SE APLICA | 7,79E+00 | 3,75E+00 | SIM | | |
| Cloreto de etila | 1,00E-01 | 1,54E-06 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | 9,03E-05 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | - | NAO | | |

CMA = concentração máxima aceitável | C = concentração de contaminante remanescentes na área de estudo | C_M = concentração molal | CC_x = concentração cumulativa | EQ_{1,1-DCA} = equivalente de 1,1-dicloroetano | EQ_{1,2-DCA} = equivalente de 1,2-dicloroetano | Destaque em vermelho: concentrações com potencial para elevar o risco de produtos da degradação além dos limites de risco | Células em bege = dados de entrada na planilha programada

Fonte: Dados calculados por meio de planilha desenvolvida pela autora

Tabela 9 – Avaliação do potencial para risco futuro das concentrações remanescentes em exemplo hipotético: metanos clorados

| COMPOSTO | SOLO SUPERFICIAL – CENÁRIO DE INGESTÃO | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
|--|--|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------|-------------------------------------|--|--|
| | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| COMPOSTO | C mg/Kg | C _M mol/Kg | C _{EQ_TCM} mgTCM/Kg | C _{EQ_CM} mgCM/Kg | CC _X mol/Kg | C _{CEQ_TCM} mgTCM/Kg | C _{CEQ_CM} mgCM/Kg | mg/L | | | |
| Tetracloreto de carbono | 1,00E+01 | 6,67E-05 | 8,00E+00 | 3,33E+00 | 6,67E-05 | 8,00E+00 | 3,33E+00 | - | NÃO | | |
| Clorofórmio | 1,00E-01 | 8,33E-07 | 1,00E-01 | 4,17E-02 | 6,75E-05 | 8,10E+00 | 3,38E+00 | 2,04E+03 | NÃO | | |
| Diclorometano | 1,00E+01 | 1,18E-04 | NÃO SE APLICA | 5,88E+00 | 1,85E-04 | NÃO SE APLICA | 9,26E+00 | - | NÃO | | |
| Cloreto de metila | 1,00E+00 | 2,00E-05 | NÃO SE APLICA | 1,00E+00 | 2,05E-04 | NÃO SE APLICA | 1,03E+01 | - | NÃO | | |
| SOLO SUBSUPERFICIAL - CENÁRIO DE INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C mg/Kg | C _M mol/Kg | C _{EQ_TCM} mgTCM/Kg | C _{EQ_CM} mgCM/Kg | CC _X mol/Kg | C _{CEQ_TCM} mgTCM/Kg | C _{CEQ_CM} mgCM/Kg | mg/L | | | |
| Tetracloreto de carbono | 1,00E+00 | 6,67E-06 | 8,00E-01 | 3,33E-01 | 6,67E-06 | 8,00E-01 | 3,33E-01 | - | NÃO | | |
| Clorofórmio | 1,00E-01 | 8,33E-07 | 1,00E-01 | 4,17E-02 | 7,50E-06 | 9,00E-01 | 3,75E-01 | 8,97E-01 | SIM | | |
| Diclorometano | 1,00E+00 | 1,18E-05 | NÃO SE APLICA | 5,88E-01 | 1,93E-05 | NÃO SE APLICA | 9,63E-01 | - | NÃO | | |
| Cloreto de metila | 1,00E+00 | 2,00E-05 | NÃO SE APLICA | 1,00E+00 | 3,93E-05 | NÃO SE APLICA | 1,96E+00 | 5,92E+01 | NÃO | | |
| ÁGUA SUBTERRÂNEA – CENÁRIO DE INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C mg/L | C _M mol/Kg | C _{EQ_TCM} mgTCM/L | C _{EQ_CM} mgCM/L | CC _X mol/Kg | C _{CEQ_TCM} mgTCM/L | C _{CEQ_CM} mgCM/L | mg/L | | | |
| Tetracloreto de carbono | 1,00E-01 | 6,67E-07 | 8,00E-02 | 3,33E-02 | 6,67E-07 | 8,00E-02 | 3,33E-02 | - | NÃO | | |
| Clorofórmio | 1,00E-01 | 8,33E-07 | 1,00E-01 | 4,17E-02 | 1,50E-06 | 1,80E-01 | 7,50E-02 | 1,80E+00 | NÃO | | |
| Diclorometano | 1,00E+02 | 1,18E-03 | NÃO SE APLICA | 5,88E+01 | 1,18E-03 | NÃO SE APLICA | 5,89E+01 | - | SIM | | |
| Cloreto de metila | 1,00E+00 | 2,00E-05 | NÃO SE APLICA | 1,00E+00 | 1,20E-03 | NÃO SE APLICA | 5,99E+01 | 3,68E+01 | SIM | | |

CMA = concentração máxima aceitável | C = concentração de contaminante remanescentes na área de estudo | C_M = concentração molal | CC = concentração cumulativa | EQ_TCM = equivalente de clorofórmio | EQ_CM = equivalente de cloreto de metila | Destaque em vermelho: concentrações com potencial para elevar o risco de produtos da degradação além dos limites de risco | Células em bege = dados de entrada na planilha programada

Fonte: Dados calculados por meio de planilha desenvolvida pela autora

No caso dos etenos clorados, as concentrações acumuladas equivalentes de cloreto de vinila excedem a concentração máxima aceitável de cloreto de vinila em todos os cenários. Ou seja, caso as concentrações remanescentes de etenos clorados venham a se transformar, por decloração redutiva, em cloreto de vinila, a massa deste contaminante resultante dos processos de degradação poderá exceder os limites de risco à saúde humana.

O mesmo acontece no caso dos etanos clorados com as concentrações acumuladas equivalentes a 1,2-dicloroetano. Cabe destacar que, no caso dos etanos clorados, a concentração individual de 1,1,1-tricloroetano, quando avaliada em termos de equivalente de 1,2-dicloroetano, já oferece um potencial para risco futuro. Ou seja, mesmo desconsiderando os demais etanos clorados presentes na área, se apenas a massa remanescente de 1,1,1-tricloroetano se transformar em 1,2-dicloroetano, a massa resultante já poderá exceder os limites de risco à saúde humana. Assim, esta abordagem permite verificar que as concentrações residuais de 1,1,1-tricloroetano, mesmo atendendo às metas de remediação, são ainda bastante expressivas quando avaliadas no seu potencial para risco futuro.

Em relação aos metanos clorados, observa-se que as concentrações equivalentes de clorofórmio e de cloreto de metila excedem as concentrações máximas aceitáveis para estes compostos em cenários de inalação de vapores em ambiente fechado. Neste caso, observa-se que a concentração individual de diclorometano, quando avaliada em termos de equivalente de cloreto de metila, excede a concentração máxima aceitável para este contaminante, evidenciando que o diclorometano tem contribuição expressiva para a potencial elevação futura do risco relacionado às concentrações de cloreto de metila.

Neste exemplo hipotético, portanto, os cálculos indicam a necessidade de manter o monitoramento da área, de forma a acompanhar qualquer mudança futura nas condições de equilíbrio químico que possa levar a uma situação de elevação do risco potencial à saúde humana e à necessidade de novas ações de intervenção.

De maneira complementar, podem ser estabelecidas metas de remediação mais restritivas considerando este cenário conservador, como medida de precaução, por meio dos passos descritos no item 6.2 desta monografia. Assim, abre-se a possibilidade para o encerramento do caso sem a necessidade de continuidade do monitoramento no que diz respeito à possibilidade de transformação dos contaminantes remanescentes em seus produtos de degradação mais tóxicos.

Partindo das concentrações máximas aceitáveis já calculadas para este exemplo (Tabela 5), e dos pesos molares descritos na Tabela 1 no item 4.2.1, calculam-se as concentrações molais máximas aceitáveis para os compostos de maior toxicidade. Em seguida, multiplicam-se estas concentrações pelos pesos molares de cada substância química de interesse, no objetivo de obter, para cada contaminante, a concentração máxima aceitável equivalente dos compostos de maior toxicidade.

Assim como na etapa anterior, os cálculos foram executados por meio do software Microsoft Excel em sua versão Microsoft Office Home and Student 2013, utilizando uma planilha previamente programada pela autora para execução das equações apresentadas no item 6.2. Foram utilizadas funções matemáticas combinadas com funções condicionais e funções de texto no objetivo de automatizar os cálculos, minimizando a possibilidade de erro humano na sua execução. As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam os resultados para etenos clorados, etanos clorados e metanos clorados, respectivamente.

A partir destes resultados, é possível verificar, dentre as concentrações máximas aceitáveis equivalentes, qual a mais restritiva para cada cenário.

No caso dos etenos clorados, no cenário de ingestão de solo superficial, as concentrações máximas equivalentes ao cloreto de vinila foram mais restritivas do que as concentrações máximas equivalentes ao tricloroeteno, para todas as substâncias. Já nos cenários de inalação de vapores, as concentrações máximas equivalentes ao tricloroeteno foram mais restritivas do que as equivalentes ao cloreto de vinila, no que diz respeito ao tetracloroeteno. Esta diferenciação é coerente com a relação entre as concentrações máximas aceitáveis do tricloroeteno e do cloreto de vinila em cada cenário de exposição avaliado. Contudo, pelo fato de o tricloroeteno ser também um composto-pai na linha de degradação, a concentração máxima equivalente ao tricloroeteno não se aplica na avaliação das concentrações de dicloroetenos e cloreto de vinila. Portanto, em cenários de inalação, a concentração equivalente ao cloreto de vinila deve ser também considerada.

Tabela 10 – Concentrações máximas aceitáveis equivalentes aos compostos de maior toxicidade em exemplo hipotético: etenos clorados

| COMPOSTO | SOLO SUPERFICIAL - INGESTÃO | | | | |
|---|-------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|
| | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE TCE | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE CV |
| | CMA (mg/Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_TCE} (mg _{TCE} /Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_CV} (mg _{CV} /Kg) |
| Tetracloroeteno | - | | 1,32E+03 | | 2,41E+02 |
| Tricloroeteno | 1,01E+03 | | 1,01E+03 | | 1,84E+02 |
| 1,1-dicloroeteno | - | 7,77E-03 | NÃO SE APLICA | 1,42E-03 | 1,37E+02 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | - | | NÃO SE APLICA | | 1,37E+02 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | - | | NÃO SE APLICA | | 1,37E+02 |
| Cloreto de vinila | 8,78E+01 | | NÃO SE APLICA | | 8,78E+01 |
| SOLO SUBSUPERFICIAL - INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE TCE | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE CV |
| | CMA (mg/Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_TCE} (mg _{TCE} /Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_CV} (mg _{CV} /Kg) |
| | Tetracloroeteno | - | 1,73E+00 | | 1,29E+01 |
| Tricloroeteno | 1,32E+00 | | 1,32E+00 | | 9,83E+00 |
| 1,1-dicloroeteno | - | 1,02E-05 | NÃO SE APLICA | 7,56E-05 | 7,34E+00 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | - | | NÃO SE APLICA | | 7,34E+00 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | - | | NÃO SE APLICA | | 7,34E+00 |
| Cloreto de vinila | 4,69E+00 | | NÃO SE APLICA | | 4,69E+00 |
| ÁGUA SUBTERRÂNEA - INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE TCE | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE CV |
| | CMA (mg/L) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_TCE} (mg _{TCE} /L) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_CV} (mg _{CV} /L) |
| | Tetracloroeteno | - | 1,69E+00 | | 3,26E+00 |
| Tricloroeteno | 1,29E+00 | | 1,29E+00 | | 2,50E+00 |
| 1,1-dicloroeteno | - | 9,92E-06 | NÃO SE APLICA | 1,92E-05 | 1,86E+00 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | - | | NÃO SE APLICA | | 1,86E+00 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | - | | NÃO SE APLICA | | 1,86E+00 |
| Cloreto de vinila | 1,19E+00 | | NÃO SE APLICA | | 1,19E+00 |

CMA = concentração máxima aceitável | M = molar | EQ_TCE = equivalente de tricloroeteno | EQ_CV = equivalente de cloreto de vinila | Células em bege = dados de entrada na planilha programada

Fonte: Dados calculados por meio de planilha desenvolvida pela autora

No caso dos etenos clorados, as concentrações máximas equivalentes ao 1,2-dicloroetano foram mais restritivas do que as equivalentes ao 1,1-dicloroetano, para todas as substâncias, nos três cenários avaliados.

No caso dos metanos clorados, as concentrações máximas equivalentes ao triclorometano foram mais restritivas do que as equivalentes ao cloreto de metila, no que diz respeito ao tetracloreto de carbono, em todos os cenários avaliados. Contudo, por ser o triclorometano também um composto-pai na linha de degradação, a concentração máxima equivalente a este composto não se aplica na avaliação das concentrações de dicloroetano e cloreto de metila, de forma que para estas substâncias a concentração máxima equivalente ao cloreto de metila deve ser também considerada.

Tabela 11 – Concentrações máximas aceitáveis equivalentes aos compostos de maior toxicidade em exemplo hipotético: etanos clorados

| COMPOSTO | SOLO SUPERFICIAL - INGESTÃO | | | | |
|---|-------------------------------|---|--|---|--|
| | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE 1,1-DCA | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE 1,2-DCA | |
| | CMA (mg/Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_1,1-DCA} (mg _{1,1-DCA} /Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_1,2-DCA} (mg _{1,2-DCA} /Kg) |
| 1,1,1-tricloroetano | - | | 1,46E+04 | | 9,11E+02 |
| 1,1,2-tricloroetano | - | | 1,46E+04 | | 9,11E+02 |
| 1,1-dicloroetano | 1,11E+04 | 1,12E-01 | 1,11E+04 | 7,01E-03 | NÃO SE APLICA |
| 1,2-dicloroetano | 6,94E+02 | | NÃO SE APLICA | | 6,94E+02 |
| Cloreto de etila | - | | NÃO SE APLICA | | NÃO SE APLICA |
| SOLO SUBSUPERFICIAL - INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE 1,1-DCA | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE 1,2-DCA | |
| | CMA (mg/Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_1,1-DCA} (mg _{1,1-DCA} /Kg) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_1,2-DCA} (mg _{1,2-DCA} /Kg) |
| | 1,1,1-tricloroetano | - | 1,69E+01 | | 1,04E+00 |
| 1,1,2-tricloroetano | - | | 1,69E+01 | | 1,04E+00 |
| 1,1-dicloroetano | 1,29E+01 | 1,30E-04 | 1,29E+01 | 8,01E-06 | NÃO SE APLICA |
| 1,2-dicloroetano | 7,93E-01 | | NÃO SE APLICA | | 7,93E-01 |
| Cloreto de etila | - | | NÃO SE APLICA | | NÃO SE APLICA |
| ÁGUA SUBTERRÂNEA - INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE 1,1-DCA | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE 1,2-DCA | |
| | CMA (mg/L) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_1,1-DCA} (mg _{1,1-DCA} /L) | CMA _M (mol/Kg) | CMA _{EQ_1,2-DCA} (mg _{1,2-DCA} /L) |
| | 1,1,1-tricloroetano | - | 2,25E+01 | | 4,92E+00 |
| 1,1,2-tricloroetano | - | | 2,25E+01 | | 4,92E+00 |
| 1,1-dicloroetano | 1,71E+01 | 1,73E-04 | 1,71E+01 | 3,79E-05 | NÃO SE APLICA |
| 1,2-dicloroetano | 3,75E+00 | | NÃO SE APLICA | | 3,75E+00 |
| Cloreto de etila | - | | NÃO SE APLICA | | NÃO SE APLICA |

CMA = concentração máxima aceitável | M = molar | EQ_1,1-DCA = equivalente de 1,1-dicloroetano | EQ_1,2-DCA = equivalente de 1,2-dicloroetano | Células em bege = dados de entrada na planilha programada

Fonte: Dados calculados por meio de planilha desenvolvida pela autora

Tabela 12 – Concentrações máximas aceitáveis equivalentes aos compostos de maior toxicidade em exemplo hipotético: metanos clorados

| SOLO SUPERFICIAL - INGESTÃO | | | | | |
|--|--------------------------------------|--|--|---|--|
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE TCM | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE CM | |
| | CMA (mg/Kg) | CMA_M (mol/Kg) | CMA_{EQ_TCM} (mg _{TCM} /Kg) | CMA_M (mol/Kg) | CMA_{EQ_CM} (mg _{CM} /Kg) |
| Tetracloro de carbono | - | | 2,55E+03 | | - |
| Clorofórmio | 2,04E+03 | 1,70E-02 | 2,04E+03 | - | - |
| Diclorometano | - | | NÃO SE APLICA | - | - |
| Cloreto de metila | - | | NÃO SE APLICA | - | - |
| SOLO SUBSUPERFICIAL - INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE TCM | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE CM | |
| | CMA (mg/Kg) | CMA_M (mol/Kg) | CMA_{EQ_TCM} (mg _{TCM} /Kg) | CMA_M (mol/Kg) | CMA_{EQ_CM} (mg _{CM} /Kg) |
| Tetracloro de carbono | - | | 1,12E+00 | | 1,78E+02 |
| Clorofórmio | 8,97E-01 | 7,48E-06 | 8,97E-01 | 1,18E-03 | 1,42E+02 |
| Diclorometano | - | | NÃO SE APLICA | | 1,01E+02 |
| Cloreto de metila | 5,92E+01 | | NÃO SE APLICA | | 5,92E+01 |
| ÁGUA SUBTERRÂNEA - INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA ACEITÁVEL | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE TCM | | CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EQUIVALENTE CM | |
| | CMA (mg/L) | CMA_M (mol/Kg) | CMA_{EQ_TCM} (mg _{TCM} /L) | CMA_M (mol/Kg) | CMA_{EQ_CM} (mg _{CM} /L) |
| Tetracloro de carbono | - | | 2,25E+00 | | 1,10E+02 |
| Clorofórmio | 1,80E+00 | 1,50E-05 | 1,80E+00 | 7,36E-04 | 8,83E+01 |
| Diclorometano | - | | NÃO SE APLICA | | 6,26E+01 |
| Cloreto de metila | 3,68E+01 | | NÃO SE APLICA | | 3,68E+01 |

CMA = concentração máxima aceitável | M = molar | EQ_TCM = equivalente de clorofórmio | EQ_CM = equivalente de cloreto de metila | Células em bege = dados de entrada na planilha programada

Fonte: Dados calculados por meio de planilha desenvolvida pela autora

Para fins de comparação, a Tabela 13 apresenta as concentrações máximas equivalentes, calculadas a partir da abordagem aqui proposta, juntamente com as concentrações máximas aceitáveis originalmente calculadas para este exemplo hipotético por meio do uso das planilhas da CETESB. Considerou-se, em ambos os casos, as concentrações mais restritivas para cada substância química de interesse.

No caso dos etenos clorados, as concentrações máximas equivalentes podem ser até três ordens de grandeza mais restritivas do que as originais, dependendo da substância e do cenário considerados. Dentro desta família de contaminantes, destaca-se o caso do 1,2-dicloroeteno-cis, cujas concentrações máximas aceitáveis em cenários de inalação de vapores não haviam sido originalmente estabelecidas. Foi possível estabelecer uma concentração máxima equivalente ao cloreto de vinila para o 1,2-dicloroeteno-cis no cenário de inalação, baseada no potencial de transformação deste contaminante em seu produto de degradação mais tóxico.

Tabela 13 – Comparação das metas de remediação originais e alternativas para o exemplo hipotético em estudo

| COMPOSTO | SOLO SUPERFICIAL | | SOLO SUBSUPERFICIAL | | ÁGUA SUBTERRÂNEA | |
|--------------------------------|------------------|-------------------|---------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | CMA | CMA _{EQ} | CMA | CMA _{EQ} | CMA | CMA _{EQ} |
| ETENOS CLORADOS | | | | | | |
| Tetracloroeteno | 1,21E+04 | 2,41E+02 | 2,63E+01 | 1,73E+00 | 2,05E+01 | 1,69E+00 |
| Tricloroeteno | 1,01E+03 | 1,84E+02 | 1,32E+00 | 1,32E+00 | 1,29E+00 | 1,29E+00 |
| 1,1-dicloroeteno | 1,01E+05 | 1,37E+02 | 1,32E+02 | 7,34E+00 | 4,37E+01 | 1,86E+00 |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 4,03E+03 | 1,37E+02 | - | 7,34E+00 | - | 1,86E+00 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 4,03E+04 | 1,37E+02 | 2,63E+01 | 7,34E+00 | 2,15E+01 | 1,86E+00 |
| Cloreto de vinila | 8,78E+01 | 8,78E+01 | 4,69E+00 | 4,69E+00 | 1,19E+00 | 1,19E+00 |
| ETANOS CLORADOS | | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 4,03E+06 | 9,11E+02 | 3,29E+03 | 1,04E+00 | 2,10E+03 | 4,92E+00 |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,11E+03 | 9,11E+02 | 2,53E-01 | 1,04E+00 | 1,07E+00 | 4,92E+00 |
| 1,1-dicloroetano | 1,11E+04 | N.A. | 1,29E+01 | N.A. | 1,71E+01 | N.A. |
| 1,2-dicloroetano | 6,94E+02 | 6,94E+02 | 7,93E-01 | 7,93E-01 | 3,75E+00 | 3,75E+00 |
| Cloreto de etila | - | N.A. | 6,58E+03 | N.A. | 3,99E+03 | N.A. |
| METANOS CLORADOS | | | | | | |
| Tetracloreto de carbono | 9,03E+02 | 2,55E+03 | 3,44E+00 | 1,12E+00 | 1,60E+00 | 2,25E+00 |
| Clorofórmio | 2,04E+03 | 2,04E+03 | 8,97E-01 | 8,97E-01 | 1,80E+00 | 1,80E+00 |
| Diclorometano | 1,21E+04 | - | 3,95E+02 | 1,01E+02 | 6,89E+02 | 6,26E+01 |
| Cloreto de metila | - | - | 5,92E+01 | 5,92E+01 | 3,68E+01 | 3,68E+01 |

CMA = concentração máxima aceitável mais restritiva, entre efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos | CMA_{EQ} = concentração máxima equivalente ao composto de maior toxicidade para o cenário | N.A. = não aplicável para esta substância | Fonte: dados calculados com o uso das Planilhas para Avaliação de Risco da CETESB e de planilha desenvolvida pela autora.

Já para os etanos clorados, as diferenças entre as concentrações máximas aceitáveis e concentrações máximas equivalentes podem chegar a quatro ordens de grandeza, dependendo das substâncias avaliadas e da via de exposição. É importante destacar que a concentração máxima equivalente ao produto de degradação para o 1,1,2-tricloroetano nos cenários de inalação foi menos restritiva do que a concentração máxima aceitável originalmente calculada. Isto se deve ao fato de que este isômero de tricloroetano, que está no início da linha de degradação das substâncias consideradas nesta família de contaminantes, oferece maior risco à saúde humana do que os produtos de sua degradação. Contudo, considerando que o seu isômero 1,1,1-tricloroetano é expressivamente menos tóxico do que os produtos da sua degradação, a abordagem das concentrações máximas equivalentes oferece benefícios consideráveis para a avaliação dos riscos potenciais relacionados a concentrações remanescentes nesta família de contaminantes.

De maneira semelhante, dentre os metanos clorados, o tetracloreto de carbono apresentou concentrações máximas equivalentes menos restritivas do que as concentrações máximas

aceitáveis nos cenários de ingestão de solo e de inalação de vapores a partir da água subterrânea, por ter características de toxicidade mais acentuadas do que as dos produtos de sua degradação, considerando estas vias de exposição. Contudo, a abordagem das concentrações máximas equivalentes é útil para avaliar a relação entre produtos intermediários dentro desta família de contaminantes, especialmente no caso do diclorometano, que tem características de toxicidade mais acentuadas do que as do cloreto de metila.

Comparando-se, para cada substância, a concentração máxima aceitável e a concentração máxima equivalente ao produto de degradação mais tóxico, é possível, portanto, eleger a mais restritiva para estabelecer as metas de remediação.

É importante ressaltar que, mesmo utilizando as concentrações máximas mais restritivas para cada caso, deve-se atentar para o efeito cumulativo das massas residuais de diferentes substâncias em uma mesma família de contaminantes. Sob esta perspectiva, sugere-se que além das concentrações máximas mais restritivas de cada substância – considerando as concentrações máximas aceitáveis originalmente calculadas e as concentrações máximas equivalentes ao produto de degradação mais tóxico –, a concentração máxima aceitável molal, relativa ao composto de maior toxicidade, seja também considerada no estabelecimento das metas de remediação. Isto pode ser feito executando os passos descritos no item 6.1 desta monografia de maneira iterativa até o atendimento às concentrações máximas aceitáveis molais acumuladas equivalentes ao composto de maior toxicidade.

Sendo assim, após determinadas as concentrações máximas mais restritivas de cada substância, o efeito cumulativo das concentrações remanescentes foi mais uma vez verificado através das Equações 3, 4 e 5. Os cálculos foram executados por meio do software Microsoft Excel em sua versão Microsoft Office Home and Student 2013, utilizando a planilha previamente programada pela autora para execução das equações apresentadas no item 6.1 desta monografia, já descrita anteriormente. Nesta etapa, as concentrações máximas mais restritivas para cada substância foram consideradas como concentração remanescente. Os resultados foram avaliados quanto ao potencial para risco futuro, conforme rotina descrita no item 6.1. Em seguida, os valores das concentrações remanescentes foram reduzidos e a rotina de cálculos foi novamente executada, repetindo o processo de maneira iterativa até a eliminação do potencial para risco futuro, ou seja, até as concentrações molais, individuais e acumuladas, resultarem inferiores às concentrações máximas aceitáveis molais equivalentes ao produto de maior toxicidade (anteriormente calculadas e apresentadas nas Tabelas 10 a 12). As

concentrações que atendem a estes critérios podem então ser definidas como metas de remediação alternativas para o cenário em estudo.

Desta forma, a partir da abordagem aqui proposta, foram estabelecidas metas de remediação alternativas para este cenário hipotético. Tais metas atendem à concentração máxima equivalente aos produtos de degradação de maior toxicidade e à concentração molal cumulativa até os produtos de degradação de maior toxicidade. Pretende-se, assim, eliminar o potencial para que, no futuro, a massa desses produtos – gerada a partir da degradação dos contaminantes remanescentes após a remediação – venha a exceder os níveis toleráveis de risco à saúde humana. As Tabelas 14 a 16 apresentam as metas de remediação assim definidas, e as comparam com as concentrações máximas mais restritivas calculadas nos passos anteriores. As planilhas completas, com os resultados intermediários da avaliação do potencial para risco futuro (concentrações equivalentes para cada composto, considerando as metas de remediação alternativas como concentrações remanescentes na área de estudo) são apresentadas no Apêndice C.

Tabela 14 - Metas de remediação propostas para cenário hipotético: ingestão de solo superficial

| Composto | Concentração máxima mais restritiva* | | Meta de remediação proposta | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| | (mg/Kg) | (mol/Kg) | Individual (mg/Kg) | Individual (mg/mol) | Acumulada (mg/mol) |
| ETENOS CLORADOS | | | | | |
| Tetracloroeteno | 2,41E+02 | | 6,00E+01 | 3,53E-04 | |
| Tricloroeteno | 1,84E+02 | 7,77E-03 (CC _{TCE}) | 6,00E+01 | 4,62E-04 | 8,14E-04 (CC _{TCE}) |
| 1,1-dicloroeteno | 1,37E+02 | e | 2,00E+01 | 2,06E-04 | e |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 1,37E+02 | 1,42E-03 | 1,50E+01 | 1,55E-04 | 1,39E-03 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 1,37E+02 | (CC _{cv}) | 2,00E+01 | 2,06E-04 | (CC _{cv}) |
| Cloreto de vinila | 8,78E+01 | | 5,00E-01 | 8,06E-06 | |
| ETANOS CLORADOS | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 9,11E+02 | 1,12E-01 | 4,00E+02 | 3,08E-03 | 1,63E-02 |
| 1,1,2-tricloroetano | 9,11E+02 | (CC _{1,1-DCA}) | 4,00E+02 | 3,08E-03 | (CC _{1,1-DCA}) |
| 1,1-dicloroetano | 1,11E+04 | e | 1,00E+03 | 1,01E-02 | e |
| 1,2-dicloroetano | 6,94E+02 | 7,01E-03 (CC _{1,2-DCA}) | 5,00E+01 | 5,05E-04 | 6,66E-03 (CC _{1,2-DCA}) |
| Cloreto de etila | - | | - | - | - |
| METANOS CLORADOS | | | | | |
| Tetracloreto de carbono | 9,03E+02 | | 9,03E+02 | 6,02E-03 | |
| Clorofórmio | 2,04E+03 | 1,70E-02 | 1,30E+03 | 1,08E-02 | 1,69E-02 |
| Diclorometano | 1,21E+04 | (CC _{TCM}) | 1,21E+04 | 1,42E-01 | (CC _{TCM}) |
| Cloreto de metila | - | | - | - | - |

*Considerando as concentrações máximas aceitáveis e concentrações máximas equivalentes apresentadas na Tabela 13 | CC = concentração cumulativa | TCE = tricloroeteno | CV = cloreto de vinila | 1,1-DCA = 1,1-dicloroetano | 1,2-DCA = 1,2-dicloroetano | TCM = clorofórmio | CM = cloreto de metila | Fonte: dados calculados com o uso das Planilhas para Avaliação de Risco da CETESB e de planilha desenvolvida pela autora.

Tabela 15 - Metas de remediação propostas para cenário hipotético: inalação de vapores a partir do solo subsuperficial em ambiente fechado

| Composto | Concentração máxima mais restritiva | | Meta de remediação proposta | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| | (mg/Kg) | (mol/Kg) | Individual (mg/Kg) | Individual (mg/mol) | Acumulada (mg/mol) |
| Etenos clorados | | | | | |
| Tetracloroeteno | 1,73E+00 | | 5,77E-01 | 3,39E-06 | |
| Tricloroeteno | 1,32E+00 | 1,05E-05 | 4,40E-01 | 3,38E-06 | 6,78E-06 |
| 1,1-dicloroeteno | 7,34E+00 | (CC _{TCE}) | 2,00E+00 | 2,06E-05 | (CC _{TCE}) |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 7,34E+00 | e | 1,90E+00 | 1,96E-05 | e |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 7,34E+00 | 7,56E-05 | 2,00E+00 | 2,06E-05 | 7,52E-05 |
| Cloreto de vinila | 4,69E+00 | (CC _{CV}) | 4,69E-01 | 7,56E-06 | (CC _{CV}) |
| Etanos clorados | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 1,04E+00 | 1,30E-04 | 3,90E-01 | 3,00E-06 | 6,92E-05 |
| 1,1,2-tricloroetano | 2,53E-01 | (CC _{1,1-DCA}) | 1,30E-01 | 1,00E-06 | (CC _{1,1-DCA}) |
| 1,1-dicloroetano | 1,29E+01 | e | 6,45E+00 | 6,52E-05 | e |
| 1,2-dicloroetano | 7,93E-01 | 8,01E-06 | 3,95E-01 | 3,99E-06 | 7,99E-06 |
| Cloreto de etila | 6,58E+03 | (CC _{1,2-DCA}) | 6,58E+03 | 1,01E-01 | (CC _{1,2-DCA}) |
| Metanos clorados | | | | | |
| Tetracloreto de carbono | 1,12E+00 | 7,48E-06 | 5,60E-01 | 3,73E-06 | 7,47E-06 |
| Clorofórmio | 8,97E-01 | (CC _{CM}) | 4,49E-01 | 3,74E-06 | (CC _{CM}) |
| Diclorometano | 1,01E+02 | e | 5,05E+01 | 5,94E-04 | e |
| Cloreto de metila | 5,92E+01 | 1,18E-03 | 2,90E+01 | 5,80E-04 | 1,18E-03 |
| | | (CC _{CM}) | | | (CC _{CM}) |

*Considerando as concentrações máximas aceitáveis e concentrações máximas equivalentes apresentadas na Tabela 13 | CC = concentração cumulativa | TCE = tricloroeteno | CV = cloreto de vinila | 1,1-DCA = 1,1-dicloroetano | 1,2-DCA = 1,2-dicloroetano | TCM = clorofórmio | CM = cloreto de metila | Fonte: dados calculados com o uso das Planilhas para Avaliação de Risco da CETESB e de planilha desenvolvida pela autora.

Tabela 16 - Metas de remediação propostas para cenário hipotético: inalação de vapores a partir da água subterrânea em ambiente fechado

| Composto | Concentração máxima mais restritiva | | Meta de remediação proposta | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| | (mg/Kg) | (mol/Kg) | Individual (mg/L) | Individual (mg/mol) | Acumulada (mg/mol) |
| Etenos clorados | | | | | |
| Tetracloroeteno | 1,69E+00 | | 5,63E-01 | 3,31E-06 | |
| Tricloroeteno | 1,29E+00 | 9,92E-06 | 4,30E-01 | 3,31E-06 | 6,62E-06 |
| 1,1-dicloroeteno | 1,86E+00 | (CC _{TCE}) | 3,00E-01 | 3,09E-06 | (CC _{TCE}) |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 1,86E+00 | e | 1,92E-05 | 3,00E-01 | 3,09E-06 |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 1,86E+00 | (CC _{CV}) | 3,00E-01 | 3,09E-06 | (CC _{CV}) |
| Cloreto de vinila | 1,19E+00 | | 2,00E-01 | 3,23E-06 | |
| Etanos clorados | | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 4,92E+00 | 1,73E-04 | 2,50E+00 | 1,92E-05 | 1,69E-04 |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,07E+00 | (CC _{1,1-DCA}) | 1,07E+00 | 8,23E-06 | (CC _{1,1-DCA}) |
| 1,1-dicloroetano | 1,71E+01 | e | 1,40E+01 | 1,41E-04 | e |
| 1,2-dicloroetano | 3,75E+00 | 3,79E-05 | 1,00E+00 | 1,01E-05 | 3,76E-05 |
| Cloreto de etila | 3,99E+03 | (CC _{1,2-DCA}) | 3,99E+03 | 6,14E-02 | (CC _{1,2-DCA}) |
| Metanos clorados | | | | | |
| Tetracloreto de carbono | 1,60E+00 | 1,50E-05 | 8,00E-01 | 5,33E-06 | 1,28E-05 |
| Clorofórmio | 1,80E+00 | (CC _{CM}) | 9,00E-01 | 7,50E-06 | (CC _{TCM}) |
| Diclorometano | 6,26E+01 | e | 7,36E-04 | 4,65E+00 | 5,47E-05 |
| Cloreto de metila | 3,68E+01 | (CC _{CM}) | 3,30E+01 | 6,60E-04 | (CC _{CM}) |

*Considerando as concentrações máximas aceitáveis e concentrações máximas equivalentes apresentadas na Tabela 13 | CC = concentração cumulativa | TCE = tricloroeteno | CV = cloreto de vinila | 1,1-DCA = 1,1-dicloroetano | 1,2-DCA = 1,2-dicloroetano | TCM = clorofórmio | CM = cloreto de metila | Fonte: dados calculados com o uso das Planilhas para Avaliação de Risco da CETESB e de planilha desenvolvida pela autora.

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A abordagem de avaliação aqui sugerida parte do pressuposto de que toda a massa de contaminante remanescente na área sofrerá decloração redutiva e se acumulará na sua forma mais tóxica. Trata-se de uma simplificação dos processos que ocorrem em subsuperfície, pois desconsidera a transferência de contaminantes entre os diferentes compartimentos ambientais, a ocorrência de processos complementares de degradação química e biológica, possíveis transformações entre isômeros e também a dinâmica em que ocorre ou poderá ocorrer esta transformação.

A Declaração do Rio, resultante da conferência Rio-92, estabeleceu o Princípio da Precaução, segundo o qual a falta de certeza absoluta acerca de um dano futuro não pode ser utilizada como argumento para deixar de executar ações mitigadoras desses potenciais danos. De acordo com Cunha et al. (2013), o princípio da precaução resulta na inversão do ônus da prova. Ou seja, em se tratando de questões ambientais, a falta de provas de que um determinado fato resultará em dano não é suficiente para desresponsabilizar o responsável pela área. Pelo contrário, cabe ao responsável comprovar de forma irrefutável a inexistência do dano. Permanecendo dúvidas ou incertezas a respeito dos riscos potenciais ao meio ambiente, deverão ser tomadas as medidas cabíveis. Segundo os autores, embora o Princípio da Precaução não esteja ainda formalizado na legislação brasileira, já existe uma jurisprudência em favor da aplicação deste princípio no direito ambiental deste país.

Dessa forma, mesmo tendo consciência das simplificações que embasam a presente proposta, considera-se que uma abordagem intencionalmente conservadora é importante para contrabalancear as inúmeras incertezas associadas ao gerenciamento de áreas contaminadas, garantindo a aplicação do princípio da precaução na tomada de decisões no gerenciamento de áreas contaminadas por solventes clorados alifáticos.

Cabe ressaltar que a metodologia proposta não se pretende a ser utilizada de forma exclusiva ou substitutiva das metodologias de avaliação de risco já largamente reconhecidas e validadas, mas sim enriquecer o ferramental disponível para auxiliar o processo do gerenciamento de risco em áreas contaminadas. A proposta de gestão aqui apresentada oferece uma possibilidade de definir métricas mais defensáveis de remoção de massa, com base no risco potencial que as mesmas podem representar para os receptores. Além disto, esta proposta pode ser usada para definir metas de remediação preventivas para contaminantes cujos dados toxicológicos não

foram definidos para todas as vias de ingresso. É o caso do 1,2-dicloroeteno-cis, para o qual não se costuma estabelecer metas de remediação para a via de inalação de vapores, apesar de ser um composto com potencial para geração de cloreto de vinila, que se caracteriza por sua volatilidade e pela elevada toxicidade nesta via de exposição.

É importante lembrar, ainda, que a atenuação natural depende não apenas das concentrações dos contaminantes envolvidos, mas também das condições geoquímicas e microbiológicas existentes na área. Desse modo, a critério técnico, outros aspectos podem ser considerados de maneira complementar na avaliação de cada caso, no objetivo de verificar o potencial de decloração dos contaminantes residuais em uma área de estudo. Neste sentido, sugere-se verificar se a área de estudo apresenta características compatíveis com a decloração redutiva em pelo menos uma dentre as três linhas apresentadas por Wiedemeier et al (1999), a saber:

- (a) resultados analíticos históricos evidenciando tendência para estabilização ou retração das plumas de compostos-pai, especialmente em condições sem interferência humana;
- (b) condições geoquímicas compatíveis com a biodegradação (por exemplo, redução de doares e aceptores de elétrons ao longo do tempo, aumento dos produtos colaterais do metabolismo microbiano, aumento das concentrações de produtos de degradação, alta proporção na razão entre os isômeros de dicloroeteno);
- (c) dados microbiológicos que indiquem a disponibilidade de microorganismos degradadores compatíveis com a decloração redutiva de solventes clorados alifáticos.

Porém, deve ser ressaltado que mesmo em áreas onde atualmente não são observadas evidências de biodegradação significativa, os critérios aqui estabelecidos devem ser considerados para uma definição da necessidade de continuidade de monitoramento de áreas com massa remanescente, podendo-se optar por um intervalo maior de monitoramento.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta monografia teve por objetivo avaliar se concentrações remanescentes de solventes clorados alifáticos têm potencial para alterar o cenário de risco à saúde humana relacionado aos produtos de sua degradação em momentos futuros, mesmo após atingidas as metas de remediação. Os seguintes compostos foram considerados neste estudo: tetracloroeteno, tricloroeteno, 1,2-dicloroeteno-cis, 1,2-dicloroeteno-trans, 1,1-dicloroeteno, cloreto de vinila, 1,1,1-tricloroetano, 1,1,2-tricloroetano, 1,1-dicloroetano, 1,2-dicloroetano, cloreto de etila, tetracloreto de carbono, clorofórmio, diclorometano e cloreto de metila.

A partir de levantamento bibliográfico, foi feita a avaliação das características físico-químicas, toxicológicas e dos mecanismos de degradação destes contaminantes. Sob determinadas condições ambientais, é possível a ocorrência de biodegradação dos solventes clorados alifáticos, sendo que o mecanismo mais relevante em ambiente subterrâneo é a decloração redutiva intermediada por microorganismos anaeróbios, na qual as moléculas mais cloradas são transformadas em suas versões menos cloradas. Este tipo de transformação pode ocorrer de forma sequencial dentro de cada família de contaminantes. Assim, dentre os etenos clorados, o tetracloroeteno pode ser convertido em tricloroeteno, este em dicloroetenos, estes em cloreto de vinila, e por fim em eteno. Dentro os etanos clorados, os tricloroetanos podem ser convertidos em dicloroetanos, que se reduzem a cloreto de etila, e por fim a etano. Dentro os metanos clorados, o tetracloreto de carbono pode ser convertido em clorofórmio, este em dicloroemetano, então em cloreto de metila, culminando em metano.

Ainda conforme os dados bibliográficos, foi possível verificar que alguns produtos destas cadeias de degradação são mais tóxicos do que as moléculas que lhes dão origem, sendo que estes produtos, aqui denominados compostos-filho, tendem a ter metas de remediação mais restritivas do que as de seus respectivos compostos-pai. Destaca-se, ainda, que a biodegradação destes compostos mais tóxicos tende a ocorrer de forma lenta, ocasionando o acúmulo destes produtos no aquífero.

Tal percepção foi confirmada por meio do cálculo das concentrações máximas aceitáveis em um cenário genérico, demonstrando que nas três famílias de contaminantes consideradas (etenos clorados, etanos clorados e metanos clorados), as metas de remediação mais restritivas correspondem a compostos-filho, ou seja, a contaminantes que podem ser produzidos por meio

da biodegradação de outros solventes clorados presentes na área, que tenham metas de remediação mais flexíveis.

Com base nesse cenário, foi proposta uma rotina de cálculos com o objetivo de apoiar a tomada de decisões a respeito do encerramento de projetos de remediação em áreas contaminadas com solventes clorados alifáticos. A abordagem se baseia no conceito de concentrações equivalentes, ou seja, a concentração de um determinado composto que, se integralmente convertido em seu produto de degradação mais tóxico, poderá elevar as concentrações deste produto a níveis que excedem os limites toleráveis de risco à saúde humana.

Com base na rotina proposta, é possível avaliar se uma área a ser encaminhada para encerramento, ou em fase de monitoramento para encerramento, oferece potencial para que, no futuro, as concentrações de produtos de degradação voltem a exceder as metas de remediação já atingidas. Também é possível calcular metas de remediação mais restritivas, que previnam este risco potencial, bem como calcular metas de remediação complementares para contaminantes cujos dados toxicológicos não permitem a determinação de concentrações máximas aceitáveis por meio das metodologias já consolidadas. É o caso do 1,2-dicloroeteno-cis, contaminante para o qual não costumam ser calculadas metas de remediação em cenários de inalação de vapores, devido à insuficiência dos dados toxicológicos relativos a esta via de exposição. Por não ter metas de remediação estabelecidas, este contaminante pode permanecer na área em concentrações significativas. Contudo, o produto de sua degradação é o cloreto de vinila, um contaminante que se destaca pelo seu potencial de risco à saúde humana, especialmente em cenários de inalação.

A abordagem aqui sugerida foi simulada em um caso hipotético, sendo os cálculos executados por meio de uma planilha programada para a automatização da rotina proposta. Esta abordagem, embora conservadora, pode ser utilizada de forma complementar na avaliação da adequabilidade do encerramento de projetos de remediação, baseando-se no princípio da precaução. Busca-se, assim, formular critérios alternativos que possam auxiliar na tomada de decisão relativa ao gerenciamento de áreas contaminadas por solventes clorados alifáticos, no objetivo de prevenir o agravamento da situação de risco em momentos futuros, evitando a eventual necessidade de reabertura de projetos já tidos como encerrados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16209:2013 – Avaliação de risco a saúde humana para fins de gerenciamento de áreas contaminadas.** Norma técnica. Rio de Janeiro, 2013.

BERTOLO, R. A. **Bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes organoclorados em aquíferos fraturados.** Tese apresentada para a obtenção de título de Livre-Docente junto ao Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, na área de conhecimento de Hidrogeologia e Gestão de Áreas Contaminadas. São Paulo, 2017.

BRADLEY, P. M. **Microbial degradation of chloroethenes in groundwater systems.** In: Hydrogeology Journal. Columbia, 2000.

CUNHA, G. F.; PINT, C. R. C.; MARTINS, S. R.; CASTILHOS JR, A. B. Princípio da precaução no Brasil após a Rio-92: impacto ambiental e saúde humana. **Ambiente e sociedade.** São Paulo, v. VXI, nº 3, p. 65-82, jul./set. 2013.

CRUZ, C. S. **Avaliação da atenuação natural de hidrocarbonetos alifáticos clorados em um aquífero contaminado.** Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Ambiental na Área de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Florianópolis, 1999.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Decisão de Diretoria nº 038/2017/C, de 07 de fevereiro de 2017.** São Paulo, 2017.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Planilhas para Avaliação de Risco em Áreas Contaminadas sob Investigação.** Planilhas eletrônicas disponibilizadas em meio digital. São Paulo, 2021. Publicação digital disponível em <<https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/documentacao/planilhas-para-avaliacao/>>. Consulta em novembro de 2021.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009.** Brasília, 2009.

FEPEAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS. **Diretriz Técnica nº 003/2021.** Porto Alegre, 2021.

FERRAZ, D. M. F. **Aplicação do método phitoscreening para determinação de hidrocarbonetos clorados no município de Porto Feliz – SP.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, como parte dos requisites para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente. Rio Claro, 2014.

FERREIRA, S. A. M. **Processos microbiológicos associados à degradação de solventes organoclorados na água subterrânea – Jurubatuba – São Paulo – SP.** Dissertação apresentada ao Instituto de Geociência da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências. São Paulo, 2018.

JAFFÉ, P. **Gerenciamento de contaminações por solventes clorados – Manual para levantamento, investigação, avaliação e remediação de contaminações de solo e água subterrânea por solventes clorados na indústria metalúrgica/eletro-eletrônica.** Cotia, 2008.

LEMES, A. J. F. L. G. **O estado da arte da atenuação natural monitorada no Estado de São Paulo.** Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de São Paulo como parte dos requisites necessários para obtenção do Grau em Engenharia Ambiental. Santos, 2021.

LIMA, P. L. **Caracterização de detalhe do perfil vertical de contaminação em um aquífero cristalino fraturado e intemperizado Jurubatuba – São Paulo, SP.** Tese apresentada ao Programa de Recursos Minerais e Hidrogeologia para obtenção do título de Doutor em Ciências. São Paulo, 2018.

WIEDEMEIER, T. H.; RIFAI, H. S.; NEWELL, C. J.; WILSON, J. T. **Natural attenuation of fuels and chlorinated solvents in the subsurface.** John Wiley & Sons, Inc.: 1999.

USEPA – United States Environment Protection Agency. **Regional Screening Levels (RSLs) – User's Guide.** Publicação digital disponível em <<https://www.epa.gov/risk/regionalscreening-levels-rsls-users-guide#toxicity>>. Consulta em outubro de 2021.

USEPA – United States Environment Protection Agency. **Technical protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in groundwater.** Publicação digital disponível em <<https://nepis.epa.gov>>. Consulta em dezembro de 2021.

**APÊNDICE A – CÁLCULO DE CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS ACEITÁVEIS EM
UM CENÁRIO GENÉRICO COM USO DAS PLANILHAS PARA AVALIAÇÃO
DE RISCO DA CETESB**

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|--------------------------------|---|----------------------|---|-------------------------------------|----------------------|--|
| Data: | | Projeto/Identificação da área: | | | | | | |
| MODELO CONCEITUAL DE EXPOSIÇÃO | | | | | | | | |
| MEIO FÍSICO | | VIAS DE INGRESSO | | | TRABALHADOR COMERCIAL E INDUSTRIAL | | | |
| | | | | | RECEPTOR NA FONTE | RECEPTOR FORA DA FONTE | | |
| CAMINHOS DE EXPOSIÇÃO | SOLO | SUPERFICIAL | CONTATO DIRETO | INALAÇÃO | VAPORES | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | | PARTÍCULAS | <input type="checkbox"/> | NÃO APlicável | | |
| | | SUBSUPERFICIAL | | CONTATO DÉRMICO | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | | INGESTÃO | | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | | | | INGESTÃO DE VEGETAIS | | NÃO APlicável | | |
| | ÁGUA | SUBTERRÂNEA | INALAÇÃO | AMBIENTES ABERTOS | | <input type="checkbox"/> | NÃO APlicável | |
| | | | | AMBIENTES FECHADOS | | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | | | INGESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA A PARTIR DA LIXIVIAÇÃO | | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | SUPERFICIAL | CONTATO DIRETO | AMBIENTES ABERTOS | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | | AMBIENTES FECHADOS | | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | AR | | CONTATO DÉRMICO | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | NÃO APlicável | |
| | SEDIMENTO | | INGESTÃO | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | CONTACTO DÉRMICO | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |

|  CETESB | | Data: 0 | | Identificação da área: 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|----------------------------|------------|--------------------------|------------------|------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------------|----------|-----------------------|---|---|----------|----------|----------|----------|---------|--|
| | | PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | CAS N° | PM (g/mol) | CTE ADMENSIONAL DE HENRY | Densidade (g/ml) | Koc (L/kg) | Solubilidade (mg/L água) | DIFUSIVIDADE NO AR (cm²/s) | DIFUSIVIDADE NA ÁGUA (cm²/s) | PONTO DE FUSÃO (°C) | Kd (L/kg) | Meia Vida (ano) | PC (cm/hora) | Log Kow | Pressão de vapor (Pa) | Fator de Bioconcentração para Metais (raiz) | Fator de Bioconcentração para Metais (folhas/estrutura) | B | tevent | t* | FA | Volátil | |
| PARÂMETROS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Tetrachloroethylene | 127-18-4 | 165,83 | 7,24E-01 | 1,62E+00 | 9,49E+01 | 2,06E+02 | 5,05E-02 | 9,46E-06 | -2,23E+01 | 0,28 | 2,00E+00 | 0,0334 | 3,4000 | 1,85E+01 | | | 1,65E-01 | 8,92E+01 | 2,14E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 2 | Trichloroethylene | 79-01-6 | 131,39 | 4,03E-01 | 1,46E+00 | 6,07E+01 | 1,28E+03 | 6,87E-02 | 1,02E-05 | -8,47E+01 | 0,18 | 4,50E+00 | 0,0116 | 2,4200 | 6,90E+01 | | | 5,11E-02 | 5,72E+01 | 1,37E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 3 | Dichloroethylene, 1,1- | 75-35-4 | 96,94 | 1,07E+00 | 1,21E+00 | 3,18E+01 | 2,42E+03 | 6,63E-02 | 1,10E-05 | -1,23E+02 | 0,10 | 3,62E+01 | 0,0117 | 2,1300 | 6,00E+02 | | | 4,43E-02 | 3,67E+01 | 8,81E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 4 | Dichloroethylene, cis-1,2- | 156-59-2 | 96,94 | 1,67E-01 | 1,28E+00 | 3,96E+01 | 6,41E+03 | 8,84E-02 | 1,13E-05 | -8,00E+01 | 0,12 | 7,88E+00 | 0,0110 | 1,8600 | 2,00E+02 | | | 4,17E-02 | 3,67E+01 | 8,81E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 5 | Dichloroethylene, trans-1,2- | 156-60-5 | 96,94 | 3,83E-01 | 1,26E+00 | 3,96E+01 | 4,52E+03 | 8,76E-02 | 1,12E-05 | -4,98E+01 | 0,12 | 7,88E+00 | 0,0110 | 2,0900 | 3,31E+02 | | | 4,17E-02 | 3,67E+01 | 8,81E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 6 | Vinyl Chloride | 75-01-4 | 62,50 | 1,14E+00 | 9,11E-01 | 2,17E+01 | 8,80E+03 | 1,07E-01 | 1,20E-05 | -1,54E+02 | 0,07 | 7,88E+00 | 0,0084 | 1,3800 | 2,98E+03 | | | 2,55E-02 | 2,35E+01 | 5,65E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Trichloroethane, 1,1,1- | 71-55-6 | 133,41 | 7,03E-01 | 1,34E+00 | 1,29E+01 | 6,48E-02 | 9,60E-06 | -3,04E+01 | 0,13 | 1,50E+00 | 0,0126 | 2,4900 | 1,24E+02 | | | 5,60E-02 | 5,87E+01 | 1,41E+00 | 1,00E+00 | V | | |
| 9 | Trichloroethane, 1,1,2- | 79-00-5 | 133,41 | 3,37E-02 | 1,44E+00 | 6,07E+01 | 4,59E+03 | 6,69E-02 | 1,00E-05 | -3,66E+01 | 0,18 | 2,00E+00 | 0,0050 | 1,8900 | 2,30E+01 | | | 2,24E-02 | 5,87E+01 | 1,41E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 10 | Dichloroethane, 1,1- | 75-34-3 | 98,96 | 2,30E-01 | 1,18E+00 | 3,18E+01 | 5,04E+03 | 8,36E-02 | 1,06E-05 | -9,69E+01 | 0,10 | 9,86E-01 | 0,0068 | 1,7900 | 2,27E+02 | | | 2,58E-02 | 3,77E+01 | 9,04E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 11 | Dichloroethane, 1,2- | 107-06-2 | 98,96 | 4,82E-02 | 1,25E+00 | 3,96E+01 | 8,60E+03 | 8,57E-02 | 1,10E-05 | -3,55E+01 | 0,12 | 9,86E-01 | 0,0042 | 1,4800 | 7,89E+01 | | | 1,61E-02 | 3,77E+01 | 9,04E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 12 | Ethyl Chloride (Chloroethane) | 75-00-3 | 64,52 | 4,54E-01 | 8,90E-01 | 2,17E+01 | 6,71E+03 | 1,04E-01 | 1,16E-05 | -1,39E+02 | 0,07 | 1,53E-01 | 0,0061 | 1,4300 | 1,01E+03 | | | 1,88E-02 | 2,42E+01 | 5,80E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Carbon Tetrachloride | 56-23-5 | 153,82 | 1,13E+00 | 1,59E+00 | 4,39E+01 | 7,93E+02 | 5,71E-02 | 9,78E-06 | -2,30E+01 | 0,13 | 9,86E+01 | 0,0163 | 2,8300 | 1,15E+02 | | | 7,78E-02 | 7,64E+01 | 1,83E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 15 | Chloroform | 67-66-3 | 119,38 | 1,50E-01 | 1,49E+00 | 3,18E+01 | 7,95E+03 | 7,69E-02 | 1,09E-05 | -6,36E+01 | 0,10 | 4,93E+00 | 0,0068 | 1,9700 | 1,97E+02 | | | 2,87E-02 | 4,90E+01 | 1,18E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 16 | Methylene Chloride | 75-09-2 | 84,93 | 1,33E-01 | 1,33E+00 | 2,17E+01 | 1,30E+04 | 9,99E-02 | 1,25E-05 | -9,51E+01 | 0,07 | 1,53E-01 | 0,0035 | 1,2500 | 4,35E+02 | | | 1,25E-02 | 3,14E+01 | 7,85E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 17 | Chloromethane | 74-87-3 | 50,49 | 3,61E-01 | 9,11E-01 | 1,32E+01 | 5,32E+03 | 1,24E-01 | 1,36E-05 | -9,77E+01 | 0,04 | 1,53E-01 | 0,0033 | 0,9100 | 4,30E+03 | | | 8,96E-03 | 2,02E+01 | 4,84E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

|  CETESB | | PARÂMETROS TOXICOLÓGICOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------|------------------------------|-------------------|------------------|------|---------------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------|------|--|--|
| | | CAS N° | EVIDÊNCIA DE CÂNCER | DOSE DE REFERÊNCIA (RfD) | | | | FATOR DE CARCINOGENICIDADE | | | ABD _{GI} | ABS _d | TIPO | IUR (ug/m³)-1 | RfCi (mg/m³) | Potabilidade | Fator Biodisponibilidade relativa | | | | |
| | | | | INGESTÃO | INALAÇÃO | DERMICO | RfD _o (mg/kg-day) | RfD _i (mg/kg-dia) | REFERÊNCIA | RfD _d (mg/kg-day) | REFERÊNCIA | | | | | | | | | | |
| PARÂMETROS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Tetrachloroethylene | 127-18-4 | C | 6,00E-03 | I | 1,14E-02 | I | 6,00E-03 | I | 2,10E-03 | 9,10E-04 | 2,10E-03 | 100% | | | 2,60E-07 | 4,00E-02 | 4,00E+01 | 1,00 | | |
| 2 | Trichloroethylene | 79-01-6 | C | 5,00E-04 | I | 5,71E-04 | I | 5,00E-04 | I | 4,60E-02 | 1,44E-02 | 4,60E-02 | 100% | | | 4,10E-06 | 2,00E-03 | 2,00E+01 | 1,00 | | |
| 3 | Dichloroethylene, 1,1- | 75-35-4 | NC | 5,00E-02 | I | 5,71E-02 | I | 5,00E-02 | I | | | | 100% | | | | 2,00E-01 | 3,00E+01 | | | |
| 4 | Dichloroethylene, cis-1,2- | 156-59-2 | NC | 2,00E-03 | I | | | 2,00E-03 | I | | | | 100% | | | | | 5,00E+01 | 1,00 | | |
| 5 | Dichloroethylene, trans-1,2- | 156-60-5 | NC | 2,00E-02 | I | 1,14E-02 | X | 2,00E-02 | I | | | | 100% | | | | 4,00E-02 | 5,00E+01 | 1,00 | | |
| 6 | Vinyl Chloride | 75-01-4 | C | 3,00E-03 | I | 2,86E-02 | I | 3,00E-03 | I | 7,20E-01 | 1,54E-02 | 7,20E-01 | 100% | | | 4,40E-06 | 1,00E-01 | 2,00E+00 | 1,00 | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Trichloroethane, 1,1,1- | 71-55-6 | NC | 2,00E+00 | I | 1,43E+00 | I | 2,00E+00 | I | | | | 100% | | | | 5,00E+00 | | 1,00 | | |
| 9 | Trichloroethane, 1,1,2- | 79-00-5 | C | 4,00E-03 | I | 5,71E-05 | X | 4,00E-03 | I | 5,70E-02 | 5,60E-02 | 5,70E-02 | 100% | | | 1,60E-05 | 2,00E-04 | | 1,00 | | |
| 10 | Dichloroethane, 1,1- | 75-34-3 | C | 2,00E-01 | P | | | 2,00E-01 | P | 5,70E-03 | 5,60E-03 | 5,70E-03 | 100% | | | 1,60E-06 | | | 1,00 | | |
| 11 | Dichloroethane, 1,2- | 107-06-2 | C | 6,00E-03 | X | 2,00E-03 | P | 6,00E-03 | X | 9,10E-02 | 9,10E-02 | 9,10E-02 | 100% | | | 2,60E-05 | 7,00E-03 | 1,00E+01 | 1,00 | | |
| 12 | Ethyl Chloride (Chloroethane) | 75-00-3 | NC | | | 2,86E+00 | I | | | | | | 100% | | | | 1,00E+01 | | 1,00 | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Carbon Tetrachloride | 56-23-5 | C | 4,00E-03 | I | 2,86E-02 | I | 4,00E-03 | I | 7,00E-02 | 2,10E-02 | 7,00E-02 | 100% | | | 6,00E-06 | 1,00E-01 | 4,00E+00 | 1,00 | | |
| 15 | Chloroform | 67-66-3 | C | 1,00E-02 | I | 2,80E-02 | A | 1,00E-02 | I | 3,10E-02 | 8,05E-02 | 3,10E-02 | 100% | | | 2,30E-05 | 9,80E-02 | 1,00E+02 | 1,00 | | |
| 16 | Methylene Chloride | 75-09-2 | C | 6,00E-03 | I | 1,71E-01 | I | 6,00E-03 | I | 2,00E-03 | 3,50E-05 | 2,00E-03 | 100% | | | 1,00E-08 | 6,00E-01 | 2,00E+01 | 1,00 | | |
| 17 | Chloromethane | 74-87-3 | NC | | | 2,57E-02 | I | | | | | | 100% | | </ | | | | | | |

PLANILHA DE ENTRADA DE DADOS

| PARÂMETROS | DESCRÍÇÃO | UNIDADE | TRABALHADOR COMERCIAL E INDUSTRIAL | | | ESPECÍFICO |
|--|---|----------------------------------|---|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| | | | REFERÊNCIA CETESB | VALORES ESPECÍFICOS | VALORES DE CÁLCULO | |
| Cenários Associados a Intrusão de Vapores | | | | | | |
| Ab | Área das Fundações | cm ² | 200.000 | | 200.000 | |
| Lb | Pé Direito | cm | 300 | | 300 | |
| Lcrk | Espessura das fundações/paredes de construções | cm | 15,00 | | 15,00 | |
| α | Fator de atenuação | - | 0,03 | | 0,03 | |
| Cenários Associados a Inalação de Vapores a partir do Solo e Água Subterrânea | | | | | | |
| Lss | Profundidade da Fonte no Solo Subsuperficial | cm | 100 | | 100 | |
| dss | Espessura do Solo Subsuperficial Impactado | cm | 345 | | 345 | |
| Wss | Largura do solo subsuperficial impactado | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| Lgw | Profundidade do Nível d'Água | cm | 450 | | 450 | |
| T | Temperatura da Água Subterrânea | K | 298 | | 298 | |
| Ww | Largura da área fonte na direção paralela ao fluxo da água subterrânea | cm | 1.000 | | 1.000 | |
| δgw | Espessura da pluma dissolvida na água subterrânea | cm | 200 | | 200 | |
| θT | Porosidade Total | - | 0,460 | | 0,460 | |
| ps | Densidade do Solo | g/cm ³ | 1,300 | | 1,300 | |
| foc | Fração de Carbono Orgânico no Solo | g-C/g-solo | 0,003 | | 0,003 | |
| Cenários Associados a Lixiviação do Solo Subsuperficial para Água Subterrânea | | | | | | |
| SIR | Taxa de infiltração no Solo | cm/ano | 66,10 | | 66,10 | |
| Cenários Associados ao Contato Direto com Solo superficial | | | | | | |
| Ls | Espessura do Solo Superficial Impactado | cm | 100 | | 100 | |
| A | Área de Emissão de Vapores | cm ² | 20.250.000 | | 20.250.000 | |
| Ws | Largura do solo superficial impactado | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| Cenários Associados ao Transporte de Contaminante em Meio Saturado | | | | | | |
| Sd | Espessura da Fonte na Água Subterrânea | cm | 200 | | 200 | |
| Sw | Largura da Fonte | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| i | Gradiente Hidráulico | - | 0,050 | | 0,050 | |
| K | Condutividade Hidráulica | cm/dia | 11,23 | | 11,23 | |
| x | Distância entre a área fonte na água subterrânea e o Ponto de Exposição | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| θef | Porosidade Efetiva | cm ³ /cm ³ | 0,120 | | 0,120 | |

| DATA: 0 | | | IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA: 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--------------|-------------------------------|---|---------------------|-----------------|-------|----------------------|------------------------------------|----------|------------------------------------|----------------|-------------------|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|--|-----|-----|
| CETESB | CONTAMINANTE | EFEITO | CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS ACEITÁVEIS PARA SOLO SUPERFICIAL E SUBSUPERFICIAL TRABALHADOR COMERCIAL E INDUSTRIAL | | | | | | | | | | | | | | | NA FONTE DE CONTAMINAÇÃO A UMA DISTÂNCIA DO PONTO DE EXPOSIÇÃO | | |
| | | | NO PONTO DE EXPOSIÇÃO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | SUPERFICIAL | | | | | | | | SUBSUPERFICIAL | | | | SUBSUPERFICIAL | | | | | |
| | | | CONTATO DIRETO | | | | INGESTÃO DE VEGETAIS | | INALAÇÃO | | | | INGESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA A PARTIR DA LIXIVIAÇÃO DO SOLO | | LIXIVIAÇÃO PARA ÁGUA SUBTERRÂNEA | | | | | |
| CAS N° | | | INALAÇÃO | | CONTATO DÉRMICO | | INGESTÃO | INGESTÃO DE COMPOSTOS METÁLICOS | | INGESTÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS | | AMBIENTES ABERTOS | AMBIENTES FECHADOS | INGESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA A PARTIR DA LIXIVIAÇÃO DO SOLO | | LIXIVIAÇÃO PARA ÁGUA SUBTERRÂNEA | | | | |
| | | | VAPORES mg/kg | PARTÍCULAS mg/kg | | mg/kg | mg/kg | | mg/kg | | mg/kg | | mg/kg | mg/kg | | mg/kg | | mg/kg | | |
| 1 | 127-18-4 | Tetrachloroethylene | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 3,01E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 7,93E+01 | 0 | - 0 | - 0 | | | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,21E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 2,63E+01 | 0 | - 0 | - 0 | | | |
| 2 | 79-01-6 | Trichloroethylene | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,37E+03 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 5,03E+00 | 0 | - 0 | - 0 | | | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,01E+03 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 1,32E+00 | 0 | - 0 | - 0 | | | |
| 3 | 75-35-4 | Dichloroethylene, 1,1- | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 1,32E+02 | 0 | - 0 | - 0 | | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,01E+05 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 1,32E+02 | 0 | - 0 | - 0 | | |
| 4 | 156-59-2 | Dichloroethylene, cis-1,2- | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 4,03E+03 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | | |
| 5 | 156-60-5 | Dichloroethylene, trans-1,2- | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 4,03E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 2,63E+01 | 0 | - 0 | - 0 | | |
| 6 | 75-01-4 | Vinyl Chloride | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 8,78E+01 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 4,69E+00 | 0 | - 0 | - 0 | | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 6,04E+03 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 6,58E+01 | 0 | - 0 | - 0 | | |
| 7 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | - 0 | | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | | |
| 8 | 71-55-6 | Trichloroethane, 1,1,1- | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 3,29E+03 | 0 | - 0 | - 0 | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 4,03E+06 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | | |
| 9 | 79-00-5 | Trichloroethane, 1,1,2- | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,11E+03 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 2,48E+00 | 0 | - 0 | - 0 | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 8,06E+03 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 0 | 2,53E-01 | 0 | - 0 | - 0 | |
| 10 | 75-34-3 | Dichloroethane, 1,1- | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,11E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 1,29E+01 | 0 | - 0 | - 0 | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 4,03E+05 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | | |
| 11 | 107-06-2 | Dichloroethane, 1,2- | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 6,94E+02 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 7,93E-01 | 0 | - 0 | - 0 | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,21E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 0 | 4,60E+00 | 0 | - 0 | - 0 | |
| 12 | 75-00-3 | Ethyl Chloride (Chloroethane) | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 6,58E+03 | 0 | - 0 | - 0 | |
| 13 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 | - 0 | |
| 14 | 56-23-5 | Carbon Tetrachloride | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 9,03E+02 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 3,44E+00 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 8,06E+03 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 6,58E+01 | 0 | - 0 | - 0 |
| 15 | 67-66-3 | Chloroform | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 2,01E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 6,45E+01 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 3,16E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 2,06E+03 | 0 | - 0 | - 0 |
| 16 | 75-09-2 | Methylene Chloride | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 1,21E+04 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 3,95E+02 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | |
| 17 | 74-87-3 | Chloromethane | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 5,92E+01 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | |
| 18 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 19 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 20 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 21 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 22 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 23 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 24 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 25 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 26 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 27 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 28 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 29 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| 30 | | | C | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |
| | | | NC | - 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | - 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - 0 | - 0 |

Risco Máximo Aceitável para Substâncias Carcinogênicas
Quociente de Perigo Máximo Aceitável para Substâncias não Carcinogênicas

1,00E-05
1

| DATA: 0 | | | IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA: 0 | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--------------|-------------------------------|--|---|--------------------|----------------|-----------------|---|----------|---|-------------------|---|--------------------|---|-----------------|---|---|
| CETESB | CONTAMINANTE | EFEITO | CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS ACEITÁVEIS PARA ÁGUA SUBTERRÂNEA TRABALHADOR COMERCIAL E INDUSTRIAL | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | NO PONTO DE EXPOSIÇÃO | | | | | | | NA FONTE DE CONTAMINAÇÃO A UMA DISTÂNCIA DO PONTO DE EXPOSIÇÃO | | | | | | | |
| | | | INALAÇÃO | | | USO IRRESTRITO | | | | INALAÇÃO | | | USO IRRESTRITO | | | | |
| | | | AMBIENTES ABERTOS | | AMBIENTES FECHADOS | | CONTATO DÉRMICO | | INGESTÃO | | AMBIENTES ABERTOS | | AMBIENTES FECHADOS | | CONTATO DÉRMICO | | |
| CAS N° | | | mg/L | | mg/L | | mg/L | | mg/L | | mg/L | | mg/L | | mg/L | | |
| 1 | 127-18-4 | Tetrachloroethylene | C | - | 0 | 6,17E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 2,05E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 2 | 79-01-6 | Trichloroethylene | C | - | 0 | 4,93E+00 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 1,29E+00 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 3 | 75-35-4 | Dichloroethylene, 1,1- | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 4,37E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 4 | 156-59-2 | Dichloroethylene, cis-1,2- | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 5 | 156-60-5 | Dichloroethylene, trans-1,2- | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 2,15E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 6 | 75-01-4 | Vinyl Chloride | C | - | 0 | 1,19E+00 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 1,67E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 7 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 8 | 71-55-6 | Trichloroethane, 1,1,1- | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 2,10E+03 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 9 | 79-00-5 | Trichloroethane, 1,1,2- | C | - | 0 | 1,05E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 1,07E+00 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 10 | 75-34-3 | Dichloroethane, 1,1- | C | - | 0 | 1,71E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 11 | 107-06-2 | Dichloroethane, 1,2- | C | - | 0 | 3,75E+00 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 2,17E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 12 | 75-00-3 | Ethyl Chloride (Chloroethane) | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 3,99E+03 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 13 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 14 | 56-23-5 | Carbon Tetrachloride | C | - | 0 | 1,60E+00 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 3,06E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 15 | 67-66-3 | Chloroform | C | - | 0 | 1,80E+00 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 1,29E+02 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 16 | 75-09-2 | Methylene Chloride | C | - | 0 | 3,60E+03 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 6,89E+02 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 17 | 74-87-3 | Chloromethane | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | 3,68E+01 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 18 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 19 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 20 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 21 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 22 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 23 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 24 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 25 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 26 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 27 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 28 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 29 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 30 | | | C | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| | | | NC | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |

**APÊNDICE B – CÁLCULO DE RISCO EM UM EXEMPLO HIPOTÉTICO COM
USO DAS PLANILHAS PARA AVALIAÇÃO DE RISCO DA CETESB**

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|--------------------------------|---|----------------------|---|-------------------------------------|----------------------|--|
| Data: | | Projeto/Identificação da área: | | | | | | |
| MODELO CONCEITUAL DE EXPOSIÇÃO | | | | | | | | |
| MEIO FÍSICO | | VIAS DE INGRESSO | | | TRABALHADOR COMERCIAL E INDUSTRIAL | | | |
| | | | | | RECEPTOR NA FONTE | RECEPTOR FORA DA FONTE | | |
| CAMINHOS DE EXPOSIÇÃO | SOLO | SUPERFICIAL | CONTATO DIRETO | INALAÇÃO | VAPORES | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | | PARTÍCULAS | <input type="checkbox"/> | NÃO APlicável | | |
| | | SUBSUPERFICIAL | | CONTATO DÉRMICO | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | | INGESTÃO | | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | | | | INGESTÃO DE VEGETAIS | | NÃO APlicável | | |
| | ÁGUA | SUBTERRÂNEA | INALAÇÃO | AMBIENTES ABERTOS | | <input type="checkbox"/> | NÃO APlicável | |
| | | | | AMBIENTES FECHADOS | | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | | | INGESTÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA A PARTIR DA LIXIVIAÇÃO | | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | SUPERFICIAL | CONTATO DIRETO | AMBIENTES ABERTOS | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | | AMBIENTES FECHADOS | | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| | AR | | CONTATO DÉRMICO | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | SEDIMENTO | | RECREAÇÃO | INGESTÃO | | <input type="checkbox"/> | NÃO APlicável | |
| | | | | INALAÇÃO | | <input type="checkbox"/> | | |
| | | | | CONTATO DÉRMICO | | <input type="checkbox"/> | | |

|  CETESB | | Data: 0 | | Identificação da área: 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|----------------------------|------------|--------------------------|------------------|------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|-----------|-----------------|--------------|----------|-----------------------|---|---|----------|----------|----------|----------|---------|--|
| | | PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | CAS N° | PM (g/mol) | CTE ADMENSIONAL DE HENRY | Densidade (g/ml) | Koc (L/kg) | Solubilidade (mg/L água) | DIFUSIVIDADE NO AR (cm²/s) | DIFUSIVIDADE NA ÁGUA (cm²/s) | PONTO DE FUSÃO (°C) | Kd (L/kg) | Meia Vida (ano) | PC (cm/hora) | Log Kow | Pressão de vapor (Pa) | Fator de Bioconcentração para Metais (raiz) | Fator de Bioconcentração para Metais (folhas/estrutura) | B | tevent | t* | FA | Volátil | |
| PARÂMETROS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Tetrachloroethylene | 127-18-4 | 165,83 | 7,24E-01 | 1,62E+00 | 9,49E+01 | 2,06E+02 | 5,05E-02 | 9,46E-06 | -2,23E+01 | 0,28 | 2,00E+00 | 0,0334 | 3,4000 | 1,85E+01 | | | 1,65E-01 | 8,92E+01 | 2,14E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 2 | Trichloroethylene | 79-01-6 | 131,39 | 4,03E-01 | 1,46E+00 | 6,07E+01 | 1,28E+03 | 6,87E-02 | 1,02E-05 | -8,47E+01 | 0,18 | 4,50E+00 | 0,0116 | 2,4200 | 6,90E+01 | | | 5,11E-02 | 5,72E+01 | 1,37E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 3 | Dichloroethylene, 1,1- | 75-35-4 | 96,94 | 1,07E+00 | 1,21E+00 | 3,18E+01 | 2,42E+03 | 6,63E-02 | 1,10E-05 | -1,23E+02 | 0,10 | 3,62E+01 | 0,0117 | 2,1300 | 6,00E+02 | | | 4,43E-02 | 3,67E+01 | 8,81E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 4 | Dichloroethylene, cis-1,2- | 156-59-2 | 96,94 | 1,67E-01 | 1,28E+00 | 3,96E+01 | 6,41E+03 | 8,84E-02 | 1,13E-05 | -8,00E+01 | 0,12 | 7,88E+00 | 0,0110 | 1,8600 | 2,00E+02 | | | 4,17E-02 | 3,67E+01 | 8,81E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 5 | Dichloroethylene, trans-1,2- | 156-60-5 | 96,94 | 3,83E-01 | 1,26E+00 | 3,96E+01 | 4,52E+03 | 8,76E-02 | 1,12E-05 | -4,98E+01 | 0,12 | 7,88E+00 | 0,0110 | 2,0900 | 3,31E+02 | | | 4,17E-02 | 3,67E+01 | 8,81E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 6 | Vinyl Chloride | 75-01-4 | 62,50 | 1,14E+00 | 9,11E-01 | 2,17E+01 | 8,80E+03 | 1,07E-01 | 1,20E-05 | -1,54E+02 | 0,07 | 7,88E+00 | 0,0084 | 1,3800 | 2,98E+03 | | | 2,55E-02 | 2,35E+01 | 5,65E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Trichloroethane, 1,1,1- | 71-55-6 | 133,41 | 7,03E-01 | 1,34E+00 | 1,29E+01 | 6,48E-02 | 9,60E-06 | -3,04E+01 | 0,13 | 1,50E+00 | 0,0126 | 2,4900 | 1,24E+02 | | | 5,60E-02 | 5,87E+01 | 1,41E+00 | 1,00E+00 | V | | |
| 9 | Trichloroethane, 1,1,2- | 79-00-5 | 133,41 | 3,37E-02 | 1,44E+00 | 6,07E+01 | 4,59E+03 | 6,69E-02 | 1,00E-05 | -3,66E+01 | 0,18 | 2,00E+00 | 0,0050 | 1,8900 | 2,30E+01 | | | 2,24E-02 | 5,87E+01 | 1,41E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 10 | Dichloroethane, 1,1- | 75-34-3 | 98,96 | 2,30E-01 | 1,18E+00 | 3,18E+01 | 5,04E+03 | 8,36E-02 | 1,06E-05 | -9,69E+01 | 0,10 | 9,86E-01 | 0,0068 | 1,7900 | 2,27E+02 | | | 2,58E-02 | 3,77E+01 | 9,04E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 11 | Dichloroethane, 1,2- | 107-06-2 | 98,96 | 4,82E-02 | 1,25E+00 | 3,96E+01 | 8,60E+03 | 8,57E-02 | 1,10E-05 | -3,55E+01 | 0,12 | 9,86E-01 | 0,0042 | 1,4800 | 7,89E+01 | | | 1,61E-02 | 3,77E+01 | 9,04E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 12 | Ethyl Chloride (Chloroethane) | 75-00-3 | 64,52 | 4,54E-01 | 8,90E-01 | 2,17E+01 | 6,71E+03 | 1,04E-01 | 1,16E-05 | -1,39E+02 | 0,07 | 1,53E-01 | 0,0061 | 1,4300 | 1,01E+03 | | | 1,88E-02 | 2,42E+01 | 5,80E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Carbon Tetrachloride | 56-23-5 | 153,82 | 1,13E+00 | 1,59E+00 | 4,39E+01 | 7,93E+02 | 5,71E-02 | 9,78E-06 | -2,30E+01 | 0,13 | 9,86E+01 | 0,0163 | 2,8300 | 1,15E+02 | | | 7,78E-02 | 7,64E+01 | 1,83E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 15 | Chloroform | 67-66-3 | 119,38 | 1,50E-01 | 1,49E+00 | 3,18E+01 | 7,95E+03 | 7,69E-02 | 1,09E-05 | -6,36E+01 | 0,10 | 4,93E+00 | 0,0068 | 1,9700 | 1,97E+02 | | | 2,87E-02 | 4,90E+01 | 1,88E+00 | 1,00E+00 | V | |
| 16 | Methylene Chloride | 75-09-2 | 84,93 | 1,33E-01 | 1,33E+00 | 2,17E+01 | 1,30E+04 | 9,99E-02 | 1,25E-05 | -9,51E+01 | 0,07 | 1,53E-01 | 0,0035 | 1,2500 | 4,35E+02 | | | 1,25E-02 | 3,14E+01 | 7,85E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 17 | Chloromethane | 74-87-3 | 50,49 | 3,61E-01 | 9,11E-01 | 1,32E+01 | 5,32E+03 | 1,24E-01 | 1,36E-05 | -9,77E+01 | 0,04 | 1,53E-01 | 0,0033 | 0,9100 | 4,30E+03 | | | 8,96E-03 | 2,02E+01 | 4,84E+01 | 1,00E+00 | V | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

|  CETESB | | PARÂMETROS TOXICOLÓGICOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------|------------------------------|-------------------|------------------|------|---------------|--------------|--------------|-----------------------------------|----------|------|--|--|
| | | CAS N° | EVIDÊNCIA DE CÂNCER | DOSE DE REFERÊNCIA (RfD) | | | | FATOR DE CARCINOGENICIDADE | | | ABD _{GI} | ABS _d | TIPO | IUR (ug/m³)-1 | RfCi (mg/m³) | Potabilidade | Fator Biodisponibilidade relativa | | | | |
| | | | | INGESTÃO | INALAÇÃO | DERMICO | RfD _o (mg/kg-day) | RfD _i (mg/kg-dia) | REFERÊNCIA | RfD _d (mg/kg-day) | REFERÊNCIA | | | | | | | | | | |
| PARÂMETROS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Tetrachloroethylene | 127-18-4 | C | 6,00E-03 | I | 1,14E-02 | I | 6,00E-03 | I | 2,10E-03 | 9,10E-04 | 2,10E-03 | 100% | | | 2,60E-07 | 4,00E-02 | 4,00E+01 | 1,00 | | |
| 2 | Trichloroethylene | 79-01-6 | C | 5,00E-04 | I | 5,71E-04 | I | 5,00E-04 | I | 4,60E-02 | 1,44E-02 | 4,60E-02 | 100% | | | 4,10E-06 | 2,00E-03 | 2,00E+01 | 1,00 | | |
| 3 | Dichloroethylene, 1,1- | 75-35-4 | NC | 5,00E-02 | I | 5,71E-02 | I | 5,00E-02 | I | | | | 100% | | | | 2,00E-01 | 3,00E+01 | | | |
| 4 | Dichloroethylene, cis-1,2- | 156-59-2 | NC | 2,00E-03 | I | | | 2,00E-03 | I | | | | 100% | | | | | 5,00E+01 | 1,00 | | |
| 5 | Dichloroethylene, trans-1,2- | 156-60-5 | NC | 2,00E-02 | I | 1,14E-02 | X | 2,00E-02 | I | | | | 100% | | | | 4,00E-02 | 5,00E+01 | 1,00 | | |
| 6 | Vinyl Chloride | 75-01-4 | C | 3,00E-03 | I | 2,86E-02 | I | 3,00E-03 | I | 7,20E-01 | 1,54E-02 | 7,20E-01 | 100% | | | 4,40E-06 | 1,00E-01 | 2,00E+00 | 1,00 | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Trichloroethane, 1,1,1- | 71-55-6 | NC | 2,00E+00 | I | 1,43E+00 | I | 2,00E+00 | I | | | | 100% | | | | 5,00E+00 | | 1,00 | | |
| 9 | Trichloroethane, 1,1,2- | 79-00-5 | C | 4,00E-03 | I | 5,71E-05 | X | 4,00E-03 | I | 5,70E-02 | 5,60E-02 | 5,70E-02 | 100% | | | 1,60E-05 | 2,00E-04 | | 1,00 | | |
| 10 | Dichloroethane, 1,1- | 75-34-3 | C | 2,00E-01 | P | | | 2,00E-01 | P | 5,70E-03 | 5,60E-03 | 5,70E-03 | 100% | | | 1,60E-06 | | | 1,00 | | |
| 11 | Dichloroethane, 1,2- | 107-06-2 | C | 6,00E-03 | X | 2,00E-03 | P | 6,00E-03 | X | 9,10E-02 | 9,10E-02 | 9,10E-02 | 100% | | | 2,60E-05 | 7,00E-03 | 1,00E+01 | 1,00 | | |
| 12 | Ethyl Chloride (Chloroethane) | 75-00-3 | NC | | | 2,86E+00 | I | | | | | | 100% | | | | 1,00E+01 | | 1,00 | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Carbon Tetrachloride | 56-23-5 | C | 4,00E-03 | I | 2,86E-02 | I | 4,00E-03 | I | 7,00E-02 | 2,10E-02 | 7,00E-02 | 100% | | | 6,00E-06 | 1,00E-01 | 4,00E+00 | 1,00 | | |
| 15 | Chloroform | 67-66-3 | C | 1,00E-02 | I | 2,80E-02 | A | 1,00E-02 | I | 3,10E-02 | 8,05E-02 | 3,10E-02 | 100% | | | 2,30E-05 | 9,80E-02 | 1,00E+02 | 1,00 | | |
| 16 | Methylene Chloride | 75-09-2 | C | 6,00E-03 | I | 1,71E-01 | I | 6,00E-03 | I | 2,00E-03 | 3,50E-05 | 2,00E-03 | 100% | | | 1,00E-08 | 6,00E-01 | 2,00E+01 | 1,00 | | |
| 17 | Chloromethane | 74-87-3 | NC | | | 2,57E-02 | I | | | | | | 100% | | </ | | | | | | |

PLANILHA DE ENTRADA DE DADOS

| PARÂMETROS | DESCRÍÇÃO | UNIDADE | TRABALHADOR COMERCIAL E INDUSTRIAL | | | ESPECÍFICO |
|--|---|----------------------------------|---|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| | | | REFERÊNCIA CETESB | VALORES ESPECÍFICOS | VALORES DE CÁLCULO | |
| Cenários Associados a Intrusão de Vapores | | | | | | |
| Ab | Área das Fundações | cm ² | 200.000 | | 200.000 | |
| Lb | Pé Direito | cm | 300 | | 300 | |
| Lcrk | Espessura das fundações/paredes de construções | cm | 15,00 | | 15,00 | |
| α | Fator de atenuação | - | 0,03 | | 0,03 | |
| Cenários Associados a Inalação de Vapores a partir do Solo e Água Subterrânea | | | | | | |
| Lss | Profundidade da Fonte no Solo Subsuperficial | cm | 100 | | 100 | |
| dss | Espessura do Solo Subsuperficial Impactado | cm | 345 | | 345 | |
| Wss | Largura do solo subsuperficial impactado | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| Lgw | Profundidade do Nível d'Água | cm | 450 | | 450 | |
| T | Temperatura da Água Subterrânea | K | 298 | | 298 | |
| Ww | Largura da área fonte na direção paralela ao fluxo da água subterrânea | cm | 1.000 | | 1.000 | |
| δgw | Espessura da pluma dissolvida na água subterrânea | cm | 200 | | 200 | |
| θT | Porosidade Total | - | 0,460 | | 0,460 | |
| ps | Densidade do Solo | g/cm ³ | 1,300 | | 1,300 | |
| foc | Fração de Carbono Orgânico no Solo | g-C/g-solo | 0,003 | | 0,003 | |
| Cenários Associados a Lixiviação do Solo Subsuperficial para Água Subterrânea | | | | | | |
| SIR | Taxa de infiltração no Solo | cm/ano | 66,10 | | 66,10 | |
| Cenários Associados ao Contato Direto com Solo superficial | | | | | | |
| Ls | Espessura do Solo Superficial Impactado | cm | 100 | | 100 | |
| A | Área de Emissão de Vapores | cm ² | 20.250.000 | | 20.250.000 | |
| Ws | Largura do solo superficial impactado | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| Cenários Associados ao Transporte de Contaminante em Meio Saturado | | | | | | |
| Sd | Espessura da Fonte na Água Subterrânea | cm | 200 | | 200 | |
| Sw | Largura da Fonte | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| i | Gradiente Hidráulico | - | 0,050 | | 0,050 | |
| K | Condutividade Hidráulica | cm/dia | 11,23 | | 11,23 | |
| x | Distância entre a área fonte na água subterrânea e o Ponto de Exposição | cm | 4.500 | | 4.500 | |
| θef | Porosidade Efetiva | cm ³ /cm ³ | 0,120 | | 0,120 | |

Risco Máximo Aceitável para Substâncias Carcinogênicas Quociente de Perigo Máximo Aceitável para Substâncias não Carcinogênicas

1,00E-0
1

| DATA: 0 | | IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA 0 | | RISCO CARCINOGENICO E NÃO CARCINOGENICO PARA ÁGUA SUBTERRÂNEA | | | | | | | | RISCO CUMULATIVO POR SQI PARA RECEPTOR NA FONTE DE CONTAMINAÇÃO | | RISCO CUMULATIVO POR SQI PARA RECEPTOR FORA DA FONTE DE CONTAMINAÇÃO | | | | | |
|---------|--------------|-------------------------------|------------------------------------|---|-----------------|----------|--|--------------------|-----------------|----------|---|---|----------|--|---|---|--|--|--|
| CAS N° | CONTAMINANTE | EFEITO | TRABALHADOR COMERCIAL E INDUSTRIAL | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | RECEPTOR NA FONTE DE CONTAMINAÇÃO | | | | RECEPTOR FORA DA FONTE DE CONTAMINAÇÃO | | | | | | | | | | | | |
| | | | INALAÇÃO | | CONTATO DIRETO | | INALAÇÃO | | CONTATO DIRETO | | | | | | | | | | |
| | | | AMBIENTES ABERTOS | AMBIENTES FECHADOS | CONTATO DÉRMICO | INGESTÃO | AMBIENTES ABERTOS | AMBIENTES FECHADOS | CONTATO DÉRMICO | INGESTÃO | | | | | | | | | |
| 1 | 127-18-4 | Tetrachloroethylene | C | - | 1,62E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 1,62E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 4,89E-02 | - | - | - | - | - | - | - | 4,89E-02 | - | - | | | | |
| 2 | 79-01-6 | Trichloroethylene | C | - | 2,03E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 2,03E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 7,76E-02 | - | - | - | - | - | - | - | 7,76E-02 | - | - | | | | |
| 3 | 75-35-4 | Dichloroethylene, 1,1- | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | 2,29E-02 | - | - | - | - | - | - | - | 2,29E-02 | - | - | | | | |
| 4 | 156-59-2 | Dichloroethylene, cis-1,2- | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 5 | 156-60-5 | Dichloroethylene, trans-1,2- | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | 4,64E-02 | - | - | - | - | - | - | - | 4,64E-02 | - | - | | | | |
| 6 | 75-01-4 | Vinyl Chloride | C | - | 8,38E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 8,38E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 5,97E-03 | - | - | - | - | - | - | - | 5,97E-03 | - | - | | | | |
| 7 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 8 | 71-55-6 | Trichloroethane, 1,1,1- | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | 4,76E-03 | - | - | - | - | - | - | - | 4,76E-03 | - | - | | | | |
| 9 | 79-00-5 | Trichloroethane, 1,1,2- | C | - | 9,54E-08 | - | - | - | - | - | - | - | 9,54E-08 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 9,35E-02 | - | - | - | - | - | - | - | 9,35E-02 | - | - | | | | |
| 10 | 75-34-3 | Dichloroethane, 1,1- | C | - | 5,86E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 5,86E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 11 | 107-06-2 | Dichloroethane, 1,2- | C | - | 2,67E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 2,67E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 4,60E-03 | - | - | - | - | - | - | - | 4,60E-03 | - | - | | | | |
| 12 | 75-00-3 | Ethyl Chloride (Chloroethane) | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | 2,51E-05 | - | - | - | - | - | - | - | 2,51E-05 | - | - | | | | |
| 13 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 14 | 56-23-5 | Carbon Tetrachloride | C | - | 6,25E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 6,25E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 3,27E-03 | - | - | - | - | - | - | - | 3,27E-03 | - | - | | | | |
| 15 | 67-66-3 | Chloroform | C | - | 5,55E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 5,55E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 7,73E-04 | - | - | - | - | - | - | - | 7,73E-04 | - | - | | | | |
| 16 | 75-09-2 | Methylene Chloride | C | - | 2,78E-07 | - | - | - | - | - | - | - | 2,78E-07 | - | - | | | | |
| | | | NC | - | 1,45E-01 | - | - | - | - | - | - | - | 1,45E-01 | - | - | | | | |
| 17 | 74-87-3 | Chloromethane | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2,71E-02 | - | - | | | |
| | | | NC | - | 2,71E-02 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 18 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 19 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 20 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 21 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 22 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 23 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 24 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 25 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 26 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 27 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 28 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 29 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| 30 | | | C | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |
| | | | NC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | | | |

| | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| RISCO CUMULATIVO POR CENÁRIO | SUBSTÂNCIAS CARCINOGENICAS | 0,00E+00 | 3,61E-06 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| | SUBSTÂNCIAS NÃO CARCINOGENICAS | 0,00E+00 | 4,81E-01 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |

Risco Máximo Aceitável para Substâncias Carcinogênicas
Quociente de Perigo Máximo Aceitável para Substâncias não Carcinogênicas

1,00E-05

1

**APÊNDICE C – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA RISCO FUTURO DAS
CONCENTRAÇÕES REMANESCENTES, APÓS ATINGIDAS AS METAS DE
REMEDIAÇÃO ALTERNATIVAS PROPOSTAS PARA UM CASO HIPOTÉTICO**

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA RISCO FUTURO DAS CONCENTRAÇÕES REMANESCENTES, APÓS ATINGIDAS AS METAS DE REMEDIAÇÃO ALTERNATIVAS PROPOSTAS PARA UM CASO HIPOTÉTICO: CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO A SOLO SUPERFICIAL POR INALAÇÃO

| ETENOS CLORADOS | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|--|--|--|
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C_M | C_{EQ_TCE} | C_{EQ_CV} | CC_X | CC_{EQ_TCE} | CC_{EQ_CV} | | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{TCE} /Kg | mg _{CV} /Kg | mol/Kg | mg _{TCE} /Kg | mg _{CV} /Kg | mg/Kg | | | |
| Tetracloroeteno | 6,00E+01 | 3,53E-04 | 4,59E+01 | 2,19E+01 | 3,53E-04 | 4,59E+01 | 2,19E+01 | - | NÃO | | |
| Tricloroeteno | 6,00E+01 | 4,62E-04 | 6,00E+01 | 2,86E+01 | 8,14E-04 | 1,06E+02 | 5,05E+01 | 1,01E+03 | NÃO | | |
| 1,1-dicloroeteno | 2,00E+01 | 2,06E-04 | NÃO SE APLICA | 1,28E+01 | 1,02E-03 | NÃO SE APLICA | 6,33E+01 | - | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 1,50E+01 | 1,55E-04 | NÃO SE APLICA | 9,59E+00 | 9,69E-04 | NÃO SE APLICA | 6,01E+01 | - | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 2,00E+01 | 2,06E-04 | NÃO SE APLICA | 1,28E+01 | 1,02E-03 | NÃO SE APLICA | 6,33E+01 | - | NÃO | | |
| Cloreto de vinila | 5,00E-01 | 8,06E-06 | NÃO SE APLICA | 5,00E-01 | 1,39E-03 | NÃO SE APLICA | 8,62E+01 | 8,78E+01 | NÃO | | |
| - | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C_M | C_{EQ_1,1-DCA} | C_{EQ_1,2-DCA} | CC_X | CC_{EQ_1,1-DCA} | CC_{EQ_1,2-DCA} | | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mg/Kg | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 4,00E+02 | 3,08E-03 | 3,05E+02 | 3,05E+02 | 3,08E-03 | 3,05E+02 | 3,05E+02 | - | NÃO | | |
| 1,1,2-tricloroetano | 4,00E+02 | 3,08E-03 | 3,05E+02 | 3,05E+02 | 3,08E-03 | 3,05E+02 | 3,05E+02 | - | NÃO | | |
| 1,1-dicloroetano | 1,00E+03 | 1,01E-02 | 1,00E+03 | NÃO SE APLICA | 1,63E-02 | 1,61E+03 | NÃO SE APLICA | 1,11E+04 | NÃO | | |
| 1,2-dicloroetano | 5,00E+01 | 5,05E-04 | NÃO SE APLICA | 5,00E+01 | 6,66E-03 | NÃO SE APLICA | 6,59E+02 | 6,94E+02 | NÃO | | |
| Cloreto de etila | - | - | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | 1,68E-02 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | - | NÃO | | |
| METANOS CLORADOS | | | | | | | | | | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | |
| | C | C_M | C_{EQ_TCM} | CC_{EQ_CM} | CC_X | CC_{EQ_TCM} | CC_{EQ_CM} | | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{TCM} /Kg | mg _{CM} /Kg | mol/Kg | mg _{TCM} /Kg | mg _{CM} /Kg | mg/Kg | | | |
| Tetracloroeteno de carbono | 9,03E+02 | 6,02E-03 | 7,22E+02 | 3,01E+02 | 6,02E-03 | 7,22E+02 | 3,01E+02 | - | NÃO | | |
| Clorofórmio | 1,30E+03 | 1,08E-02 | 1,30E+03 | 5,42E+02 | 1,69E-02 | 2,02E+03 | 8,43E+02 | 2,04E+03 | NÃO | | |
| Diclorometano | 1,21E+04 | 1,42E-01 | NÃO SE APLICA | 7,12E+03 | 1,69E-02 | NÃO SE APLICA | 8,43E+02 | - | NÃO | | |
| Cloreto de metila | - | - | NÃO SE APLICA | - | 1,59E-01 | NÃO SE APLICA | - | - | NÃO | | |

LEGENDA:

C = concentração

C = concentração acumulada

EQ_TCE = concentração equivalente de tricloroeteno

EQ_CV = concentração equivalente de cloreto de vinila

EQ_1,1-DCA = concentração equivalente de 1,1-dicloroetano

EQ_1,2-DCA = concentração equivalente de 1,2-dicloroetano

EQ_TCM = concentração equivalente de clorofórmio

EQ_CM = concentração equivalente de cloreto de metila

CMA = concentração máxima aceitável calculada para o cenário de exposição

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA RISCO FUTURO DAS CONCENTRAÇÕES REMANESCENTES, APÓS ATINGIDAS AS METAS DE REMEDIAÇÃO ALTERNATIVAS PROPOSTAS PARA UM CASO HIPOTÉTICO: CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO A SOLO SUBSUPERFICIAL POR INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO

| COMPOSTO | ETENOS CLORADOS | | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
|--------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | | | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_TCE} | C _{EQ_CV} | CC _X | CC _{EQ_TCE} | CC _{EQ_CV} | | | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{TCE} /Kg | mg _{CV} /Kg | mol/Kg | mg _{TCE} /Kg | mg _{CV} /Kg | mg/Kg | | | | |
| Tetracloroeteno | 5,77E-01 | 3,39E-06 | 4,41E-01 | 2,10E-01 | 3,39E-06 | 4,41E-01 | 2,10E-01 | - | | NÃO | | |
| Tricloroeteno | 4,40E-01 | 3,38E-06 | 4,40E-01 | 2,10E-01 | 6,78E-06 | 8,81E-01 | 4,20E-01 | 1,32E+00 | | NÃO | | |
| 1,1-dicloroeteno | 2,00E+00 | 2,06E-05 | NÃO SE APLICA | 1,28E+00 | 2,74E-05 | NÃO SE APLICA | 1,70E+00 | - | | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 1,90E+00 | 1,96E-05 | NÃO SE APLICA | 1,21E+00 | 2,64E-05 | NÃO SE APLICA | 1,63E+00 | - | | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 2,00E+00 | 2,06E-05 | NÃO SE APLICA | 1,28E+00 | 2,74E-05 | NÃO SE APLICA | 1,70E+00 | - | | NÃO | | |
| Cloreto de vinila | 4,69E-01 | 7,56E-06 | NÃO SE APLICA | 4,69E-01 | 7,52E-05 | NÃO SE APLICA | 4,66E+00 | 4,69E+00 | | NÃO | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_1,1-DCA} | C _{EQ_1,2-DCA} | CC _X | CC _{EQ_1,1-DCA} | CC _{EQ_1,2-DCA} | mg/Kg | | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mol/Kg | mg _{1,1-DCA} /Kg | mg _{1,2-DCA} /Kg | mg/Kg | | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 3,90E-01 | 3,00E-06 | 2,97E-01 | 2,97E-01 | 3,00E-06 | 2,97E-01 | 2,97E-01 | - | | NÃO | | |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,30E-01 | 1,00E-06 | 9,90E-02 | 9,90E-02 | 1,00E-06 | 9,90E-02 | 9,90E-02 | - | | NÃO | | |
| 1,1-dicloroetano | 6,45E+00 | 6,52E-05 | 6,45E+00 | NÃO SE APLICA | 6,92E-05 | 6,85E+00 | NÃO SE APLICA | 1,29E+01 | | NÃO | | |
| 1,2-dicloroetano | 3,95E-01 | 3,99E-06 | NÃO SE APLICA | 3,95E-01 | 7,99E-06 | NÃO SE APLICA | 7,91E-01 | 7,93E-01 | | NÃO | | |
| Cloreto de etila | 6,58E+03 | 1,01E-01 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | 1,01E-01 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | - | | NÃO | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | | ACUMULADA | | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_TCM} | CC _{EQ_CM} | CC _X | CC _{EQ_TCM} | CC _{EQ_CM} | mg/Kg | | | | |
| | mg/Kg | mol/Kg | mg _{TCM} /Kg | mg _{CM} /Kg | mol/Kg | mg _{TCM} /Kg | mg _{CM} /Kg | mg/Kg | | | | |
| Tetracloroeto de carbono | 5,60E-01 | 3,73E-06 | 4,48E-01 | 1,87E-01 | 3,73E-06 | 4,48E-01 | 1,87E-01 | - | | NÃO | | |
| Clorofórmio | 4,49E-01 | 3,74E-06 | 4,49E-01 | 1,87E-01 | 7,47E-06 | 8,97E-01 | 3,74E-01 | 8,97E-01 | | NÃO | | |
| Diclorometano | 5,05E+01 | 5,94E-04 | NÃO SE APLICA | 2,97E+01 | 7,47E-06 | NÃO SE APLICA | 3,74E-01 | - | | NÃO | | |
| Cloreto de metila | 2,90E+01 | 5,80E-04 | NÃO SE APLICA | 2,90E+01 | 1,18E-03 | NÃO SE APLICA | 5,91E+01 | 5,92E+01 | | NÃO | | |

LEGENDA:

C = concentração

C = concentração acumulada

EQ_TCE = concentração equivalente de tricloroeteno

EQ_CV = concentração equivalente de cloreto de vinila

EQ_1,1-DCA = concentração equivalente de 1,1-dicloroetano

EQ_1,2-DCA = concentração equivalente de 1,2-dicloroetano

EQ_TCM = concentração equivalente de clorofórmio

EQ_CM = concentração equivalente de cloreto de metila

CMA = concentração máxima aceitável calculada para o cenário de exposição

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA RISCO FUTURO DAS CONCENTRAÇÕES REMANESCENTES, APÓS ATINGIDAS AS METAS DE REMEDIAÇÃO ALTERNATIVAS PROPOSTAS PARA UM CASO HIPOTÉTICO: CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO A ÁGUA SUBTERRÂNEA POR INALAÇÃO DE VAPORES EM AMBIENTE FECHADO

| COMPOSTO | ETENOS CLORADOS | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
|----------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|----------|-------------------------------------|--|--|
| | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | ACUMULADA | | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_TCE} | C _{EQ_CV} | CC _X | CC _{EQ_TCE} | CC _{EQ_CV} | mg/L | | | |
| | mg/L | mol/Kg | mgTCE/L | mgCV/L | mol/Kg | mgTCE/L | mgCV/L | mg/L | | | |
| Tetracloroeteno | 5,63E-01 | 3,31E-06 | 4,31E-01 | 2,05E-01 | 3,31E-06 | 4,31E-01 | 2,05E-01 | - | NÃO | | |
| Tricloroeteno | 4,30E-01 | 3,31E-06 | 4,30E-01 | 2,05E-01 | 6,62E-06 | 8,61E-01 | 4,11E-01 | 1,29E+00 | NÃO | | |
| 1,1-dicloroeteno | 3,00E-01 | 3,09E-06 | NÃO SE APLICA | 1,92E-01 | 9,71E-06 | NÃO SE APLICA | 6,02E-01 | - | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-cis | 3,00E-01 | 3,09E-06 | NÃO SE APLICA | 1,92E-01 | 9,71E-06 | NÃO SE APLICA | 6,02E-01 | - | NÃO | | |
| 1,2-dicloroeteno-trans | 3,00E-01 | 3,09E-06 | NÃO SE APLICA | 1,92E-01 | 9,71E-06 | NÃO SE APLICA | 6,02E-01 | - | NÃO | | |
| Cloreto de vinila | 2,00E-01 | 3,23E-06 | NÃO SE APLICA | 2,00E-01 | 1,91E-05 | NÃO SE APLICA | 1,19E+00 | 1,19E+00 | NÃO | | |
| COMPOSTO | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | ACUMULADA | | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_1,1-DCA} | C _{EQ_1,2-DCA} | CC _X | CC _{EQ_1,1-DCA} | CC _{EQ_1,2-DCA} | mg/L | | | |
| | mg/L | mol/Kg | mg1,1-DCA/L | mg1,2-DCA/L | mol/Kg | mg1,1-DCA/L | mg1,2-DCA/L | mg/L | | | |
| 1,1,1-tricloroetano | 2,50E+00 | 1,92E-05 | 1,90E+00 | 1,90E+00 | 1,92E-05 | 1,90E+00 | 1,90E+00 | - | NÃO | | |
| 1,1,2-tricloroetano | 1,07E+00 | 8,23E-06 | 8,15E-01 | 8,15E-01 | 8,23E-06 | 8,15E-01 | 8,15E-01 | - | NÃO | | |
| 1,1-dicloroetano | 1,40E+01 | 1,41E-04 | 1,40E+01 | NÃO SE APLICA | 1,69E-04 | 1,67E+01 | NÃO SE APLICA | 1,71E+01 | NÃO | | |
| 1,2-dicloroetano | 1,00E+00 | 1,01E-05 | NÃO SE APLICA | 1,00E+00 | 3,76E-05 | NÃO SE APLICA | 3,72E+00 | 3,75E+00 | NÃO | | |
| Cloreto de etila | 3,99E+03 | 6,14E-02 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | 6,16E-02 | NÃO SE APLICA | NÃO SE APLICA | - | NÃO | | |
| COMPOSTO | METANOS CLORADOS | | | | | | | CMA | EXISTE POTENCIAL PARA RISCO FUTURO? | | |
| | CONCENTRAÇÃO REMANESCENTE | | | | | | | | | | |
| | INDIVIDUAL POR COMPOSTO | | | ACUMULADA | | | | | | | |
| | C | C _M | C _{EQ_TCM} | CC _{EQ_CM} | CC _X | CC _{EQ_TCM} | CC _{EQ_CM} | mg/L | | | |
| | mg/L | mol/Kg | mgTCM/L | mgCM/L | mol/Kg | mgTCM/L | mgCM/L | mg/L | | | |
| Tetracloroeteno de carbono | 8,00E-01 | 5,33E-06 | 6,40E-01 | 2,67E-01 | 5,33E-06 | 6,40E-01 | 2,67E-01 | - | NÃO | | |
| Clorofórmio | 9,00E-01 | 7,50E-06 | 9,00E-01 | 3,75E-01 | 1,28E-05 | 1,54E+00 | 6,42E-01 | 1,80E+00 | NÃO | | |
| Diclorometano | 4,65E+00 | 5,47E-05 | NÃO SE APLICA | 2,74E+00 | 6,75E-05 | NÃO SE APLICA | 3,38E+00 | - | NÃO | | |
| Cloreto de metila | 3,30E+01 | 6,60E-04 | NÃO SE APLICA | 3,30E+01 | 7,28E-04 | NÃO SE APLICA | 3,64E+01 | 3,68E+01 | NÃO | | |

LEGENDA:

C = concentração

C = concentração acumulada

EQ_TCE = concentração equivalente de tricloroeteno

EQ_CV = concentração equivalente de cloreto de vinila

EQ_1,1-DCA = concentração equivalente de 1,1-dicloroetano

EQ_1,2-DCA = concentração equivalente de 1,2-dicloroetano

EQ_TCM = concentração equivalente de clorofórmio

EQ_CM = concentração equivalente de cloreto de metila

CMA = concentração máxima aceitável calculada para o cenário de exposição