

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

Andréia Reina Capeleti¹, Mara M.G. Lemos², Cláudio L. Dias² e
Dorothy C. P. Casarini²

Resumo - O modelo matemático de avaliação de risco C-Soil, está sendo utilizado pela CETESB, para estabelecimento dos valores de intervenção de contaminantes em solos e águas subterrâneas. Este é um modelo de exposição humana, constituído de fórmulas que determinam a quantidade do contaminante ingerida pelo homem através de diferentes vias de exposição. O presente trabalho apresenta a quantificação das variáveis da população e do tempo de permanência na área contaminada, que formam a base deste modelo para o cálculo da exposição e do risco à saúde pública para os quatro cenários de uso e ocupação do solo estabelecidos para o Estado de São Paulo (industrial, residencial, agrícola e área de proteção máxima). Os resultados foram obtidos por levantamento bibliográfico, utilizando como fonte de informação, estudos desenvolvidos no Brasil e em outros países, envolvendo avaliação de risco.

Palavras-chave - C-Soil, Avaliação de risco, Valor de intervenção

¹ Mestranda da faculdade de Saúde Pública da USP – Av. Dr. Arnaldo, 715 – CEP 01246-904 – São Paulo – SP – Fone: (011) 282-3842

² Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) – Setor de Qualidade de Solos e Águas Subterrâneas (EQSS) - Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 – CEP 05489-900 – São Paulo – SP – Fone: (011) 3030-6028 – Fax: (011) 3030-6067 – e-mail: dorothy@cetesb.br / maral@cetesb.br / claudiod@cetesb.br

INTRODUÇÃO

A existência de áreas contaminadas tem se transformado, ao longo das últimas décadas, em um dos mais relevantes problemas ambientais dos países industrializados, em virtude dos impactos que causam sobre a saúde pública, sobre os recursos hídricos, sobre o solo e sobre o patrimônio.

A origem das áreas contaminadas pode estar associada a diferentes fontes de poluição. Incluem-se as fontes pontuais, como exemplo, os lixões, fossas sépticas, aterros de resíduos industriais e domiciliares e áreas de armazenamento de produtos e fontes dispersas como o uso de fertilizantes e agrotóxicos. A migração dos poluentes através do solo, para as águas superficiais e subterrâneas, constitui a principal ameaça para a qualidade das águas de abastecimento.

No Estado de São Paulo, em virtude da precariedade dos sistemas de saneamento e da qualidade das águas superficiais, o seu uso torna-se cada vez mais problemático, em função dos elevados custos dos sistemas de tratamento necessários para o atendimento aos padrões de potabilidade. Assim, os recursos hídricos subterrâneos tornam-se uma alternativa de abastecimento simples, confiável, eficiente, de baixo custo e com alta disponibilidade. Segundo diagnóstico efetuado pela CETESB (1997a), o uso da água subterrânea no Estado de São Paulo, vem crescendo gradativamente. Atualmente, 71,6% dos municípios do Estado são total ou parcialmente abastecidos por águas subterrâneas. Isto mostra a importância deste recurso para o abastecimento público e reforça a importância de proteção da qualidade destas águas.

No intuito de desenvolver uma política de proteção do solo e das águas subterrâneas, a Cetesb pretende propor padrões de referência de qualidade e valores de intervenção para Solos e Água Subterrâneas. Com base nesses valores orientadores, serão efetuados diagnósticos e avaliações de áreas suspeitas de contaminação e onde existir risco à saúde pública, deverão ser tomadas medidas de intervenção (isolamento, contenção ou remediação).

Para determinação dos valores de intervenção, que indicam o nível de contaminação, acima do qual existe risco à saúde pública, requerendo uma intervenção na área, será utilizado o modelo matemático de avaliação de risco C-Soil (CETESB, 1997b e DIAS **et al**, 1998).

As diferentes metodologias de avaliação de risco existentes são similares, no que diz respeito à necessidade da quantificação das variáveis populacionais e sobre os efeitos do contaminante sobre essa população por diferentes vias de exposição.

O modelo C-Soil foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Saúde e Proteção Ambiental (RIVM) da Holanda. Este é um modelo de exposição humana, que consiste de fórmulas que descrevem as relações entre as concentrações dos contaminantes no solo e na água subterrânea e a ingestão desses por seres humanos por diferentes vias.

Modelos matemáticos de avaliação de risco são ferramentas importantes no gerenciamento de áreas contaminadas e proteção das águas subterrâneas, visto que, através dos mesmos, é possível, efetuar uma avaliação do risco potencial, isto é, da possibilidade e ocorrência de um efeito adverso à saúde pública.

Adotou-se para o Estado de São Paulo, um critério de uso e ocupação do solo, que resultou em 4 cenários distintos: industrial, residencial, agrícola, e área de proteção máxima. Para utilização do modelo C-Soil, na determinação dos valores de intervenção, como também, na avaliação do risco em casos específicos envolvendo áreas contaminadas, surgiu a necessidade de efetuar uma padronização das características da população, relacionadas com os diferentes cenários de exposição.

O objetivo deste trabalho, é apresentar a quantificação das variáveis utilizadas para o cálculo da exposição populacional pelo modelo de avaliação de risco C-Soil, nos diferentes cenários de uso e ocupação do solo elaborado para as condições do Estado de São Paulo.

METODOLOGIA

O modelo de avaliação de risco C-Soil possui um conjunto de equações composto de nove vias de exposição, a saber: ingestão de solo, contato dermal com solo, inalação de material particulado, inalação de ar, ingestão de vegetais cultivados na área contaminada, ingestão de água, inalação de vapores durante a ducha, contato dermal durante a ducha, contato dermal durante banho de imersão. Essas vias são calculadas separadamente para crianças (0-6 anos) e adultos.

Para o cálculo da exposição, ou seja a quantidade do contaminante absorvido pelo ser humano, devem ser quantificadas as seguintes variáveis da população: peso corpóreo, quantidade de solo ingerido, área descoberta da pele – ambiente interno, área descoberta da pele – ambiente externo, deposição dermal – ambiente interno, deposição dermal – ambiente externo, taxa de absorção dermal, capacidade pulmonar, consumo de

tubérculos provenientes da área contaminada, consumo de folhas e frutas provenientes da área contaminada, consumo de água e superfície corpórea total.

Para uma avaliação de risco, é necessário considerar o tempo de exposição através das diversas vias. No C-Soil o cálculo do tempo no qual a pessoa está exposta na área contaminada é feito a partir das seguintes variáveis de tempo de permanência: semanas por ano, dias por semana, horas por dia em ambiente interno, horas por dia em ambiente externo, horas no fim de semana no ambiente interno, horas no fim de semana em ambiente externo, e anos na área contaminada. A diferenciação de ambiente interno (dentro de construções) e externo (ambiente aberto) é necessária, em virtude da variação da concentração de contaminantes no ar desses dois ambientes. Essa diferenciação é importante no caso dos contaminantes voláteis, onde a taxa de diluição é diferente entre esses ambientes.

Estas variáveis foram quantificadas, tanto para adultos como crianças, para os quatro cenários de uso e ocupação de solo definidos para o Estado de São Paulo: industrial, residencial, agrícola e área de proteção máxima.

Foi efetuado um levantamento bibliográfico para a quantificação das variáveis da população e do tempo de permanência, utilizando-se como fonte de informação estudos de avaliação de risco desenvolvidos no Brasil e em outros países. Não foram encontrados dados nacionais para a grande maioria das variáveis. Optou-se, então, por utilizar dados internacionais extraídos de documentos e publicações da Organização Mundial de Saúde (WHO, 1987, 1993 e 1994), Agência Ambiental Americana (EPA, 1989 a e b), Canadá (CCME, 1996) e Holanda (BERG, 1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das variáveis para o cálculo da exposição populacional estão apresentados na Tabela 1, para os cenários industrial, residencial, agrícola e área de proteção ambiental.

Será efetuada uma discussão das variáveis da população e do tempo de permanência na área contaminada, independentes e dependentes de cada cenário de uso e ocupação do solo.

VARIÁVEIS DA POPULAÇÃO

VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO CENÁRIO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Algumas das variáveis da população foram consideradas iguais para todos os cenários de uso e ocupação do solo a saber: peso corpóreo, área corpórea total, capacidade pulmonar, deposição dermal (ambiente interno e externo) e taxa de absorção dermal.

O **peso corpóreo** médio adotado, 60 Kg para adultos, é um valor calculado para o Estado de São Paulo, através dos dados do FIBGE (1977) e confirmado com os dados da Organização Mundial de Saúde (WHO, 1987 e 1993). Para crianças, adotou-se como peso médio, 15 Kg, sendo este peso semelhante ao utilizado na Holanda (BERG, 1994), e próximo do utilizado pela EPA (1989b), que é de 16 Kg. Esta variável é utilizada no modelo, para o cálculo de quantificação de todas as vias de exposição.

Tabela 1 - Quantificação das variáveis da população e do tempo de permanência no cenário industrial, residencial, agrícola e proteção máxima.

Variáveis da População	Industrial		Residencial		Agrícola		Proteção Máxima	
	Adulto	Criança	Adulto	Criança	Adulto	Criança	Adulto	Criança
Peso corpóreo [Kg]	60	15	60	15	60	15	60	15
Quantidade de solo ingerido [mg]	50	100	100	200	150	300	150	500
Área descoberta da pele, Ambiente interno [m ²]	0,2	0,14	0,86	0,32	0,86	0,32	0,86	0,32
Área descoberta da pele, Ambiente externo [m ²]	0,2	0,14	0,86	0,32	0,09	0,32	0,09	0,32
Deposição dermal, Ambiente interno [mg de solo/cm ²]	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
Deposição dermal, Ambiente externo [mg de solo/cm ²]	3,75	0,51	3,75	0,51	3,75	0,51	3,75	0,51
Taxa de absorção dermal [/horas]	0,005	0,01	0,005	0,01	0,005	0,01	0,005	0,01
Capacidade pulmonar [m ³ /dia]	22	15	22	15	22	15	40	15
Consumo de tubérculos da área contaminada [Kg/dia]	0,0125	0,0125	0,005	0,0025	0,025	0,05	0,025	0,05
Consumo de folhas e frutas da área contaminada [Kg/dia]	0,0125	0,0125	0,025	0,0125	0,025	0,05	0,025	0,05
Consumo de água [L/dia]	1	0,5	1	1	2	1	2,5	1,5
Superfície corpórea total [m ²]	1,66	0,95	1,66	0,95	1,66	0,95	1,66	0,95
Variáveis do tempo de permanência na área contaminada								
Semanas [semanas/ano]	48	5	52	52	52	52	52	52
Dias por semana [dias/semana]	6	1	7	7	7	7	7	7
Horas de sono [horas/dia]	0	0	8	12	8	12	8	12
Horas, em ambiente interno [horas/dia]	8	3	6	8	4	6	8	8
Horas, em ambiente externo [horas/dia]	2	1	2	4	8	6	8	4
Horas no final de semana, no ambiente interno [horas/dia]	0	0	8	8	8	6	8	6
Horas no final de semana, no ambiente externo [horas/dia]	0	0	4	4	4	6	4	6
Tempo [anos]	25	6	24	6	58	6	58	6

A **área corpórea total** adotada para adultos de 1,66 m², foi baseada em BERNARDES (1995), que calculou para a população do Estado de São Paulo, a superfície total do corpo, em função do peso e estatura média. Considerando-se que este valor de área corpórea para adultos coincide com o valor utilizado no modelo (BERG, 1994), e na ausência de outras informações, adotou-se o valor deste modelo, de 0,95 m², como área corpórea total para crianças. Esta variável é utilizada para o cálculo da exposição por contato dermal durante a ducha e durante o banho de imersão.

A **capacidade pulmonar** adotada foi de 22 m³/dia para adulto, que é o valor utilizado pela Organização Mundial de Saúde (ICRP, 1974). Para crianças o valor adotado foi de 15 m³/dia (ICRP, 1974). Esta variável é utilizada para calcular a exposição por inalação: material particulado, ar e vapores durante o banho.

A **deposição dermal** (ambiente interno e externo) e a taxa de **absorção dermal** são utilizadas para quantificação da exposição aos contaminantes orgânicos absorvidos através da pele, devido ao contato com o solo e água durante o banho (ducha ou imersão). Contaminantes inorgânicos (metais) possuem taxas de absorção dermal igual a zero, não sendo o contato dermal, uma via importante de exposição. Como não foram encontrados dados nacionais para estas variáveis, adotou-se os estabelecidos previamente no modelo.

VARIÁVEIS DEPENDENTES DO CENÁRIO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para a variável **consumo de vegetais** (folhas, frutos e tubérculos) cultivados na área contaminada, não foram encontrados dados nacionais para subsidiar sua quantificação, adotando-se os valores já existentes no modelo C-Soil. Cabe ressaltar, que esses valores representam a quantidade consumida de vegetais produzidos e consumidos na área em questão. Não é considerada a ingestão de vegetais contaminados, produzidos em outras áreas.

A **quantidade de solo ingerido** foi estimada levando-se em consideração o comportamento humano nos diferentes cenários e faixas etárias. Para o cenário residencial, adotou-se os valores descritos em EPA (1989b), sendo 100 mg/dia para adultos e 200 mg/dia para crianças. Para o cenário industrial, adotou-se o critério de 50% menos que o residencial. O valor para adultos coincidiu com os valores descritos em EPA (1989a). No cenário agrícola adotou-se o critério de 50% mais que o residencial. Para o cenário de área de proteção máxima, adotou-se o valor máximo admitido pelo modelo.

A **área descoberta da pele** que é utilizada na quantificação da exposição por contato dermal, com o solo ou poeira contaminada, foi calculada com base nas informações contidas em EPA (1989a). Considerou-se também, o comportamento humano nos diferentes cenários para se determinar quais as partes do corpo que ficam descobertas (sem vestuário) em cada situação. Não foram consideradas a área do rosto e a do pescoço, em função da inexistência de dados. No cenário residencial considerou-se a somatória das áreas das mãos, braços e pernas, tanto para ambiente interno como externo, enquanto que no cenário industrial, para adultos, a área de pernas não foi utilizada no cálculo. No cenário agrícola, para o ambiente interno, considerou-se a somatória das áreas das mãos, braços e pernas tanto para adultos como para crianças e para o ambiente externo, das mãos para adultos e mãos, braços e pernas para crianças (no trabalho agrícola o indivíduo utiliza vestuário completo).

Para **consumo diário de água**, adotou-se, para adultos, o valor de EPA (1989a) que é de 2 L/dia e para crianças, 1 L/dia (ECETOC, 1990). Diferenciações deste valor foram estimadas para os diferentes cenários. No cenário residencial (adultos) e industrial (adultos e crianças), adotou-se o critério de 50% dos valores acima descritos, por considerar que o indivíduo permanece na área contaminada apenas parte do dia. No cenário agrícola, considerou-se a permanência integral na área contaminada, o mesmo ocorrendo para crianças no residencial.

VARIÁVEIS DO TEMPO DE PERMANÊNCIA

O número de **semanas por ano**, na área contaminada, adotado para os cenários agrícola e residencial foi de 52, assumindo-se que a população permanece no local todas as semanas do ano, conforme dados do CCME (96). No cenário industrial, segundo esta mesma referência, optou-se pelo valor de 48 semanas/ano, considerando-se que 4 semanas o indivíduo está de férias. Foi assumido que crianças freqüentam este último cenário esporadicamente, por diversas razões (festas, acompanhando os pais na saída, campanhas de vacinação, etc.). Assim sendo, adotou-se que as mesmas estão presentes 5 semanas por ano.

O número de **dias por semana**, adotado na área contaminada para os cenários agrícola e residencial foi de 7 dias. No cenário industrial, considerou-se para adultos um dia a menos, referente ao dia de descanso semanal e presença da criança em 1 dia.

Para a variável **horas de sono**, considerou-se para os cenários residencial e agrícola, os valores normalmente utilizados de 8 e 12 horas, para adultos e crianças

respectivamente. No cenário industrial, o valor adotado foi 0, pois os indivíduos encontram-se na área contaminada apenas no horário de serviço.

O número de **horas em ambiente** interno na área contaminada no cenário industrial para adultos foi determinado levando-se em conta o número médio de horas trabalhadas no Brasil (8 horas) e no ambiente externo de 2 horas, contando o tempo despendido para entrar e sair da indústria, como também, o horário após o almoço, onde a maioria das pessoas procuram locais abertos. Para crianças, assumiu-se 3 horas para ambiente interno e 1 hora para externo. No cenário residencial, descontadas as horas de sono, já consideradas, e as horas de trabalho fora da área contaminada (assumindo-se que a maioria da população trabalha fora de casa) adotou-se para o ambiente interno 6 horas e externo 2 horas. Para as crianças, o valor estimado foi de 8 horas para ambiente interno e 4 horas no externo admitindo-se que estas ainda não se afastam de casa para freqüentar a escola. No caso do cenário agrícola considerou-se que a população estaria presente na área contaminada 24 horas (o período total do dia). Foi admitido que as 8 horas de serviço são realizadas em ambiente externo e que o indivíduo adulto só permanece em casa 4 horas. Para as crianças admitiu-se 6 horas internas e 6 horas externas.

O número de **horas no final de semana** na área contaminada foi calculado para os diversos cenários, admitindo-se como sendo um dia. Esta variável é zero para o cenário industrial pois o trabalhador está fora da área no final de semana (dia de descanso). Para o cenário residencial e agrícola assumiu-se que a população permanece fora da área contaminada 4 horas.

O número de **anos na área contaminada**, no cenário agrícola foi obtido admitindo-se a expectativa média de vida de 64 anos (FIBGE, 1992), sendo subdividido em 58 anos como adulto e 6 anos como criança. No cenário residencial, o tempo médio de permanência no mesmo local é de 30 anos (EPA, 1989a) e no cenário industrial admitiu-se para adultos 25 anos, que correspondem ao tempo de aposentadoria em atividades insalubres/periculosas e também adotado pela EPA (1989a). Para crianças, admitiu-se que elas freqüentam esporadicamente o serviços dos pais desde seu nascimento. Destaca-se, que para os contaminantes cancerígenos, sempre é admitido a expectativa de vida.

Para o cenário de área de proteção máxima, os valores adotados para as variáveis populacionais e de tempo de permanência, foram os valores mais restritivos, extraídos dos cenários residencial, agrícola e industrial. Esse cenário foi criado no intuito de proteger um bem ambiental, isto é, áreas de proteção de manancial superficial e

subterrâneos importantes para o abastecimento público. Assim, será utilizada a situação mais crítica de risco à saúde pública, visando com isso restringir a ocupação ou exigir níveis bastante criteriosos de remediação nessas áreas.

CONCLUSÃO

As metodologias de avaliação de risco são relativamente inovativas, e estão sendo adotadas para suporte de decisão no controle da poluição de solos e águas subterrâneas.

- As variáveis da população e do tempo de permanência foram quantificadas de forma a definir cenários de uso e ocupação do solo com a seguinte ordem crescente de restrição e controle da poluição: industrial, residencial, agrícola e área de proteção máxima.
- As variáveis da população independentes do cenário participam na quantificação da exposição mas não influenciam a diferenciação da restrição dos cenários.
- São dependentes do cenário as seguintes variáveis da população: área descoberta da pele (ambiente interno e externo), consumo de tubérculos, consumo de folhas e frutos, consumo de água e todas as variáveis do tempo de permanência na área contaminada.
- O cenário mais restrito é área de proteção máxima, que foi definido para garantir a qualidade dos recursos hídricos para abastecimento público em áreas de proteção de mananciais superficiais (APM) e subterrâneos (Área de Recarga de Aqüíferos).
- As variáveis da população e o tempo de permanência nas áreas contaminadas, foram quantificadas admitindo-se valores mais representativos possíveis da população do Estado de São Paulo, visando o cálculo confiável da exposição numa avaliação de risco e estabelecimento dos valores de intervenção para solos e águas subterrâneas.

A quantificação das variáveis para cálculo da exposição populacional apresentadas neste trabalho, poderão ser revisadas e alteradas na medida que novas pesquisas nacionais sobre dados populacionais e toxicológicos sejam publicadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERG, R. van den. **Human exposure to soil contamination a qualitative and quantitative analyses towards proposals for human toxicological intervention values**. Netherlands: RIVM, 1994. 93p. (Report n. 725201011)
- BERNARDES Jr, C. **Avaliação de risco de longo prazo, em casos de contaminação de águas subterrâneas como instrumento de gerenciamento de remediação**. São Paulo, SP. 1995. 192 p. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1995.
- CCME, CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENTAL. **A Protocol for derivation of environmental and human health soil quality guidelines**. Canadá: CCME, 1996.
- CETESB. **Uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo** : 1997. São Paulo: CETESB, 1997a. 48 p.
- CETESB. **Estabelecimento de padrões de referência de qualidade e valores de intervenção para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo**: 1997. São Paulo: CETESB, 1997b. 110p.
- CUNHA, R.C.A. **Avaliação de risco em áreas contaminadas por fontes industriais desativadas- Estudo de caso**. São Paulo, SP. 1997. 152p. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1997.
- DIAS, C.L.; LEMOS, M.M.G.; CAPELETI, A.R.; CASARINI, D.C.P. Derivação de valores de intervenção para chumbo, benzeno e tetracloroetileno, utilizando o modelo de avaliação de risco C-Soil, para controle da contaminação de solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 10, ABAS, São Paulo, SP, set. 1998.
- EPA (UNITED STATES). **Exposure factors handbook**. Washington, DC: EPA, 1989a. (EPA/600/8-89/043)
- EPA (UNITED STATES). **Risk assessment guidance for superfund – human health evaluation manual**. Volume I. Washington, DC: EPA, 1989b. (EPA/540/1-89/002)

- ECETOC, EUROPEAN CHEMICAL INDUSTRY ECOLOGY AND TOXICOLOGY CENTRE. **Hazard assessment of chemical contaminants in soil**. Bélgica: ECETOC, 1990. 123p. (Technical report n.º 40).
- FIBGE-SEPLAN. **Estudo nacional da despesa familiar-ENDEF: dados preliminares, consumo alimentar-antropometria – região II (São Paulo), região IV (Minas Gerais e Espírito Santo) e Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.
- FIBGE. **Anuário estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992.
- ICRP, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION . **Report of the task group on reference man**. Oxford, Pergamon Press. ICRP, n. 23, 1974.
- WHO. **Principles for safety assessment of food additives and contaminants in food**. Geneve: WHO, 1987. 174p. (Environmental Health Criteria 70)
- WHO. **Guidelines for drinking-water quality**. v. 1, 2.^a Edição. Geneve: WHO, 1993. 198p.
- WHO. **Assessing human health risks of chemicals: derivation of guidance values for health based exposure limits**. Geneve: WHO, 1994. 73p. (Environmental Health Criteria 170)