

## XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

# PARÂMETROS DO MEIO FÍSICO UTILIZADOS NA MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OBTENÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS ACEITÁVEIS (CMA) PARA HIDROCARBONETOS NO ESTADO DE MINAS GERAIS

Hiram Jacques Alves de Rezende <sup>1</sup>; Patrícia Rocha Maciel Fernandes <sup>2</sup>.

**Resumo** – Neste trabalho são dados os primeiros passos para a elaboração de uma tabela de referência contendo as Concentrações Máximas Aceitáveis – CMA, calculadas a partir de parâmetros físicos observados no Estado de Minas Gerais. Para tanto, foi necessário um levantamento criterioso de todos os parâmetros de entrada dos modelos matemáticos utilizados nos cálculos das CMAs para cada composto de interesse: BTEX (Benzeno, Etilbenzeno, Tolueno, e Xilenos Totais), Benzo(a)pireno e Naftaleno. Estas informações foram organizadas por domínios geológicos, considerando as propriedades físicas do meio impactado (solo e solo saturado), para se chegar a valores que satisfazem a diversidade natural de Minas Gerais.

**Abstract** – This work are the first steps for the preparation of a reference table containing as Maximum Allowable Concentrations – MAC, calculated from physical parameters observed at Minas Gerais State. For this, was need a careful survey of all the input parameters of the mathematical models used in the calculations of CMAs for each compound of interest: BTEX (Benzene, Ethylbenzene, Toluene, e Xylene, Mixture), Benzo(a)pyrene e Naphthalene. This information was organized by geological domains, considering the physical properties of the environment impacted (soil and saturated soil), to arrive at values that satisfy the natural diversity of Minas Gerais.

**Palavras-Chave** – Água subterrânea, hidrocarbonetos, domínios geológicos.

<sup>1</sup> CPRM – Serviço Geológico do Brasil; Avenida Ulysses Guimarães, 2862 – Salvador/BA, Brasil, CEP: 41.213-000; tel. +55 (71) 2101-7300; fax: (71) 3371-4005; [hiram.rezende@cprm.gov.br](mailto:hiram.rezende@cprm.gov.br);

<sup>2</sup> FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; Rodovia Prefeito Américo Gianetti, s/n, Prédio Minas – Belo Horizonte/MG, CEP: 31.630-900; tel. +55 (31) 3915-1107; fax: (31) 3219-5738; [patricia.fernandes@meioambiente.mg.gov.br](mailto:patricia.fernandes@meioambiente.mg.gov.br).

## 1 – INTRODUÇÃO

As CMAs são valores adotados na metodologia de tomada de decisões baseadas no risco a saúde humana, conhecida como ACBR – Ações Corretivas com Base no Risco (CETESB, 2006), ou pela sigla que corresponde aos termos em inglês RBECA – Risk Based Corrective Action (“rebeca”). As CMAs representam as concentrações máximas admissíveis de substância presentes no meio ambiente na forma de contaminação, sendo que, acima do valor estabelecido, há a probabilidade de ocorrência de um ou mais efeitos adversos em receptores humanos.

Os modelos aplicados nos cálculos das concentrações para os Valores de Investigação (VI) baseiam-se naqueles propostos em ASTM E1739-95e1 (1995) - Standard Guide for Risk-Based Corrective Action (RBCA) Applied at Petroleum Release Sites, desenvolvida pela American Society for Testing and Materials, utilizados no desenvolvimento de tabelas com Valores Orientadores utilizados no Estado de São Paulo.

O cálculo dos VI é realizado considerando o caminho de exposição entre a fonte de contaminação e os pontos de exposição (locais de contato entre o receptor e o contaminante), a partir do somatório das CMAs, para cada via de ingresso (inalação, ingestão e contato dérmico) observada em um receptor. Estes valores são calculados por meio de equações que utilizam parâmetros do meio físico, considerando suas particularidades. Desta forma, o valor das CMAs pode variar de acordo com as características geológicas e hidrogeológicas de cada região.

## 2 – PARÂMETROS DO MEIO FÍSICO

Durante os meses de outubro de 2010 a fevereiro de 2011 foi feito um levantamento de estudos elaborados por consultores ambientais em postos de gasolina e indústrias. Destes documentos analisados, 147 foram utilizados para compor o banco de informações necessárias para os cálculos das CMAs. Também foram empregadas 447 medidas da fração de carbono orgânico no solo e da densidade do solo seco, produtos do Projeto Solo de Minas (2010), totalizando 594 pontos (Figura 1).

As informações que foram sendo acumuladas foram organizadas em 6 (seis) compartimentos geológicos onde cada unidade geológica do Estado de Minas Gerais foi vinculada, sendo eles: **A)** Coberturas e Depósitos Cenozóicos (poroso); **B)** Sedimentar e Metassedimentos (poroso); **C)** Metavulcânicas (fissural/vesicular); **D)** Carbonatos/Pelitos (cárstico/poroso); **E)** Metamórfico (poroso/fissural) e **F)** Complexos Cristalinos (fissural).

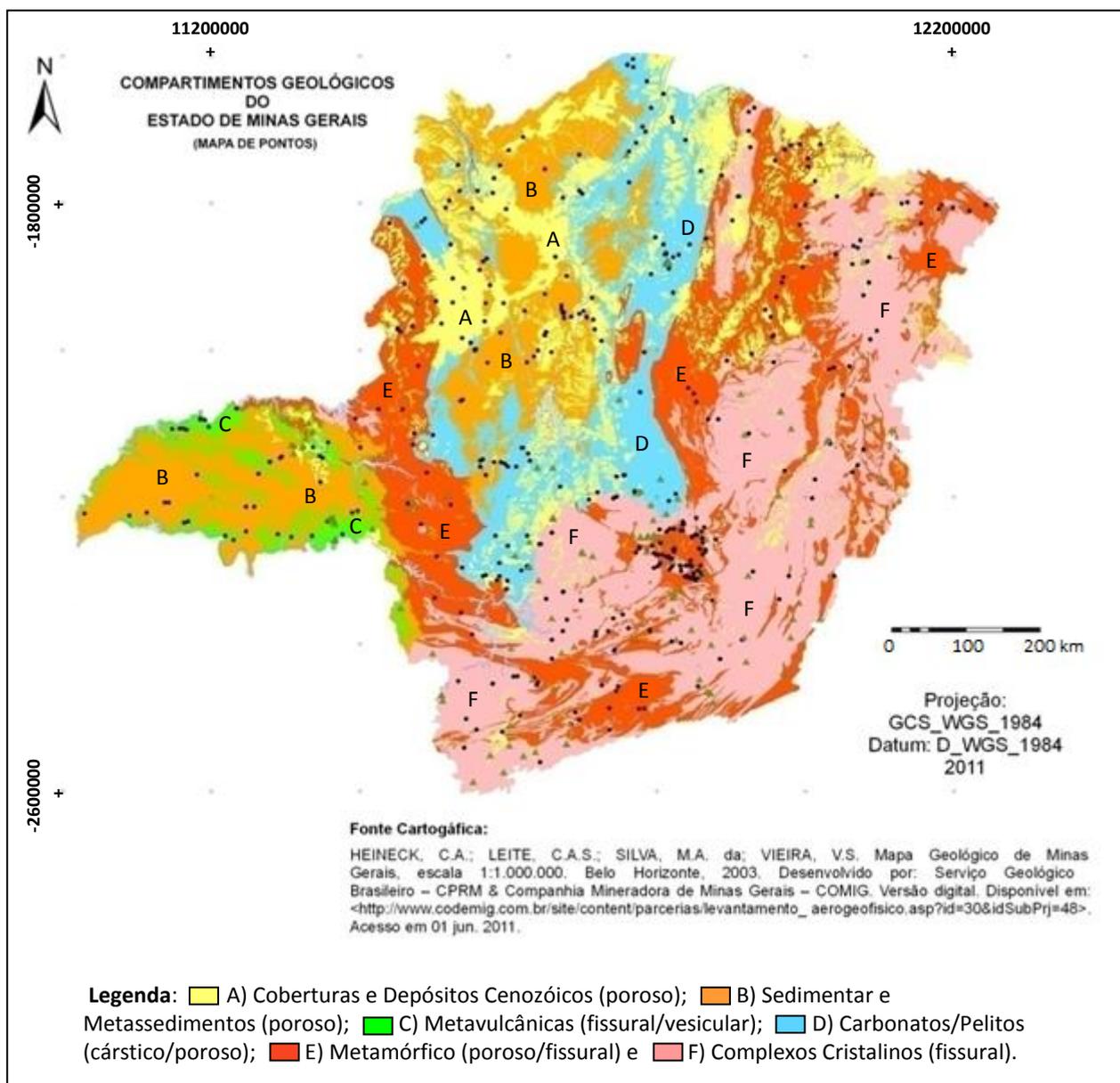


Figura 1. Mapa com a localização dos pontos correspondentes aos empreendimentos com estudos ambientais analisados na FEAM e do Projeto Solos de Minas.

Os dados obtidos dos 147 estudos realizados em empreendimentos onde foram realizadas investigações ambientais são resultado de informações colhidas de 658 poços de monitoramento.

Os valores de precipitação ( $P$ ) e evapotranspiração ( $ETR$ ) disponibilizados no portal eletrônico do Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (ZEE), que utiliza dados mensais dos elementos climáticos de 39 Estações Climatológicas Principais pertencentes à rede nacional de observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 2).

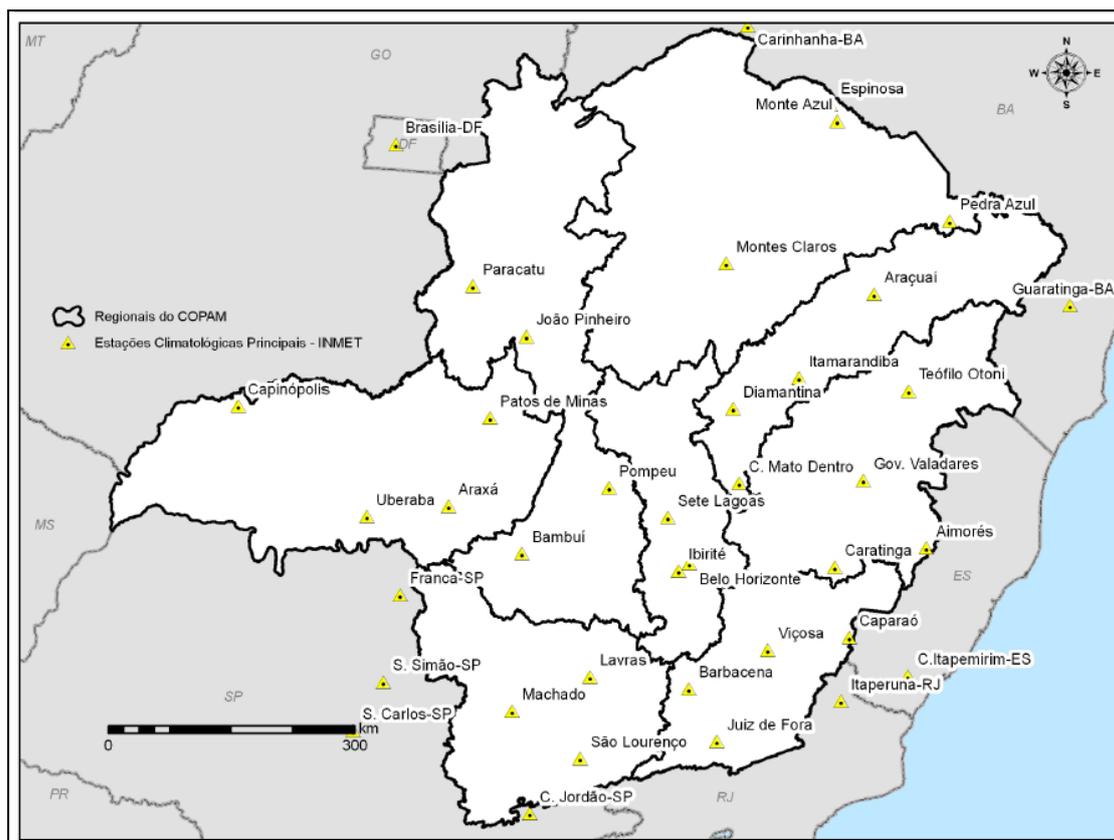


Figura 2. Localização das 39 Estações Climatológicas do INMET utilizadas para calcular a taxa de infiltração no solo do Estado de Minas Gerais (ZEE, 2008).

Os parâmetros do meio físico, reunidos a partir do acervo de documentos da FEAM, necessários para o cálculo dos VI, passaram por um processo de seleção, no qual foram descartados valores adquiridos de fontes bibliográficas ou que geraram dúvidas por estarem fora da faixa de valores naturais (valores exageradamente altos, ou exageradamente baixos).

A taxa de infiltração ( $I$ ) de água no solo foi calculada considerando o balanço hídrico igual a zero subtraindo a o valor da precipitação ( $P$ ) com o valor de evapotranspiração ( $ETR$ ) com a equação configurada da seguinte forma:  $I = P - ETR$ , sendo que os valores adotados para precipitação e evapotranspiração foram, respectivamente, de 146,6 cm/ano 102,6 cm/ano.

Como a quantidade de informações em alguns compartimentos era insuficiente para uma análise segura, optou-se em agrupar os compartimentos geológicos, dividindo as informações em três partes, conforme estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do meio físico do Estado de Minas Gerais.

PARÂMETRO	UNIDADE	MINAS GERAIS	COMPARTIMENTOS		
			A/B <sup>(1)</sup>	C/D/E <sup>(2)</sup>	F <sup>(3)</sup>
<b>PARÂMETROS DO SOLO</b>					
Espessura da Zona Não Saturada	cm	463,00	634,79*	541,21*	434,47
Conteúdo Volumétrico de Ar na Zona Não Saturada <sup>(4)</sup>	cm <sup>3</sup> -ar/cm <sup>3</sup> -solo	0,274	0,240	0,269	0,283
Porosidade Total	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,450	0,394	0,441	0,465
Porosidade efetiva	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,200	0,122	0,222	0,194
Conteúdo Volumétrico de Água na Zona Não Saturada <sup>(4)</sup>	cm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> O/cm <sup>3</sup> -solo	0,175	0,154	0,172	0,181
Densidade do Solo	g-solo/cm <sup>3</sup> -solo	1,580	1,582	1,580	1,578
<b>PARÂMETROS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA</b>					
Fração de Carbono Orgânico no Solo (Zona Saturada)	g-C/g-solo	0,027	0,021	0,027	0,037
Gradiente Hidráulico	adimensional	0,045	0,041	0,032	0,138*
Profundidade do Nível d'Água	cm	480,00	639,79*	546,21*	439,47
Taxa de infiltração no Solo	cm/ano	44,00	44,00	44,00	44,00
Velocidade de Darcy <sup>(4)</sup>	cm/dia	0,503	0,456	0,363	1,549*
Velocidade de Escoamento	cm/dia	3,503	3,503	3,503	3,503
Conteúdo Volumétrico de Ar na Franja Capilar	cm <sup>3</sup> -ar/cm <sup>3</sup> -solo	0,045	0,039	0,044	0,046
Porosidade Efetiva	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,196	0,122	0,222	0,194
Conteúdo Volumétrico de Água na Franja Capilar	cm <sup>3</sup> -H <sub>2</sub> O/cm <sup>3</sup> -solo	0,404	0,355	0,397	0,418

Compartimentos: <sup>(1)</sup>Coberturas e Depósitos Cenozóicos; e Sedimentar e Metassedimentos. <sup>(2)</sup>Metavulcânicas; Pelitos/Carbonatos; e Metamórficos. <sup>(3)</sup>Complexos Cristalinos. <sup>(4)</sup>Dados da CETESB inclusos. \*Parâmetros com *outlier*. Fonte: Acervo de relatórios de monitoramentos das áreas gerenciadas pela FEAM, enviados por consultores até 2010.

Optou-se na conservação dos *outlier* nos cálculos objetivando enfatizar as diferenças físicas dos compartimentos geológicos, enquanto os valores que abrangem todo o Estado de Minas Gerais foram utilizados sem o *outlier*.

## 2.1 – Parâmetros extraídos de fontes bibliográficas

Foram adotados valores conservadores sugeridos pela ASTM (1995) e pela CETESB (2009) (Tabela 2). Devido à ausência de alguns parâmetros específicos para Minas Gerais optou-se na utilização da condutividade hidráulica calculada para o Estado de São Paulo, pois os valores alcançados através dos estudos em Minas Gerais geraram incertezas.

Tabela 2 - Parâmetros do meio físico, recomendados pela ASTM (1995) e pela CETESB (2009).

DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	FONTE*	UNIDADE	VALOR
<b>PARÂMETROS DO SOLO</b>				
Permeabilidade do solo ao vapor	$k_v$	CETESB, 2009	cm <sup>2</sup>	1,00E-6
Espessura do solo superficial	$L_s$	ASTM, 2002	cm	100,00
Espessura do solo subsuperficial	$d_{ss}$	ASTM, 2002	cm	345,00
Profundidade do topo da fonte	$L_{ss}$	ASTM, 2002	cm	100,00
<b>PARÂMETROS DA FONTE</b>				
Área da fonte (emissão de vapores e poeira)	$A$	CETESB, 2009	cm <sup>2</sup>	20250000,00
Espessura da fonte na água subterrânea	$S_d$	ASTM, 2002	cm	200,00
Largura da fonte na água subterrânea <sup>(1)</sup>	$S_w$	CETESB, 2009	cm	4500,00
Largura da área fonte no solo subsuperficial	$W_{ss}$	ASTM, 2002	cm	4500,00
Largura da área fonte no solo superficial	$W_s$	ASTM, 2002	cm	4500,00
<b>PARÂMETROS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA</b>				
Espessura da franja capilar	$h_{cap}$	ASTM, 2002	cm	5,00
Condutividade hidráulica	$K$	CETESB, 2009	cm/dia	11,23
Temperatura da água subterrânea	$T$	CETESB, 2009	K	298,00
Largura da área fonte na direção paralela ao fluxo da água subterrânea	$W_w$	CETESB, 2009	cm	4500,00
Distancia entre a área fonte na água subterrânea e o ponto de exposição	$X$	CETESB, 2009	cm	4500,00
Dispersividade longitudinal	$\alpha_x$	$\alpha_x = X \times 0,1$	m	4,50
Dispersividade transversal	$\alpha_y$	$\alpha_y = \alpha_x \times 0,33$	m	1,485
Dispersividade vertical	$\alpha_z$	$\alpha_z = \alpha_x \times 0,05$	m	0,225
Espessura da pluma dissolvida na água subterrânea	$\delta_{gw}$	ASTM, 2002	cm	200,00
<b>PARÂMETROS DE TRANSPORTE</b>				
Gradiente de pressão	$d_p$	CETESB, 2009	(g/cm.s <sup>2</sup> )	0
Viscosidade do ar	$\mu_{ar}$	CETESB, 2009	(g/cm.s <sup>2</sup> )	1,81E-04
Fluxo convectivo ao longo das fundações	$Q_s$	CETESB, 2009	(cm <sup>3</sup> /s)	0
Constante universal dos gases	$R$	ASTM, 2002	atm-L/mol-K	0,082
<b>PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO</b>				
Área das Fundações	$Ab$	CETESB, 2009	cm <sup>2</sup>	200000,00
Pé Direito	$Lb$	CETESB, 2009	cm	250,00
Espessura das fundações/paredes de construções	$Lcrk$	CETESB, 2009	cm	10,00
Fração da área de rachaduras/fendas nas fundações/paredes	$\eta$	ASTM, 2001	cm <sup>2</sup> -fenda/cm <sup>2</sup> -área total	0,01
Conteúdo volumétrico de ar nas fundações/paredes	$\theta_{acrk}$	MAXIMIANO, 2001	cm <sup>3</sup> -ar/cm <sup>3</sup> -vol total	0,2745
Conteúdo volumétrico de água nas fundações/paredes	$\theta_{wcrk}$	MAXIMIANO, 2001	H <sub>2</sub> O/cm <sup>3</sup> -vol total	0,1755
Perímetro das Fundações	$Xcrk$	CETESB, 2009	cm	1788,85
Profundidade da base das fundações	$Zcrk$	CETESB, 2009	cm	10,00

<sup>(1)</sup>O parâmetro varia de acordo com o tipo de uso e ocupação do solo. O valor apresentado na tabela correspondente ao uso agrícola. \* Respectivos anos das atualizações dos parâmetros.

### 3 – CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Visa avaliar a influência dos parâmetros do meio físico nos resultados dos cálculos dos VI – Valores de Intervenção. Foram criadas séries de dados que variaram dentro de faixas de valores máximos e mínimos encontrados na fase de levantamento das informações do meio físico. Os valores empregados abrangem todo o Estado de Minas Gerais, e não um compartimento específico.

A análise toxicológica para efeitos carcinogênicos é determinada pelo peso da evidência de ocorrência de câncer observado em estudos com animais e seres humanos. O conhecimento gerado por estes estudos formam ampliados através de pesquisas desenvolvidas principalmente pela U.S. Environmental Protection Agency – USEPA (1989) que, ao longo dos anos, vem desenvolvendo categorias de peso para classificar as substâncias químicas quanto à possibilidade delas induzirem câncer humano. Na avaliação de sensibilidade do modelo matemático, foram utilizados os VI do Benzeno, considerando o risco carcinogênico de  $10^{-5}$ , ou seja, um indivíduo exposto a um composto carcinógeno tem uma chance em cem mil de desenvolver câncer durante a sua vida.

Dos parâmetros analisados estão destacados aqui a Velocidade de Darcy ( $U_{gw}$ ) e a profundidade do nível d'água ( $L_{gw}$ ). O Benzeno é, dentre os compostos analisados, o mais solúvel e possui maior mobilidade. Desta forma, a Velocidade de Darcy é um importante parâmetro, apresentando uma relação diretamente proporcional com o VI (Figura 3). Também é notada a diminuição relativa do fator de lixiviação ( $LF_{sw}$ ) ocasionada pelo aumento da  $U_{gw}$  que, devido à diminuição das concentrações dissolvidas do composto na água subterrânea em relação às concentrações da fase retida.

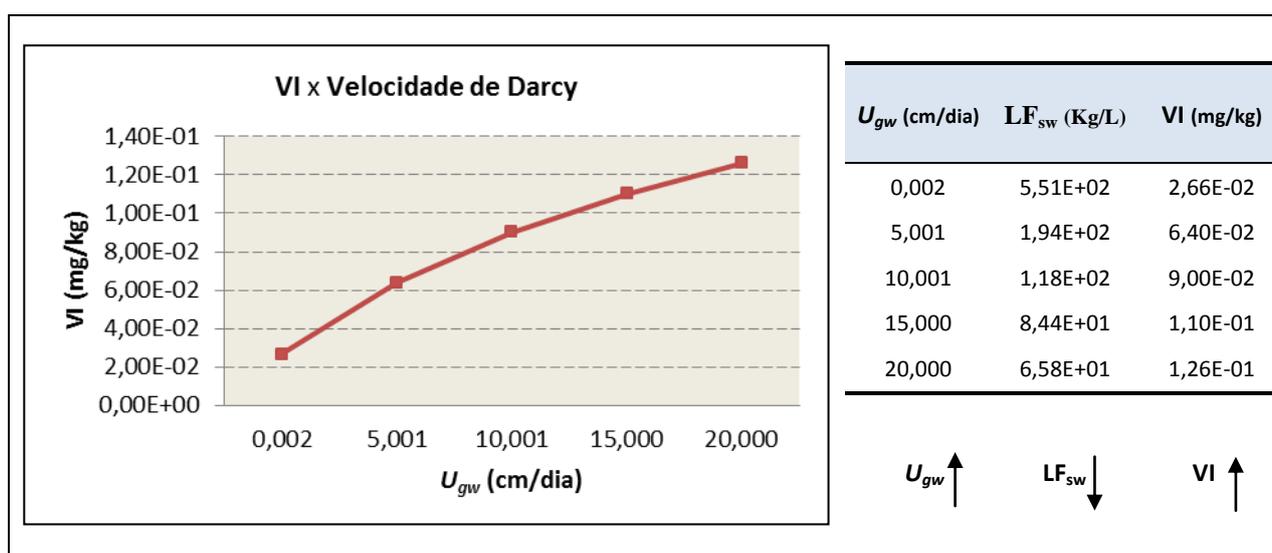


Figura 3. Gráfico de análise de sensibilidade para os Valores de Intervenção (VI) e do fator de lixiviação ( $LF_{sw}$ ) em função da Velocidade de Darcy ( $U_{gw}$ ).

A profundidade do nível d'água ( $L_{gw}$ ) apresenta pouca sensibilidade nos cálculos do VI. O que se observa na Figura 4 é uma variação mínima no fator de volatilização da água subterrânea para ambientes fechados ( $VF_{w,esp}$ ). O  $VF_{w,esp}$  diminui com o aumento do  $L_{gw}$  enquanto o VI mantém-se sem alteração. Apesar da grande faixa de valores adotados na série de dados do  $L_{gw}$  (entre 30 e 2300 cm) a estabilidade do VI também foi observada para os efeitos não carcinogênicos.

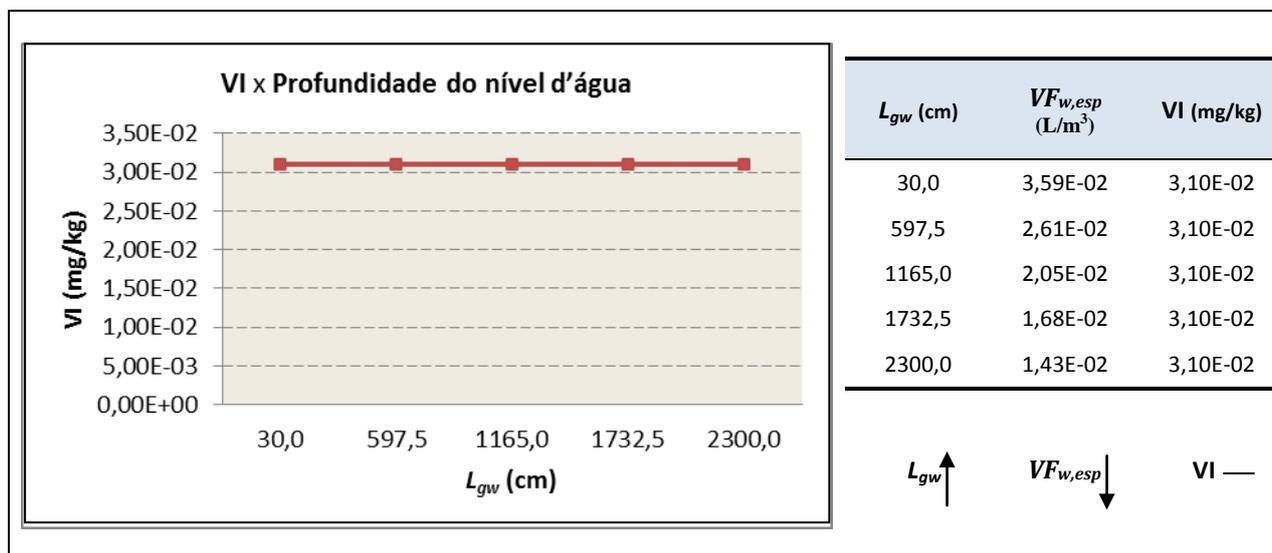


Figura 4. Gráfico de análise de sensibilidade para os Valores de Intervenção em função da profundidade do nível d'água ( $L_{gw}$ ).

#### 4 – CONCLUSÃO

O gerenciamento de áreas contaminadas através da metodologia de tomada de decisões baseadas no risco a saúde humana é uma técnica reconhecida internacionalmente. Para o Brasil, que compreende um território de proporções continentais, a utilização de tal ferramenta é ainda mais importante, já que permite a utilização de Valores de Intervenção específicos para cada região.

No presente estudo foram levantadas informações para elucidar sobre o que consiste o método de avaliação de risco a saúde humana, e estão reunidos dados do meio físico necessários para o cálculo de Valores de Intervenção (VI) fundamentados nas Concentrações Máximas Aceitáveis (CMA).

Os maiores valores para a espessura da zona não saturada estão nos compartimentos A/B e C/D/E, enquanto que no compartimento F, formado por rochas cristalinas, apresenta um valor um pouco abaixo da média do Estado. Este comportamento também pode ser observado com a profundidade do nível d'água. No caso do gradiente hidráulico essa relação é inversa, o maior valor

é observado no compartimento F, enquanto que os menores valores são atribuídos aos demais compartimentos. Essas variações refletiram principalmente na Velocidade de Darcy.

## **BIBLIOGRAFIA**

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; 1995. ASTM E1739: Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. Philadelphia. 1995.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2006. Ações Corretivas Baseadas em Risco (ACBR) aplicadas a áreas contaminadas com hidrocarbonetos derivados de petróleo e outros combustíveis líquidos – Procedimentos. Artigo 1º, inciso VII, da Decisão de Diretoria nº 010/2006/C – Anexo VII. São Paulo, SP. 59 p. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas\\_contaminadas/acbr.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/acbr.pdf)>. Acesso em: 18 Jul 2010.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2009. Áreas Contaminadas / Planilhas de Avaliação de Risco. Desenvolvido por: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, SP. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 02 ago 2001. Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/planilhas-para-avalia%E7%E3o-de-risco/8->>. Acesso em 18 Jul 2011.

HEINECK, C.A.; Leite, C.A.S.; Silva, M.A. da; Vieira, V.S. Mapa Geológico de Minas Gerais, escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, 2003. Desenvolvido por: Serviço Geológico Brasileiro – CPRM & Companhia Mineradora de Minas Gerais – COMIG. Versão digital. Disponível em: <[http://www.codemig.com.br/site/content/parcerias/levantamento\\_aerogeofisico.asp?id=30&idSubPrj=48](http://www.codemig.com.br/site/content/parcerias/levantamento_aerogeofisico.asp?id=30&idSubPrj=48)>. Acesso em 01 jun. 2011.

MAXIMIANO, A.M.S., 2001. Determinação dos Níveis Aceitáveis no ambiente para hidrocarbonetos utilizando o Procedimento de Ações Corretivas Baseadas no Risco (RBCA) – Aplicação para a Cidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. IGc/USP. São Paulo, SP.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA, 1989. Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I, Human Health Evaluation Manual (Part A), Interim Final. EPA/ 540/1-89/003. Washington, D.C. December. 1989.