

ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL EM CENÁRIOS DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO: UMA AVALIAÇÃO METODOLÓGICA COMPARATIVA

Léa Lignani Xavier¹ & Celso de Oliveira Loureiro²

Resumo - Recentemente novas técnicas têm sido desenvolvidas objetivando a avaliação do risco ambiental em cenários de contaminação do solo. No Brasil, entretanto, ainda faltam metodologias próprias que levem em consideração as características típicas nacionais. O presente trabalho apresenta uma comparação entre três metodologias utilizadas na determinação dos riscos à saúde humana devido à contaminação do solo, a saber, as metodologias americanas RESRAD-CHEM e RBCA e a holandesa C-SOIL, as quais já vêm sendo utilizadas no Brasil por órgãos governamentais, universidades e empresas de consultoria. Para tanto, foram realizadas análises qualitativas e quantitativas destas três metodologias, com uma avaliação dos seus principais aspectos positivos e negativos, aplicadas em um cenário real de contaminação no solo por hidrocarbonetos derivados de petróleo. Através da avaliação quantitativa destas metodologias percebe-se uma divergência entre os valores medidos de concentração de contaminantes na água e os valores calculados através dos modelos implementados nas três metodologias. Em parte, esta divergência se deve à inadequação dos modelos de lixiviação no que se refere ao efeito de cossolvência do etanol, presente na gasolina brasileira. Pode-se concluir, entretanto, que apesar de algumas divergências nos conceitos e modelos das três metodologias, todas se mostraram aplicáveis para determinar o risco ambiental, em áreas contaminadas com hidrocarbonetos derivados de petróleo.

Abstract - Recently, new techniques have been developed aiming at the evaluation of environmental risk in soil contamination scenarios. However, Brazil still lacks methodologies that take into consideration the national characteristics. The present study has compared three methodologies used in risk analysis to the human health, due to the contamination in soil and groundwater, to know: the American methodologies named RESRAD-CHEM and RBCA; and the Dutch methodology named C-SOIL. Qualitative and quantitative analyses of these three methodologies were accomplished, applied to a site with gasoline-contaminated soil. The main

¹ Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG. - e-mail: lealignani@terra.com.br

² Ph.D., Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG. e-mail: celso@desa.ufmg.br - Endereço: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG. - Av. do Contorno, 842 Centro, CEP 30,110-060 Belo Horizonte - MG - Telefone: (31)- 3238 1880

positive and negative points of these methodologies were also presented. Through the quantitative evaluation of these methodologies, it was possible to notice a divergence among the measured values of concentration of pollutants in the water and the values calculated by the leaching models. This divergence was associated to the co-solvency effect of the ethanol, mixed in the Brazilian gasoline. In spite of some divergences in the concepts of these three methodologies, they were applicable in polluted areas to assessment the environmental risk to the human health.

Palavras-Chave – análise de risco; risco ambiental; contaminação do solo; RESRAD-CHEM; RBCA, C-SOIL.

INTRODUÇÃO

A preocupação em relação à presença de contaminantes no solo tem sido crescente, devido aos efeitos negativos que estes podem causar à saúde humana e ao meio ambiente em geral (i.e. o solo, o ar, a água, a fauna e a flora).

A grande complexidade da estrutura do solo e dos fenômenos físicos, químicos e físico-químicos envolvidos no escoamento das águas subterrâneas e no transporte de substâncias contaminantes neste meio são fatores que contribuem para que pequenas proporções de poluentes permaneçam durante anos no local afetado e aumentem, ainda mais, o risco associado à exposição humana. Acrescenta-se ainda que tal complexidade dificulta o emprego de procedimentos para definir e isolar inteiramente um determinado contaminante. Além dos fatores mencionados anteriormente, vale ressaltar que os gastos com a remediação crescem na medida em que os níveis de descontaminação tornam-se mais exigentes. Frente a tais dificuldades, durante o processo de remediação de locais contaminados, busca-se alcançar níveis mínimos aceitáveis de descontaminação do terreno (FETTER, 1999). Para tanto, usualmente, são estabelecidos critérios baseados na redução de riscos reais (i.e. riscos à saúde do homem; ao patrimônio; ou, ao meio ambiente em geral), configurando um estudo conhecido como análise de risco.

No Brasil, apesar disso, é recente o uso de avaliações de risco como um procedimento complementar para determinação dos impactos gerados devido à contaminação do solo e das águas subterrâneas e, também, como um instrumento auxiliar na decisão sobre eventuais medidas de remediação. Apesar de esforços individuais realizados neste sentido, em São Paulo (CASARINI, et al. 2001) e em Santa Catarina (FINOTTI, 1997), ainda não foram desenvolvidas metodologias nacionais que implementem modelos que se aplicam às condições eventualmente diferenciadas do país.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar uma avaliação comparativa sobre três procedimentos usualmente empregados no desenvolvimento de análises de risco em cenários de contaminação do solo, quais sejam: RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL. Para tanto, foi realizada uma revisão da literatura relevante ao assunto, seguida da aplicação destas metodologias em um cenário real de contaminação de solo e de águas subterrâneas por hidrocarbonetos derivados de petróleo.

REVISÃO DE LITERATURA

O significado da palavra risco abrange uma série de conceitos os quais podem variar conforme a área a qual este se relaciona, tais como a engenharia, o meio jurídico ou em abordagens coloquiais do dia-a-dia. Neste sentido, existem diferentes tipos de riscos, os quais podem focar assuntos relacionados ao meio ambiente, aos sistemas ecológicos, à segurança humana, à saúde pública, aos valores patrimoniais e à economia.

Com relação aos riscos ambientais, determinados através da engenharia, é válida a distinção entre o risco relativo à ocorrência de acidentes, em si, e o risco relativo à ocorrência de efeitos negativos, ao meio ambiente e à saúde do homem, gerados a partir de um acidente ou de uma contaminação já existentes.

Cabe ressaltar que, no presente trabalho, a análise dos riscos ambientais se restringe apenas à avaliação dos riscos após a constatação da existência de um cenário de contaminação no solo e nas águas subterrâneas. Este tipo de risco representa a probabilidade da ocorrência de efeitos negativos à saúde devido à exposição a uma contaminação já existente. Nestes casos, o estabelecimento de uma condição de risco ambiental depende da existência e da interação de três elementos fundamentais, quais sejam: (1) a fonte de contaminação; (2) o receptor; e, (3) as vias de exposição. Deste modo, para que haja a presença do risco todos estes três elementos devem coexistir, ou seja, a ausência de qualquer um destes implica na ausência do risco.

A quantificação do risco potencial à saúde humana e ao meio ambiente, devido à exposição aos contaminantes, é um processo complexo que envolve tanto as variáveis que caracterizam o meio físico quanto aquelas que caracterizam os prováveis receptores (US EPA, 1989). Neste processo é analisada a relação entre o cenário real de contaminação do solo e das águas subterrâneas, os cenários reais ou hipotéticos de uso e ocupação do meio físico no entorno e, finalmente, é determinado o risco potencial à saúde humana e ao meio ambiente.

Em virtude da complexidade dos modelos, e das variáveis que envolvem a determinação dos riscos associados à contaminação no solo, novas metodologias de análise de risco vêm sendo desenvolvidas e codificadas em rotinas computacionais, as quais facilitam a avaliação dos riscos

como, por exemplo, as metodologias a serem aqui analisadas, quais sejam: (1) RESRAD-CHEM; (2) Ação Corretiva Baseada no Risco, mais conhecida como RBCA; e, (3) C-SOIL.

RESRAD-CHEM é uma metodologia de análise de risco à saúde humana destinada a auxiliar na avaliação de áreas contaminadas por compostos químicos. Tal procedimento faz parte das metodologias de análise de risco denominadas “*família RESRAD*”, as quais foram desenvolvidas e codificadas, em modelos computacionais, pela Divisão de Avaliação Ambiental do Laboratório Nacional de Argonne dos Estados Unidos (ANL, 1997; YU et al., 2001).

Já a metodologia de Ação Corretiva Baseada em Risco – RBCA foi desenvolvida pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (“*ASTM - American Society for Testing and Materials*”), como um procedimento para avaliar os critérios de limpeza e remediação em áreas contaminadas (ASTM, 1995; ASTM 2000).

Paralelamente aos trabalhos realizados nos Estados Unidos, a Holanda tem desenvolvido um programa para a avaliação de contaminação do solo e das águas subterrâneas e o estabelecimento de valores orientadores de níveis de intervenção. Como consequência destas ações, foi elaborado um procedimento de avaliação de risco denominado C-SOIL, sendo este desenvolvido pelo Ministério da Habitação, Planejamento e Meio Ambiente da Holanda (VROM), em 1991, e revisado em 1994 (BERG, 1994).

No Brasil, tanto o RESRAD-CHEM quanto o RBCA e o C-SOIL já vem sendo utilizados por algumas empresas de consultoria para a aplicação em casos de contaminação no solo e nas águas subterrâneas (*e.g.* KOLESNIKOVAS & DUARTE 1998; HART 2000). A Câmara do Comércio e Derivados de Petróleo de São Paulo, por exemplo, propôs, com o auxílio do RBCA, valores orientadores para hidrocarbonetos para o estado de São Paulo (CACDP, 2000). Paralelamente, a metodologia C-SOIL vem sendo utilizada pelo estado de São Paulo, através da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), para a derivação de valores orientadores de contaminantes no solo, para este estado (CAPELETI et al., 1998; DIAS et al., 1998; CASARINI, et al. 2001). Outras referências importantes são as pesquisas realizadas na Universidade Federal de Santa Catarina as quais empregam o RBCA em casos específicos de contaminação do solo e das águas subterrâneas por hidrocarbonetos de petróleo e etanol (*e.g.* FINOTTI, 1997; CORSEUIL e FERNANDES, 1999).

METODOLOGIA

Neste trabalho, as metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL foram descritas e comparadas, a fim de se avaliar a possibilidade de sua implementação em áreas contaminadas no Brasil. Para tanto, foi adotado um procedimento geral, conforme descrito nos itens seguintes, que

permitiu a avaliação e comparação destas três metodologias de análise de risco. Também foi verificada a necessidade de adaptações dos modelos, sugeridas pelas metodologias avaliadas, à chamada “realidade brasileira”. Neste contexto, cabe observar que a chamada “realidade brasileira”, de um modo geral, pode ser entendida como todas as características que diferenciam o Brasil dos outros países, tais como: população, tipo de solo, clima e composição da gasolina. Ademais, estas características brasileiras podem ser diferenciadas em dois grupos distintos, a saber: (1) aquelas que não influenciam intrinsecamente os modelos implementados nas metodologias de análise de risco; e, (2) aquelas que influenciam intrinsecamente na validade destes mesmos modelos.

Definição do cenário de contaminação e de exposição

A primeira etapa do estudo consistiu na seleção de uma área contaminada que representasse um cenário típico de contaminação de solo, no Brasil, com produtos hidrocarbonetos derivados de petróleo. Neste sentido, a escolha de um caso real de contaminação do solo decorrente de vazamentos de gasolina brasileira mostrou-se relevante devido ao grande número de postos de abastecimento de combustíveis e à precariedade dos sistemas de armazenamento existentes, ainda hoje, em muitos destes estabelecimentos. Outro motivo importante é que a gasolina brasileira, diferentemente das demais gasolinas comercializadas internacionalmente, é misturada em média a $22\pm 2\%$ de etanol (CORSEUIL & MARINS, 1997; OLIVEIRA, 1999).

Foi realizada, então, uma revisão das informações necessárias para a caracterização da região selecionada, considerando os aspectos físicos locais que influenciam na liberação e no transporte de contaminantes no meio ambiente, tais como: a geologia; a hidrogeologia; e a hidrologia.

Apresenta-se na Tabela 1 um esquema da caracterização do local. Para a caracterização da fonte de contaminação procurou-se resgatar as seguintes informações:

- dimensão da fonte de contaminação;
- seleção dos compostos químicos de interesse;
- determinação das concentrações das substâncias selecionadas;
- descrição dos parâmetros físico-químicos dos elementos (*e.g.* coeficiente de partição, fração de carbono orgânico, coeficiente de distribuição); e,
- definição das propriedades toxicológicas e organolépticas dos compostos de interesse.

Já na Tabela 2 é apresentado um esquema da caracterização da contaminação no solo e nas águas subterrâneas na região do posto de distribuição de combustíveis, onde ocorreu o vazamento.

Cabe observar que o critério adotado para a escolha do valor da concentração no solo corresponde ao maior valor amostrado e medido no local. Já o valor da concentração na água corresponde a um valor amostrado num ponto coincidente, ou muito próximo, ao ponto correspondente à amostra escolhida para o solo.

A substância selecionada, como composto químico de interesse a esta análise de risco à saúde humana, através das metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL, foi o hidrocarboneto monoaromático benzeno. Isto porque, o composto benzeno é fortemente tóxico à saúde humana (*e.g.* afeta o sistema nervoso central; pode causar leucemia em concentrações crônicas, entre outros), além do fato de ser um produto cuja solubilidade em água ($1,75 \times 10^{-3}$ mg/L) excede os limites de potabilidade em água (5×10^{-3} mg/L), estabelecidos pelo Ministério da Saúde (2000).

Nas Tabelas 3 e 4, a seguir, estão apresentados os parâmetros físico-químicos e as principais características toxicológicas relacionadas ao benzeno.

Tabela 1 - Caracterização do local

<i>Item</i>	<i>Unid.</i>	<i>Descrição</i>
Fonte		Contaminação no solo devido a vazamentos de gasolina no sistema de abastecimento de um posto de distribuição de combustíveis (“Posto Genérico”)
Localização	--	Próximo ao Distrito Federal
Litologia	--	Grupo Paranoá
Pedologia	--	Latosolo vermelho escuro
Geologia estrutural	--	Fraturas na direção N70 e com caimento para NE
Tipo climático	--	Tropical
Temperatura média	°C	21,5
Velocidade dos ventos	m/s	3,4
Precipitação média	mm/ano	1500
Evapotranspiração	mm/ano	900
Recarga	mm/ano	165
<i>Domínio Aquífero Poroso</i>		
Sistemas		P ₁ (latossolo vermelho escuro) e Q ₃₁ (areia inconsolidada)
Condutividade hidráulica horizontal – K	Cm/s	3,35E-03
Condutividade hidráulica vertical – Kv	Cm/s	2,58E-03
Gradiente hidráulico	%	3%
Nível d’água médio	M	5
Densidade do solo	g/cm ³	1,70
Fração de carbono orgânico	--	1,00E-03
Porosidade total do solo	--	3,80E-01
pH solo/água subterrânea	--	6,80
Dispersividade longitudinal	m	10
Dispersividade transversal	m	1,00E-03
Dispersividade vertical	m	1,00E-04

Tabela 2 - Caracterização da contaminação no solo e nas águas subterrâneas

<i>Item</i>	<i>Unid.</i>	<i>Descrição</i>
Contaminação no solo		
Concentração no solo (S-22)	mg/kg	B= 0,033
Área de contaminação no solo	m ²	4,88E+03
Comprimento máximo, paralelo ao fluxo de água subterrânea	m	140
Largura máxima	m	100
Espessura	m	4,5
Profundidade mínima do topo	m	1,0
Profundidade máxima da base	m	5,5
Contaminação na água		
Concentração na água (S-27)	µg/L	B=500
Profundidade máxima	m	12

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos do composto químico de interesse Benzeno

Benzeno		
<i>Item</i>	<i>Unid</i>	<i>Descrição</i>
nº de registro CAS	---	71-43-2
Fórmula geral	---	C ₆ H ₆
Estrutura	---	
Peso molecular	[g/mol]	78,1
Solubilidade (20-25oC)	[mg/L]	1,75E+03 ^(a)
Pressão de vapor(20-25oC)	[mmHg]	9,52E+01 ^(a)
Coef. de difusão no ar	[cm ² /s]	8,80E-02 ^(a)
Coef. de difusão na água	[cm ² /s]	9,80E-06 ^(a)
Coef. de partição orgânico	log K _{oc}	1,77 ^(a)
Coef.de partição octanol-água	log K _{ow}	2,13 ^(a)
Constante de Henry	[atm·m ³ /mol]	5,55E-03 ^(a)

(a)ASTM,2000

Tabela 4 - Propriedades toxicológicas e organolépticas do Benzeno

Benzeno		
<i>Item</i>	<i>unid</i>	<i>descrição</i>
Classificação de carcinogenicidade	---	A ^(b)
Dose de referência oral – RfD	[mg/kg d]	4,00E-03 ^(b)
Concentração de referência inalação – RfC	[mg/m ³]	3,00E-02 ^(b)
Fator de carcinogenicidade oral – Sfo	[1/(mg/kg. d)]	2,90E-02 ^(a)
Fator de carcinogenicidade inalação – Sfi	[1/(mg/kg. d)]	2,90E-02 ^(a)
Fator de unidade de risco inalação	[1/(µg/m ³)]	8,3E-06 ^(b)
Limite de percepção de odor	mg/m ³	5,00E-01 ^(c)
Limite de potabilidade	[µg/L]	5 ^(d)

a) ASTM, 2000; (b) IRIS, 2003; (c) CASARINI, et al. 2001; (d); Ministério da Saúde, 2000.

Após a caracterização do cenário de contaminação, foi definido, então, o cenário de exposição, o qual envolve tanto as características da população exposta como as prováveis maneiras (vias de exposição) em que os contaminantes podem ingressar no corpo humano.

Com base numa revisão sobre algumas características da população regional (*e.g.* hábitos alimentares, flutuação, prováveis uso e ocupação do local, sensibilidade da população exposta, peso corpóreo e expectativa de vida) foram elaborados três cenários hipotéticos de uso e ocupação do meio físico no entorno do local, quais sejam:

- Cenário A – uso pleno da região, inclusive com utilização de água subterrânea local (*e.g.* residências urbano-rurais, pequenos sítios);
- Cenário B - uso comercial da região (*e.g.* lojas de conveniência em torno do posto); e,
- Cenário C - uso recreativo da área (*e.g.* parques, praças, campos esportivos).

Observa-se que, para cada um destes cenários de uso e ocupação, foram também definidas as características específicas da população exposta e as conseqüentes vias de exposição. Cabe ressaltar ainda que, com relação ao caso de contaminação especificamente selecionado para este trabalho, atentou-se para o cuidado de respeitar a privacidade da população exposta, bem como dos órgãos e empresas envolvidas na questão.

Aplicação das metodologias de análise de risco em um estudo de caso

O principal objetivo desta etapa foi avaliar os resultados produzidos através das três metodologias de análise de risco em questão. Deste modo, considerando um determinado cenário de contaminação e exposição, para cada metodologia, buscou-se:

- calcular as concentrações de contaminantes nos vários pontos de exposição;
- identificar e especificar as respectivas vias de exposição;

- calcular as doses absorvidas;
 - realizar uma avaliação de dose-resposta;
 - calcular os riscos associados à contaminação;
 - determinar os valores máximos aceitáveis de contaminantes no solo e na água subterrânea;
- e,
- comparar os resultados calculados para os valores máximos aceitáveis de contaminação com as medidas reais obtidas no local.

Os códigos computacionais especificamente utilizados no estudo, durante a aplicação prática das três metodologias de análise de risco analisadas, foram os seguintes:

- RESRAD-CHEM, código desenvolvido pela US.DOE/EAD, exclusivo para a aplicação da metodologia RESRAD-CHEM;
- RBCA Tool Kit Chemical Releases versão 1.2, código computacional, implementado em planilha Excel, desenvolvido pela Groundwater Services Inc., para a aplicação da metodologia RBCA; e,
- XS v70UK, código computacional, implementada em planilha Excel, desenvolvido pela Tawn Milieu, para aplicação da metodologia C-SOIL.

Avaliação comparativa das três metodologias aplicadas

Finalmente, considerando toda a avaliação conforme proposto anteriormente, as três metodologias de análise de risco foram comparadas, através dos seguintes passos:

- identificação esquemática dos resultados provenientes do estudo de caso;
- comparação dos resultados obtidos em cada metodologia de análise de risco, para cada cenário especificado;
- comparação dos principais modelos de cálculo utilizados em cada metodologia;
- avaliação qualitativa e quantitativa das principais diferenças constatadas;
- identificação das principais vantagens e desvantagens quanto ao uso de cada metodologia analisada;
- avaliação da aplicabilidade destas metodologias; e,
- verificação da necessidade de adaptações, das metodologias e de seus respectivos modelos de cálculo, à realidade brasileira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparação qualitativa

Através de uma análise comparativa qualitativa das metodologias de análise de risco RESRAD-C, RBCA e C-SOIL, observou-se algumas semelhanças em suas propostas fundamentais. Todas as três metodologias avaliadas propõem basicamente quatro etapas de avaliação, quais sejam: (1) avaliação do cenário de contaminação; (2) avaliação da exposição; (3) identificação dos fatores toxicológicos de risco; e, (4) caracterização do risco à saúde humana. Além disto, tais metodologias implementam modelos que descrevem o processo de transporte de contaminantes no meio e as doses de absorção dos mesmos por um receptor crítico, através de diferentes vias de exposição.

Por outro lado, as metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL implementam algumas particularidades em suas propostas e modelos. Dentre tais particularidade cabe citar os principais pontos fortes destas três metodologias, a saber :

RESRAD-CHEM:

- implementa modelos que possibilitam avaliar a variação da fonte e dos riscos ao longo do tempo; e,
- implementa modelos que permitem a avaliação de vias de exposição aos alimentos contaminados; como também vias de exposição à ingestão de água impactada seja água subterrânea ou água superficial;

RBCA:

- propõe que as análises de risco sejam realizadas em níveis progressivos de avaliação (Nível 1, Nével 2 e Nível 3), sendo assim, as análises variam de simples a complexas, conforme a necessidade da obtenção de novas informações e de novos métodos de análise;
- implementa modelos que permitem que uma avaliação da contaminação na água subterrânea efetivamente medida no local em paralelo à contaminação no solo e os processos de lixiviação atuantes no meio;
- implementa modelos que descrevem os processos de degradação dos contaminantes;
- em níveis de avaliação mais avançados (Nível 2 e Nível 3), sugere a avaliação dos efeitos deletérios à saúde de receptores localizados fora da zona contaminada, através da implementação de modelos que descrevem o transporte de contaminantes no solo na água e no ar; e,

C-SOIL:

- implementa vias de exposição relacionadas à ingestão de vegetais contaminados localmente;
- implementa modelos que permitem a avaliação da contaminação da água de abastecimento público através das tubulações enterradas.

Dentre os aspectos considerados mais precários nestas metodologias, cabe mencionar que o principal ponto fraco da metodologia RBCA é que esta não implementa modelos que permitem a avaliação das vias de exposição relacionadas aos alimentos contaminados. Já as metodologias RESRAD-CHEM e C-SOIL não incorporam modelos a serem utilizados em níveis progressivos de detalhamento.

Comparação quantitativa

A Tabela 5 apresenta um esquema dos riscos carcinogênicos calculados em cada uma das metodologias aplicadas, devido à contaminação no solo e na água subterrânea, na região circunvizinha ao local estudado, para os cenários de exposição urbano rural, comercial e recreativo.

Tabela 5 - Total dos riscos carcinogênicos calculados nas metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL considerando as características de contaminação no solo

<i>Cenário de exposição</i>	<i>Riscos carcinogênicos</i>		
	<i>RESRAD-CHEM</i>	<i>RBCA</i>	<i>C-SOIL</i>
Cenário A- Urbano Rural	2,2E-05	8,63E-06	2,48E-05
Cenário B – Comercial	1,0E-09	9,59E-07	1,94E-06
Cenário C – Recreativo	4,0E-10	6,60E-09	1,21E-08

Com base nestes resultados são feitas as seguintes observações:

- para o Cenário A– urbano rural, onde é considerado o uso pleno da região, os riscos obtidos nas três metodologias RESRAD-CHEM ($2,29 \times 10^{-5}$), RBCA ($8,63 \times 10^{-6}$) e C-SOIL ($2,48 \times 10^{-5}$) se mostraram semelhantes entre si, variando em menos de uma ordem de grandeza;
- para o Cenário B–comercial, onde a ingestão de água contaminada não é relevante, os resultados obtidos através da metodologia RESRAD-CHEM ($1,0 \times 10^{-9}$) foram cerca de três ordens de grandeza inferiores aos obtidos no RBCA ($9,59 \times 10^{-7}$) e no C-SOIL ($1,94 \times 10^{-6}$); e,
- para o Cenário C–recreativo, os resultados são diferentes entre si, em todas as metodologias avaliadas, a saber, RESRAD-CHEM ($4,00 \times 10^{-10}$), RBCA ($6,60 \times 10^{-9}$) e C-SOIL ($1,21 \times 10^{-8}$), sendo aqueles obtidos no RESRAD-CHEM os menores.

A Figura 1 a seguir representa um esquema gráfico de comparação entre os resultados obtidos através das metodologias de análise de risco RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL para os três cenários avaliados neste estudo.

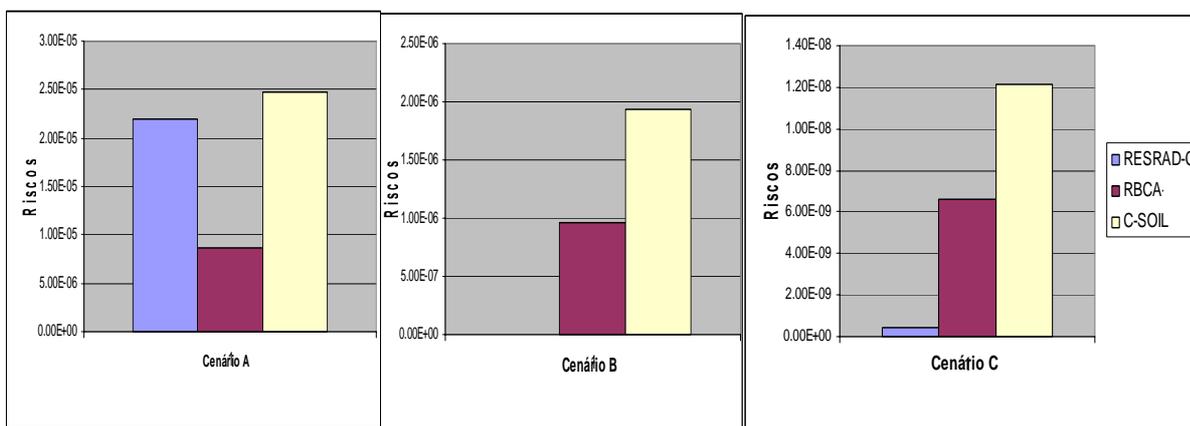


Figura 1 - Comparação dos riscos carcinogênicos calculados nas metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL, considerando as características de contaminação no solo.

No cenário A, o elemento crítico de risco se deve aos fatores dependentes da água contaminada que são, em média, uma ordem de grandeza superiores aos fatores independentes da água. Neste caso, como os procedimentos implementados na formulação dos modelos de exposição referentes à ingestão de água subterrânea contaminada são semelhantes nas três metodologias aplicadas, os resultados finais de risco também se mostraram semelhantes.

Nos casos do cenário B-comercial e do cenário C-recreativo, onde as vias de exposição dependentes da água subterrânea não são relevantes, o RESRAD-CHEM se mostrou menos conservador do que o RBCA e do que o C-SOIL. Verificou-se então que os modelos de exposição empregados, no RESRAD-CHEM, para as vias de exposição independentes da água subterrânea, são, intrinsecamente, menos conservadores do que aqueles implementados nas outras duas metodologias.

Para os três cenários avaliados, a metodologia C-SOIL apresentou resultados mais conservadores, sendo estes cerca de uma ordem de grandeza superiores àqueles obtidos através da metodologia RBCA.

Como citado anteriormente, a metodologia de análise de risco RBCA implementa modelos específicos que possibilitam avaliações em que as características de contaminação na água subterrânea observadas localmente são incorporadas paralelamente à contaminação no solo e aos processos de lixiviação. Neste sentido, os resultados gerados através das metodologias RESRAD-CHEM e C-SOIL foram então comparados com aqueles gerados através da aplicação diferenciada da metodologia RBCA, em que a contaminação na água subterrânea efetivamente medida no local foi incorporada aos cálculos.

A Tabela 6 apresenta dados comparativos dos resultados das análises de risco obtidas através das metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL, em que a metodologia RBCA foi aplicada considerando-se os dados de contaminação na água subterrânea observados no local.

Tabela 6 - Total dos riscos carcinogênicos calculados em cada metodologia, sendo que, particularmente para o RBCA, as características de contaminação na água subterrânea também foram incorporadas

Cenário de exposição	Riscos carcinogênicos		
	RESRAD-CHEM	RBCA	C-SOIL
Cenário A- Urbano Rural	2,2E-05	1,69E-04	2,48E-05
Cenário B – Comercial	1,0E-09	7,37E-06	1,94E-06
Cenário C – Recreativo	4,0E-10	2,75E-07	1,21E-08

Além disto, na Figura 2 é apresentado um esquema gráfico que facilita a visualização da comparação entre os resultados obtidos em cada metodologia para cada cenário avaliado.

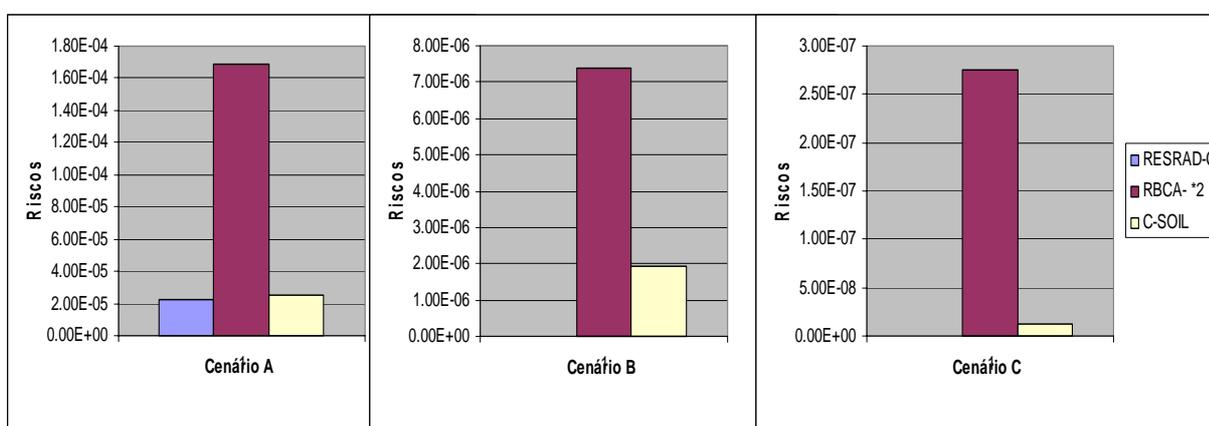


Figura 2 - Comparação dos riscos carcinogênicos calculados em cada metodologia, sendo que particularmente para o RBCA as características de contaminação na água subterrânea também foram incorporadas

Baseando-se nesta comparação, percebe-se que os riscos carcinogênicos calculados através da metodologia RBCA, para os três cenários de exposição, são sempre maiores do que aqueles obtidos no RESRAD-CHEM, e no C-SOIL. Neste sentido, cabe ainda se fazer as seguintes notações:

- para o Cenário A -urbano-rural o risco carcinogênico obtido no RBCA ($1,69 \times 10^{-4}$), é cerca de uma ordem de grandeza superior aos resultados obtidos no RESRAD-CHEM ($2,20 \times 10^{-5}$), e no C-SOIL ($2,48 \times 10^{-5}$);
- para o Cenário B-comercial o risco carcinogênico obtido no RBCA ($7,36 \times 10^{-6}$), é cerca de três ordens de grandeza superior ao resultado advindo da metodologia RESRAD-CHEM ($1,00 \times 10^{-9}$), e aproximadamente uma ordem de grandeza superior ao do C-SOIL ($1,94 \times 10^{-6}$); e,

• para o Cenário C-recreativo o risco carcinogênico obtido no RBCA ($2,75 \times 10^{-7}$), é cerca de três ordens de grandeza superior ao resultado do RESRAD-CHEM ($4,00 \times 10^{-10}$), e uma ordem de grandeza superior ao do C-SOIL ($1,28 \times 10^{-8}$).

Na Tabela 7 é apresentada uma comparação entre os valores de concentração de benzeno dissolvido na água subterrânea medidos localmente com aqueles valores calculados através dos modelos de lixiviação implementados nas três metodologias.

Tabela 7- Comparação entre os valores medidos de concentração de benzeno na água subterrânea, e os valores calculados através dos modelos de lixiviação do solo, empregados nas metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL

<i>Composto</i>	<i>Fonte conc. no solo.</i>	<i>Valor real medido no local</i>		<i>Valor calculado conc. água subterrânea: lixiviação do solo</i>		
		<i>Conc. água sub.</i>		<i>RESRAD- CHEM</i>	<i>RBCA</i>	<i>C-SOIL</i>
	<i>(mg/kg)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>	<i>(mg/L)</i>
		<i>valor máximo</i>	<i>no ponto escolhido</i>			
Benzeno	3,3E-02	2,0E+00	5,0E-01	1,3E-01	1,9E-02	1,4E-02

Observa-se, através desta comparação, que os valores calculados para concentração de benzeno dissolvido na água subterrânea local são sempre inferiores aos valores reais medidos na área, sendo cerca de uma ordem de grandeza menores quando comparados ao ponto de monitoramento escolhido e duas ordens de grandeza inferiores quando comparados ao ponto onde são obtidas as maiores concentrações.

Tais resultados indicam que, os modelos adotados para se calcular a concentração de contaminantes dissolvidos na água, a partir da concentração de contaminantes no solo, não são rigorosamente precisos.

Os modelos de lixiviação adotados nas três metodologias estabelecem uma relação entre concentração de contaminantes presentes no subsolo e a concentração dissolvida na água subterrânea, sendo que, tais modelos, incorporam uma dependência de equilíbrio no meio subsuperficial entre as fases adsorvidas, dissolvidas e vapor. Observa-se ainda que, nas três metodologias avaliadas, os modelos implementados não incorporam a possibilidade de se avaliar a variação dos coeficientes de distribuição em função da presença de um cossolvente no meio. Neste sentido, cabe ainda tecer algumas observações sobre os efeitos causados pela presença do etanol na gasolina brasileira.

Recentes estudos realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (CORSEUIL e FERNANDES, 1999; CORSEUIL, SANTOS, FERNANDES, 1996; FERNANDES e CORSEUIL, 1996) ressaltam que a presença do etanol no meio pode ocasionar a variação do comportamento dos hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), em sistemas subsuperficiais. Além disso, com base naqueles estudos, estima-se que a solubilidade dos compostos BTEX em água possa aumentar devido ao efeito de cossolvência do etanol, já que os compostos BTEX são completamente miscíveis aos álcoois primários (*e.g.* metanol e etanol) e os álcoois por sua vez muito solúveis a água. A presença do etanol pode gerar, também, uma diminuição do potencial de adsorção dos compostos BTEX no solo, causando assim, uma diminuição no retardo do deslocamento destes compostos na água subterrânea e, conseqüentemente, um aumento na mobilidade. Paralelamente, a diminuição da degradação natural dos compostos BTEX, devido à presença do etanol no meio, pode ser explicada pelo fato de que etanol pode ser biodegradado em preferência aos compostos BTEX. Ademais, a biodegradação do etanol pode consumir o oxigênio e os nutrientes necessários para a degradação dos hidrocarbonetos de petróleo.

Apesar dos resultados obtidos neste trabalho fortalecerem a hipótese de que o efeito de cossolvência do etanol realmente influencia o comportamento da pluma de contaminação por gasolina, ainda é cedo para se concluir quais medidas devem ser adotadas para correção dos modelos de lixiviação implementados nas metodologias RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL. Isto se deve ao fato de que ainda existem poucos estudos que analisam especificamente a gasolina brasileira e seu comportamento diferenciado no meio ambiente devido à adição do etanol em sua composição.

Ressalta-se, entretanto, que mesmo havendo algumas inadequações nos modelos de lixiviação implementados nas metodologias de análise de risco RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL, a utilização destas metodologias continua sendo válida em casos de contaminação por compostos orgânicos, desde que se verifique a variação da solubilidade e do coeficiente de distribuição dos compostos orgânicos em função da presença de cossolventes no meio. Além disto sempre que possível é aconselhável que se compare os valores calculados de concentração dos contaminantes dissolvidos na água no ponto de exposição com os valores efetivamente medidos na área.

CONCLUSÕES

A partir da análise comparativa entre as metodologias de análise de risco RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL, foi possível comprovar a hipótese inicial deste estudo de que estas metodologias são diferentes entre si, contendo particularidades na formulação dos modelos considerados.

Tendo em vista que o cenário avaliado no estudo de caso se tratava de uma contaminação no solo e nas águas subterrâneas devido a vazamentos de gasolina brasileira nos sistemas de

abastecimento da região circunvizinha a um posto de abastecimento, localizado no território nacional, verificam-se os seguintes fatos:

- os valores calculados para as concentrações de contaminantes dissolvidos na água subterrânea se diferem daqueles valores amostrados localmente; e
- os modelos que descrevem os processos de lixiviação do subsolo para a água subterrânea não se mostraram rigorosamente precisos.

Observa-se ainda que, a inadequação dos modelos de lixiviação, implementados nas metodologias de análise de risco RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL, se deve a uma particularidade dos casos de contaminação no solo por gasolina brasileira, em função da presença do etanol e do efeito de cossolvência deste composto. Nos casos de contaminação do solo e das águas subterrâneas por compostos inorgânicos estes modelos não apresentam este tipo de problema.

Segundo a avaliação comparativa das metodologias de análise de risco RESRAD-CHEM, RBCA e C-SOIL considerando-se tanto a revisão de literatura quanto a avaliação dos resultados práticos, conclui-se que as três metodologias, apesar de não proporem modelos que descrevam perfeitamente um cenário de contaminação, se mostraram aplicáveis em casos de cenários de contaminação no Brasil.

Conclui-se, ainda, que apesar da aplicabilidade aparente destas metodologias de análise de risco no Brasil, os resultados obtidos devem ser avaliados e interpretados por um técnico, possibilitando, desta maneira, a determinação da necessidade de intervenção da área ou das formas de remediação e dos níveis de descontaminação que realmente são aplicáveis e necessários à região. Ademais, resultados de avaliações de risco podem fornecer subsídio para um planejamento urbano futuro, indicando possíveis maneiras de uso e ocupação de áreas contaminadas de modo que estas não impliquem em risco à saúde humana.

Baseando-se nos resultados obtidos nesta análise comparativa, sugere-se, ainda, que a metodologia de análise de risco RBCA seja aplicada em conjunto com as metodologias RESRAD-CHEM e C-SOIL na formulação de uma lista de valores de intervenção para o solo e para as águas subterrâneas, derivados a partir de avaliações de risco à saúde humana, especificamente para regiões pré-definidas no país. Nestes casos, a principal metodologia a ser seguida seria o RBCA devido à sua concepção em níveis progressivos de avaliações e detalhamento com modelos permitem avaliar receptores localizados fora da zona contaminada, e também devido à facilidade de uso, aplicação e conhecimento desta metodologia. A utilização das metodologias RESRAD-CHEM e C-SOIL seriam utilizadas para complementar a metodologia RBCA fornecendo informações sobre a variação dos riscos ao longo do tempo e a influência da ingestão de alimentos contaminados na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANL. 1997. *RESRAD Family of Codes Fact Sheet: Developing the RESRAD Family of Computer Codes for Environmental Risk Assessment*. Environmental Assessment Division Office Argonne National Laboratory, Argonne, IL-USA. Disponível em: <<http://web.ead.anl.gov/resrad/documents/>>. Acesso em 2002.
- [2] ASTM. 1995. *E1739-95: Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA-USA. 52p.
- [3] ASTM. 2000. *E2081-00: Standard Guide for Risk-Based Corrective Action*. American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA- USA. 94 p.
- [4] BERG, R. Van Den. 1994. *Human Exposure to Soil Contamination: a Qualitative and Quantitative Analyses Towards Proposal for Human Toxicological Intervention Values*. Netherlands: RIVM, 1994. 93p. (Report n. 725202001).
- [5] CACDP. 2000. *Ações Corretivas Baseadas em Risco (ACBR) Aplicadas a Áreas Contaminadas com Hidrocarbonetos Derivados de Petróleo e Outros Combustíveis Líquidos*. Câmara Ambiental do Comércio de Derivados de Petróleo Grupo de Avaliação de Risco Projeto ACBR, São Paulo, SP. 80 p.
- [6] CAPELETI A. R.; LEMOS M. M. G.; DIAS, C. L.; CASARINI D. C. P. 1998. Quantificação das Variáveis para Cálculo da Exposição Populacional Utilizando o Modelo de Avaliação de Risco C-Soil para Gerenciamento de Qualidade de Solos e Águas Subterrâneas. IN: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. *Anais...* São Paulo: ABAS- Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.
- [7] CASARINI, D. C. P.; DIAS, C. L.; LEMOS, M. M. G. 2001. *Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo*. São Paulo: CETESB. 247p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/solo_geral.asp>. Acesso em 2002.
- [8] CORESEUIL, H. X.; FERNANDES, M. 1999. Efeito do Etanol no Aumento da Solubilização de Compostos Aromáticos Presentes na Gasolina Brasileira. In: *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.4, n.1 e 2, p. 71-75.
- [9] CORESEUIL, H. X.; SANTOS, R.F., FERNANDES, M. 1996. Contaminação de Aquíferos por Derramamentos de Gasolina e Álcool. In: *Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental*. Anais do Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, . RS. p. 68-75.
- [10] CORSEUIL, H. X.; MARINS, M. D. 1997. Contaminação de águas subterrâneas por derramamento de gasolina: o problema é grave? *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 2, p. 50-54.

- [11] FERNANDES, M.; CORESEUIL, H. X. 1996. Contaminação de Águas Subterrâneas por Derramamento de Gasolina: Efeito Cossolvência. In: *III Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Gramado – RS. Anais do III Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- [12] FETTER, C. W. 1999. *Contaminant Hydrogeology*. Second edition. New York, U.S.A.: Prentice Hall Inc. 500p.
- [13] FINOTI, A. R. 1997. *Estudo da Aplicabilidade do Modelo da Ação Corretiva Baseada no Risco (RBCA) em Contaminações Subterrâneas com Gasolina e Etanol*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Santa Catarina.
- [14] HART, Sasha Tom. 2000. *Comparação entre Modelos de Análise de Risco RBCA e C-SOIL, com Base em uma Contaminação do Solo e das Águas Subterrâneas por Hidrocarbonetos de Petróleo*. 55f. Monografia (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo.
- [15] IRIS. 2003. *Integrated Risk Information System*. U.S.A.: US EPA/IRIS. Disponível em: <<http://www.epa.gov/iris/index.html>>. Acesso em 2003.
- [16] KOLSNIKOVAS, C.; DUARTE, U. 1998. *Análise Comparativa entre Métodos Determinísticos e Amostragens Reais no Cálculo da Análise de Risco para Inalação de Compostos Orgânicos Voláteis a Partir de Emissões do Solo*. IN: X CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. São Paulo: ABAS- Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.
- [17] MINISTÉRIO DA SAÚDE. 2000. *Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano. Portaria 1.469/2000*. Brasília, D.F.
- [18] OLIVEIRA, L. I. 1999. *Postos Distribuidores de Combustíveis em Belo Horizonte: Caracterização do Problema Ambiental em Potencial*. Dissertação de Mestrado; Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos; Escola de Engenharia da UFMG; Belo Horizonte, MG. Agosto de 1999.
- [19] US EPA. 1989. *Risk Assessment guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A), EPA/540/1/1-89/002*. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C. Disponível em: <<http://www.epa.gov/superfund/programs/risk/ragsa/>>. Acesso em 2002.
- [20] YU, C.; ZIELEN, A.J.; CHENG J.J.; LePOIRE, D.J.; GNANAPRAGASAM, E.; KAMBOJ, S.; ARNISH, J.; WALLO III, A.; WILLIAMAS, W.A.; PETERSON, H. 2001. *User's Manual for RESRAD Version 6.0*. Environmental Assessment Division Office Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois U.S.A. Paginação irregular.