

6 Análise Comparativa: Aquíferos do Vale Central

Como estabelecido no Capítulo 1, a motivação principal para a realização desta pesquisa foi a de aplicar uma nova metodologia de análise no transporte de vírus para as condições do Vale Central da Costa Rica. Foi considerada inicialmente dentro do escopo da pesquisa, a realização de trabalhos de campo num local específico do Vale Central. Porém, devido ao consumo inesperado de tempo durante a fase de programação e ao prazo imposto pelo programa de Doutorado, o escopo desta aplicação foi alterado. Foram definidas então três Geometrias Tipo representativas da estratigrafia de algumas áreas do Vale Central. As condições de fluxo nesses locais foram definidas a partir dos dados disponíveis pelo autor de consultorias nas que teve participação. Foram empregados para todas as camadas os mesmos parâmetros (α e n) do modelo Mualem – van Genuchten utilizados nas validações numéricas. Os valores utilizados não necessariamente representam as propriedades dos materiais do Vale Central. Os parâmetros de transporte foram obtidos dos valores da literatura mostrados no Capítulo 3. As três Geometrias Tipo foram analisadas com o programa VirTran-3D, e os resultados comparados como os valores fornecidos pelo MTAv. Embora os valores numéricos absolutos obtidos nestas análises não representem fielmente as condições reais de transporte no Vale Central, é possível de forma comparativa analisar a influência dos mecanismos não incorporados no MTAv na distribuição dos vírus no terreno e portanto nas distâncias máximas percorridas.

O MTAv empregado na Costa Rica, é um Método Baseado no Tempo de Trânsito dos microorganismos durante 70 dias. Essa metodologia considera que os vírus são transportados por advecção, e que são inativados na sua totalidade durante esse tempo de transporte. No fundo, essa metodologia está considerando que a pluma dos vírus é transportada por um mecanismo do tipo pistão. Essa metodologia também considera que a concentração dos vírus no terreno vai diminuindo a partir da zona de injeção (devido à inativação), até ser zero na

distância em que os 70 dias de transporte são completados, como mostrado na Figura 6.1. Resulta claro então, que a taxa de inativação dos vírus neste método é dada pela relação: #total de vírus injetados /70 dias. Se o MTA_v fosse visto como um Método Baseado no Risco, seria um método no qual a concentração máxima permitida é nula.

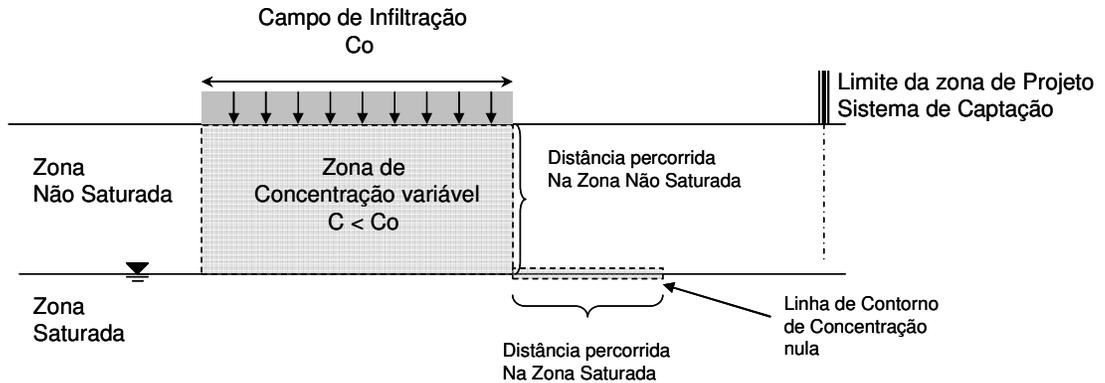


Figura 6.1 Variação da Concentração Segundo o MTA_v

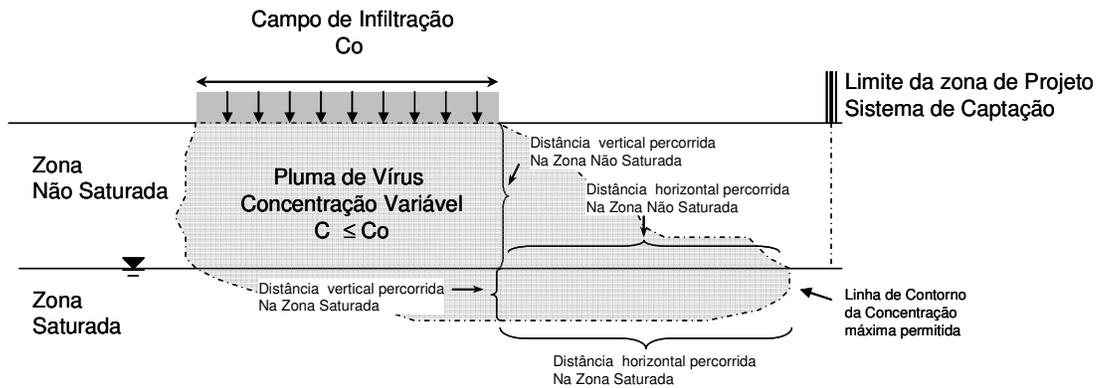


Figura 6.2 Variação da Concentração Segundo a Metodologia Baseada no Risco

A Metodologia Baseada no Risco parte do princípio que, junto à advecção existem outros mecanismos físicos que influenciam no transporte dos vírus e que podem ou não atuar de maneira simultânea. Nessa metodologia, a concentração dos vírus varia na distância e no tempo, definindo uma pluma cuja geometria dependerá das condições locais de transporte. Esse método usa como critério para a definição da zona de proteção, um valor de concentração máxima permitida e portanto interessa conhecer a extensão da pluma dos vírus até o valor desta concentração limite. Um exemplo esquemático é mostrado na Figura 6.2. Como indicado no Capítulo 2, a concentração máxima permitida na Holanda é $1,8 \times 10^{-4}$

vírus/m³. Devido à falta de outros valores, essa concentração foi utilizada como referência nas análises comparativas.

A partir dos comentários anteriores resulta claro que o MTA_v e o Método Baseado no Risco empregam critérios diferentes para definir o tamanho da zona de proteção, e portanto é de esperar que esses tamanhos sejam diferentes. Então, como comparar os resultados dessas duas metodologias se usam critérios diferentes? Para comparar os resultados é necessário definir critérios de igualdade entre as duas metodologias. Os critérios de igualdade definidos neste trabalho são descritos a seguir.

- Definir uma geometria única do problema.
- Definir as mesmas condições iniciais: Para a concentração foi definido um valor inicial nulo para todo o domínio. Para o fluxo foi definida uma condição inicial em termos da carga total. Os valores de carga total foram escolhidos de forma tal a reproduzir o valor e sentido do gradiente hidráulico natural. Desta forma, tanto na zona saturada quanto na zona não saturada, inicialmente existe fluxo apenas na direção do gradiente hidráulico natural. A imposição das cargas totais na zona não saturada gera uma distribuição na carga de pressão negativa que diminui linearmente desde a superfície do terreno até ser nula no ponto em que a carga de elevação é igual à carga total imposta.
- Definir condições de contorno claras e equivalentes para as duas metodologias: para o fluxo na zona saturada foram definidas condições de contorno do tipo Dirichlet em termos da carga total. Foram mantidos os mesmos valores das condições iniciais acima descritas, e essas condições foram impostas apenas nos planos do contorno localizados a jusante e a montante no sentido do gradiente hidráulico natural. Os planos restantes foram considerados impermeáveis (sem condição de contorno explícita). Com isto, o fluxo na zona saturada ocorre apenas na direção do gradiente hidráulico natural. Esta é uma condição válida para as duas

metodologias. No MTAv não é considerado o fluxo não saturado, mas sim o fluxo saturado em regime permanente na zona não saturada. Nessa metodologia então, para qualquer valor de vazão do efluente, o fluxo saturado permanente é estabelecido de forma imediata a partir do momento em que a injeção se inicia. Essa metodologia não analisa a condição transiente. Para reproduzir com o programa VirTran-3D o regime de fluxo permanente considerando o efeito da não saturação (uma das motivações desta tese), foram definidas as seguintes condições de contorno: vazão constante na zona de infiltração e contornos impermeáveis nos planos que definem as zonas não saturadas. Em todos os casos analisados, foram feitas simulações apenas do fluxo antes de realizar as simulações do transporte. Nessas análises, para as vazões do efluente empregadas, apenas o regime permanente em condição não saturada foi atingido. Não foi atingido o regime saturado. As distribuições de carga obtidas destas simulações serviram como condições iniciais para as simulações do transporte. Durante as simulações de transporte, as condições de contorno acima descritas para o fluxo foram mantidas.

Em relação ao problema de transporte, o MTAv considera que a injeção dos vírus é mantida contínua (não necessariamente constante) durante todo o tempo de trânsito. O MTAv também considera (embora de maneira implícita) que no contorno do domínio o gradiente da concentração é nulo. Para reproduzir as mesmas condições com o programa VirTran-3D, foram definidas as seguintes condições de contorno para o problema de transporte: concentração constante unitária e contínua na zona de infiltração, e condição de Cauchy no plano do contorno localizado a jusante no sentido do fluxo. Os planos restantes do contorno foram considerados impermeáveis (sem condição de contorno explícita).

- Definir os mesmos parâmetros para descrever o fluxo e o transporte.

- Realizar as análises para o mesmo intervalo de tempo: neste trabalho foi definido um tempo de simulação de 120 dias coincidente com o caso mais crítico de sobrevivência dos vírus, segundo os dados da Tabela 3.8. Para as análises com o MTAv foi empregado um tempo de trânsito também de 120 dias para comparar os resultados.
- Determinar as distâncias percorridas a partir dos mesmos pontos de referência. As distâncias de interesse (mostradas nas Figuras 6.1 e 6.2.) são: a distância vertical na zona não saturada (medida a partir do centro do campo de infiltração), e a distância horizontal na zona saturada (medida a partir da borda do campo de infiltração). As duas distâncias anteriores podem ser calculadas através das duas metodologias de análise e portanto podem ser comparadas diretamente. Na Figura 6.2 são mostradas outras distâncias de interesse que não são calculadas com o MTAv, mas que ajudam no entendimento do fenômeno de transporte. Neste caso são determinadas as distâncias: horizontal na zona não saturada (medida a partir da borda do campo de infiltração) e vertical na zona saturada (medida a partir do centro do campo de infiltração). Essas distâncias permitem quantificar os efeitos da dispersão no transporte dos vírus, é sobretudo permitem verificar se esses efeitos são importantes em relação à localização das captações vizinhas.

Neste capítulo é apresentada uma descrição dos aquíferos conhecidos e de importância comercial da zona central da Costa Rica. Seguidamente é apresentada uma comparação dos resultados das análises como o MTAv e o programa VirTran-3D. As análises comparativas foram feitas para três geometrias diferentes. Essas geometrias representam configurações estratigráficas presentes em algumas zonas do Vale Central. As configurações geométricas não pretendem abarcar todas as estratigrafias presentes e sim algumas geometrias de maior relevância. Dever ser dito novamente que os resultados das análises numéricas não devem ser avaliados em termos absolutos, sobre o que acontece nos aquíferos

do Vale Central, e sim como valores relativos da importância dos efeitos dos diversos fenômenos físicos que influenciam no transporte dos vírus.

6.1. Aqüíferos na Grande Área Metropolitana

A Grande Área Metropolitana da Costa Rica está localizada no Vale central do país (Figura 6.3). Mais dos 60% da população e quase toda a indústria estão concentrados nesta área, que representa menos de 11% do território nacional. (Denyer & Kussmaul, 1994).

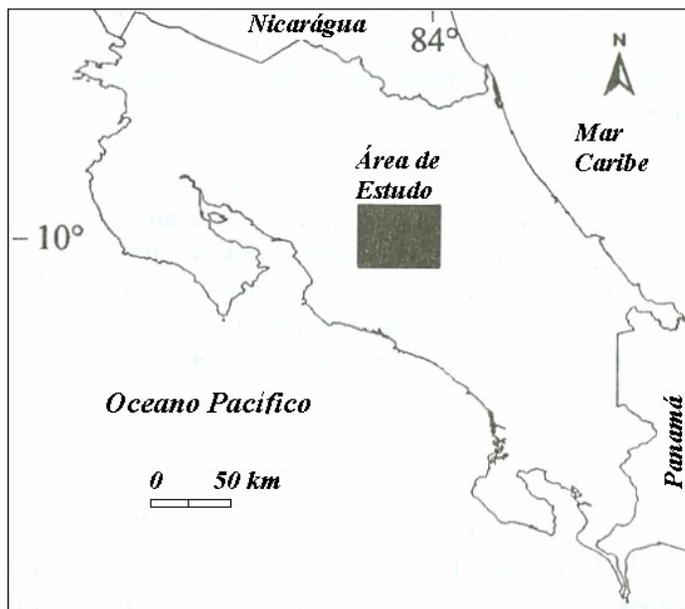


Figura 6.3 Localização do Vale Central da Costa Rica

Os aqüíferos mais importantes do Vale Central estão constituídos por materiais vulcânicos porosos e fraturados-porosos. Na Figura 6.4 apresenta-se o resumo estratigráfico destes aqüíferos. A descrição resumida de cada aqüífero é apresentada a seguir (baseada em Arredondo, 1994).

Aqüífero Barva: é dividido em dois aqüíferos. O superior “Aqüífero Los Angeles” é encontrado nas partes altas da zona norte do Vale Central. É um aqüífero de pouca extensão e com porosidade por fissuras e poros. O aqüífero inferior é conhecido como “Aqüífero Barva Inferior”. Está formado por

intercalações de lavas fraturadas e porosas com alta permeabilidade. A espessura destas camadas de lava varia entre 10 e 80 metros. A separação entre os aquíferos superior e inferior ocorre através de uma seqüência de aquíferos arenosos de origem vulcânica. O aquífero Barva é do tipo livre, e a recarga acontece por infiltração direta da chuva ou por rios influentes. A permeabilidade saturada deste aquífero varia entre 1–10 m/dia e o coeficiente de armazenamento apresenta um valor médio de 0,1.

O aquífero Barva está separado do aquífero Colima por uma seqüência vulcânica denominada “Depósitos de Avalancha Ardiente” com espessura de 45 a 150 metros. Os “Depósitos de Avalancha Ardiente” estão caracterizados por tufas e piroclastos porosos e fraturados. Desde o ponto de vista hidrogeológico, esta formação é considerada como aquífero. Os valores da permeabilidade saturada variam de $1,16 \times 10^{-4}$ a $2,72 \times 10^{-4}$ m/dia. Fraturas verticais que permitem o fluxo de água são comuns nesta formação.

O aquífero Colima é o mais importante do Vale Central. Está formado por intercalações de camadas de lava de espessura variável entre 10 e 30 metros. São reconhecidos três aquíferos. O superior denominado “Aquífero La Libertad” é do tipo suspenso e de baixo rendimento. Uma camada de tufa alterada com 10 m de espessura separa o “Aquífero La Libertad” do “Aquífero Colima Superior”. Esta camada de tufa é um aquífero. O “Aquífero Colima Superior” é de alto rendimento e está caracterizado por lavas fraturadas com matriz impermeável e lavas com textura tipo brecha. A espessura saturada máxima deste aquífero é de 55 metros, e a recarga acontece por percolação vertical a partir de outros aquíferos. Uma seqüência de camadas de tufas e ignimbritos colunares com 35 metros de espessura separa os aquíferos “Colima Superior” e “Colima Inferior”. Esta seqüência é um aquífero e em algumas zonas funciona como camada confinante do aquífero “Colima Inferior”. O “Aquífero Colima Inferior” está localizado a uma profundidade superior aos 100m. É formado por várias camadas de lava intercaladas com tufas, e a permeabilidade acontece principalmente nas fraturas. A recarga deste aquífero é por percolação vertical. As permeabilidades saturadas do aquífero Colima são bastante superiores aos valores do aquífero Barva, neste caso a permeabilidade varia entre 5 e 50 m/dia, gerando transmissividades da ordem de 500 ou superior a $5000 \text{ m}^2/\text{dia}$. O coeficiente de armazenamento varia de $1,5 \times 10^{-3}$ a 0,1.

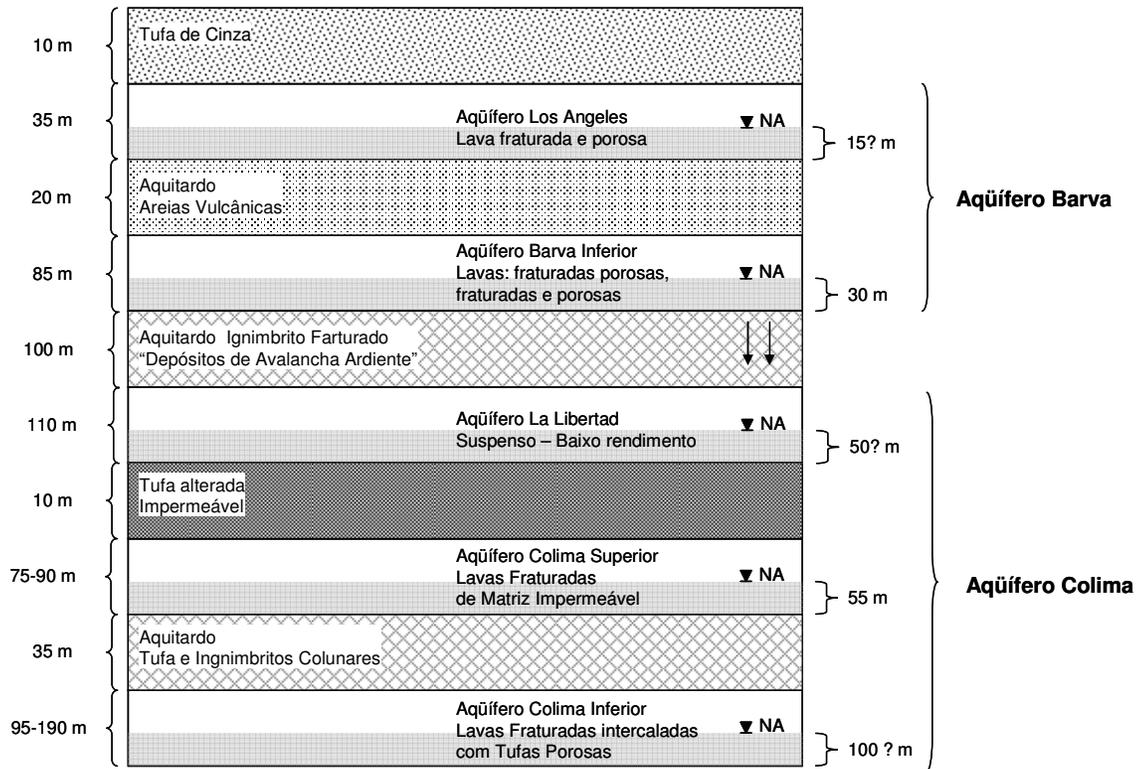


Figura 6.4 Estratigrafia dos Aquíferos do Vale Central da Costa Rica (Baseada em BGS-SENARA, 1985; Ramírez e Alfaro, 2002; Vargas, 2002)

6.2. Geometrias Tipo

A partir das informações na literatura sobre os aquíferos da Costa Rica e das informações disponíveis pelo autor sobre a estratigrafia e condições hidrogeológicas de algumas áreas do Vale Central, foram definidas três geometrias tipo que reproduzem a critério do autor as condições estratigráficas gerais do Vale Central. Essas geometrias tipo foram analisadas com o método MTA_v e com o programa VirTran-3D. As geometrias tipo foram denominadas Geometria 1, Geometria 2 e Geometria 3 e são mostradas na Figura 6.5. Nas figuras 6.6, 6.8 e 6.10 são mostradas as estratigrafias e parâmetros para cada geometria, e nas Figuras 6.7, 6.9 e 6.11 são mostrados os modelos hidrogeológicos respectivos.

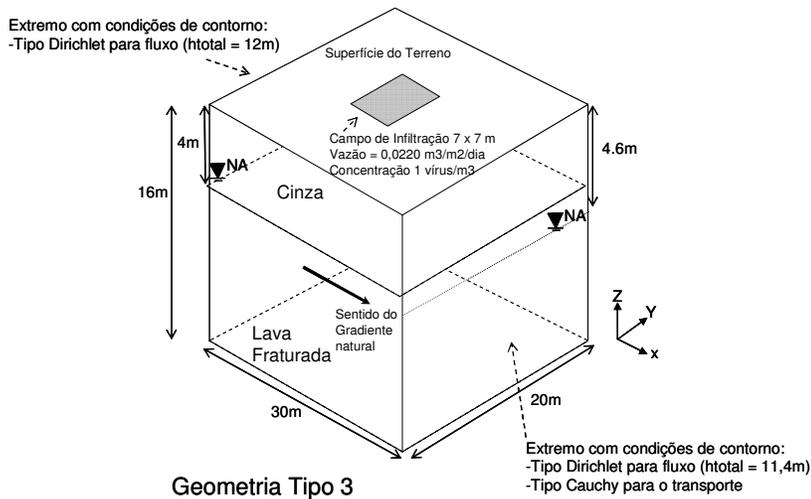
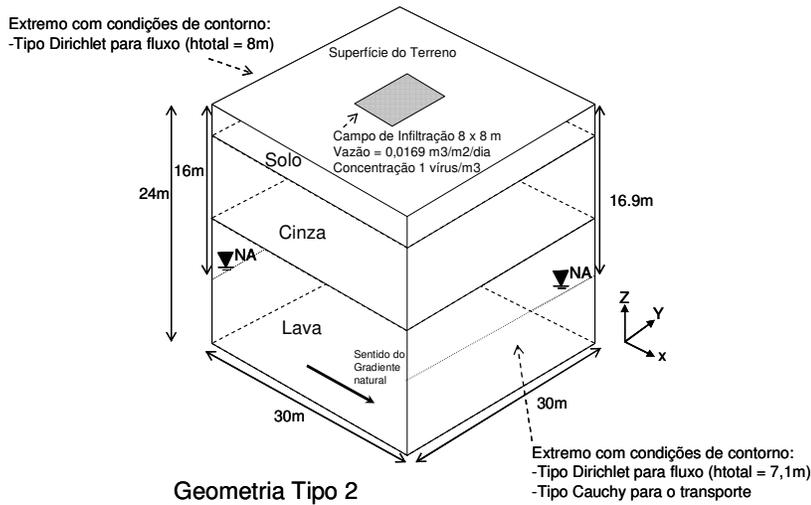
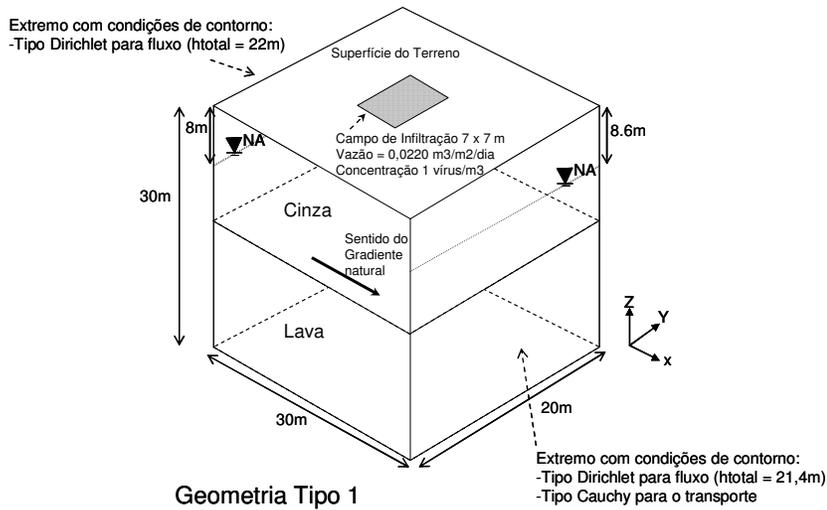


Figura 6.5 Geometrias Tipo. (obs. Nos planos sem condição de contorno especificada, considerou-se que são impermeáveis ao fluxo e aos vírus, isto é, não foi colocada explicitamente nenhuma condição de contorno).

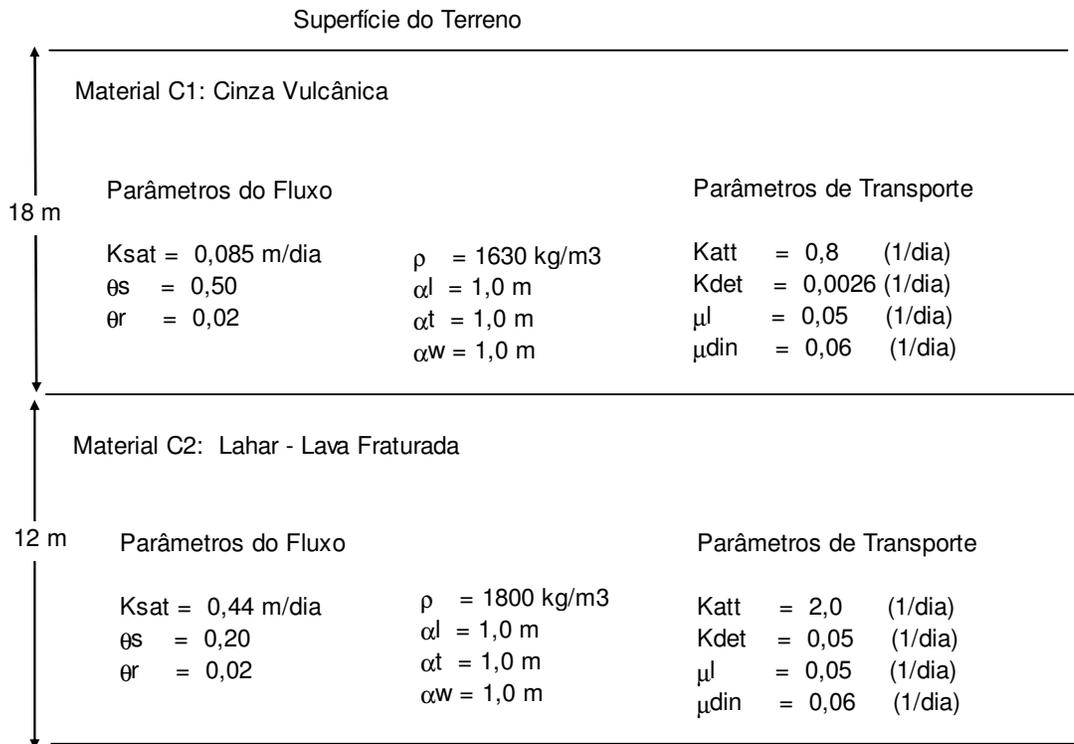


Figura 6.6 Estratigrafia e Parâmetros da Geometria 1.



Figura 6.7 Modelo Hidrogeológico da Geometria 1.

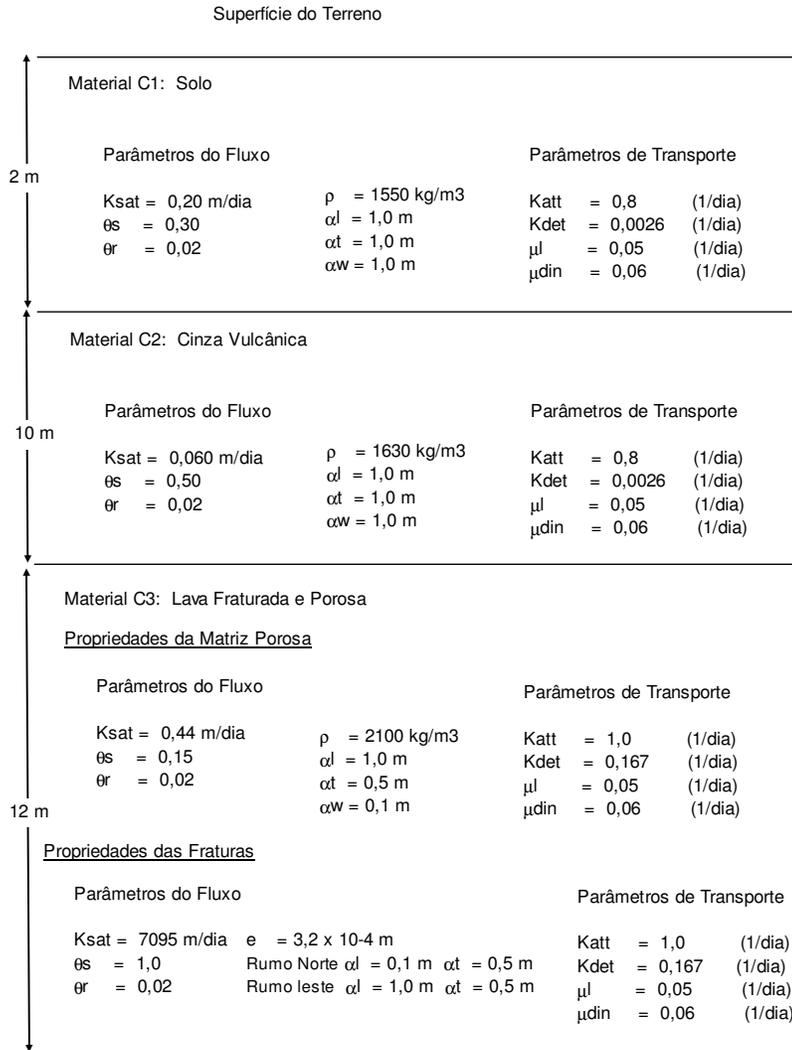


Figura 6.8 Estratigrafia e Parâmetros da Geometria 2.

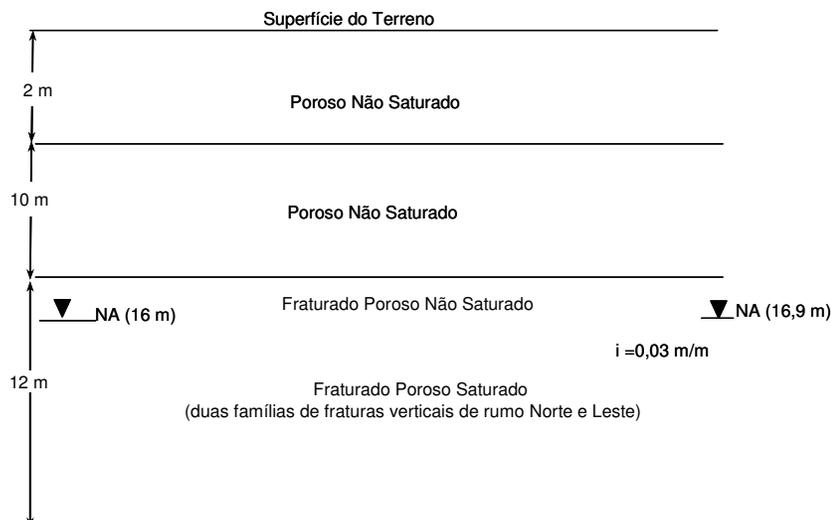


Figura 6.9 Modelo Hidrogeológico da Geometria 2.

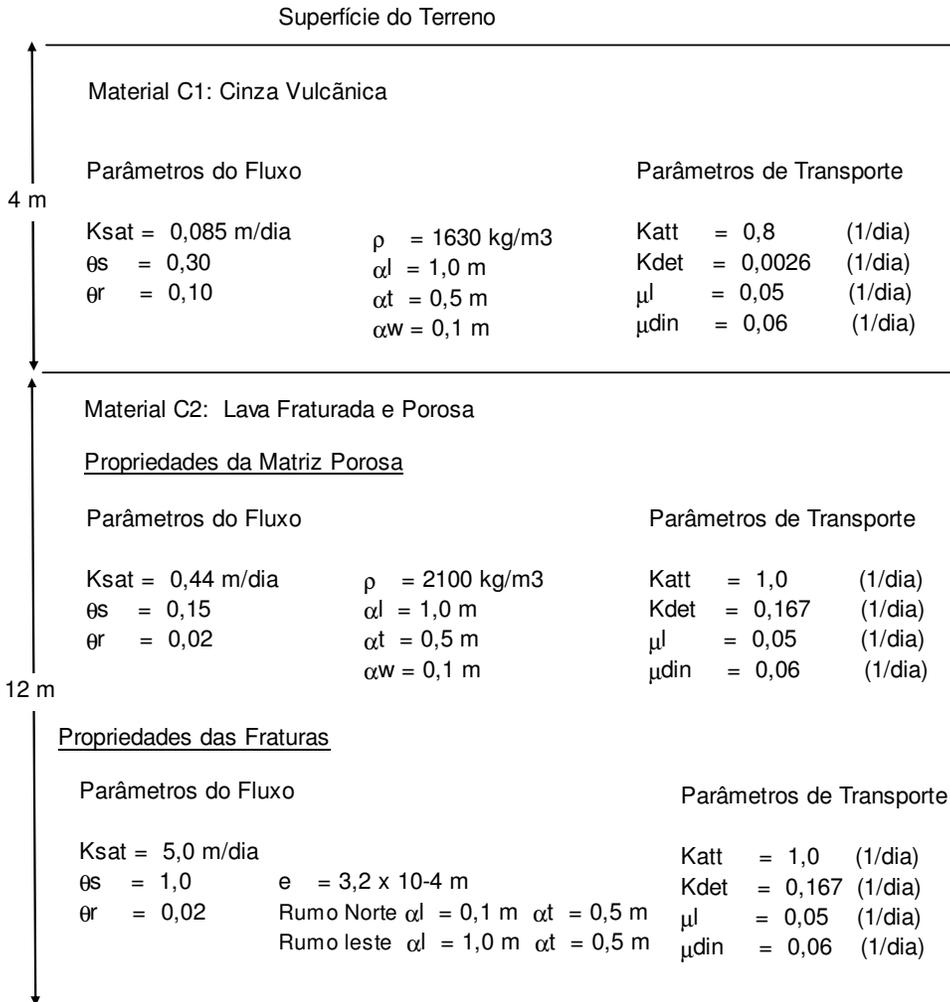


Figura 6.10 Estratigrafia e Parâmetros da Geometria 3.

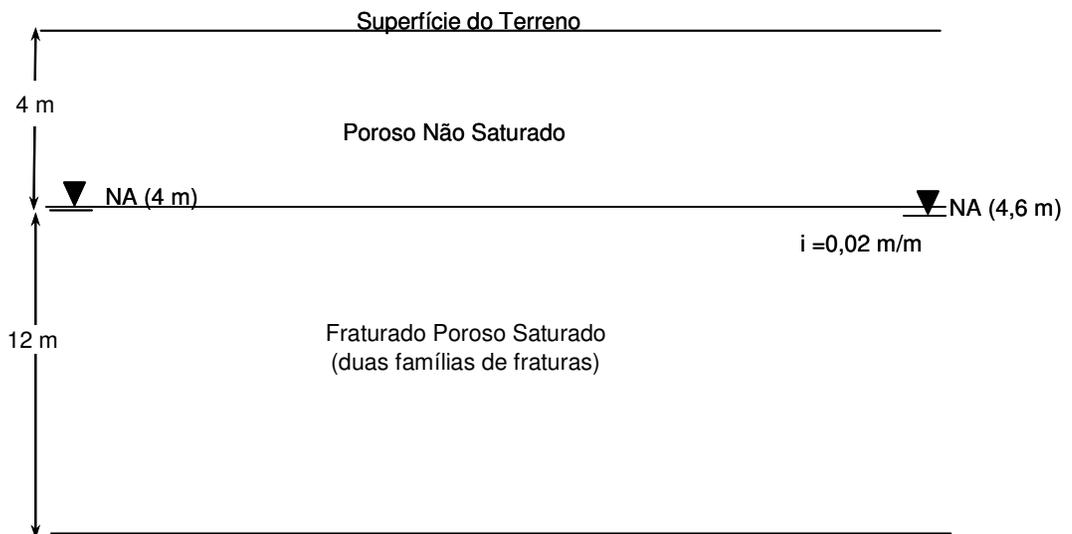


Figura 6.11 Modelo Hidrogeológico da Geometria 3.

Geometria 1

Na Geometria 1 é mostrada uma seqüência de duas camadas porosas. A camada superior corresponde à cinza vulcânica e a camada inferior à lahar – lava fraturada. A camada superior corresponde à tufa de cinzas mostrada na coluna estratigráfica da Figura 6.4. A camada inferior corresponde aos materiais do aquífero “Los Angeles”.

Geometria 2

Na Geometria 2 é mostrada uma seqüência similar à mostrada na Geometria 1, mas considerando que a camada superior apresenta um solo com permeabilidade maior que o da cinza vulcânica. Também nesta geometria são consideradas as fraturas e a porosidade da matriz da camada inferior.

Geometria 3

Nesta geometria apresenta-se novamente uma seqüência de duas camadas. A camada superior corresponde à cinza vulcânica e a camada inferior à lava fraturada porosa. Nesta geometria a espessura da camada superior é menor do que nas geometrias anteriores, e com isto se pretende verificar a possível influência do sistema de fraturas da camada inferior.

6.3. Análise do Transporte – MTAv

Neste item são apresentados os resultados do cálculo das distâncias percorridas empregando o método MTAv para um tempo de trânsito de 120 dias. Na Tabela 6.1 são apresentados os valores das permeabilidades e gradientes empregados para a determinação das velocidades de percolação (velocidade intersticial). Os valores mostrados na tabela são os mesmos das Figuras 6.6, 6.8 e 6.10.

Tabela 6.1 Velocidades de Percolação – MTA_v.

Geometria	Zona	Camada	Porosidade (m ³ /m ³)	K _{sat} (m/dia)	Gradiente (m/m)	Velocidade (m/dia)
1	Não Saturada	C1	0,50	0,085	1,00	0,170
	Saturada	C1	0,50	0,085	0,02	0,0034
		C2	0,20	0,440	0,02	0,0440
2	Não saturada	C1	0,30	0,200	1,00	0,667
		C2	0,50	0,060	1,00	0,120
		C3	0,15	0,440	1,00	2,940
	Saturada	C3	0,15	0,440	0,03	0,088
3	Não Saturada	C1	0,30	0,085	1,00	0,283
	Saturada	C2	0,15	0,440	0,02	0,059
		Fatura	1,00	5,000	0,02	0,100

Tabela 6.2 Cálculos Intermediários – MTA_v.

Geometria	Zona	Camada	Velocidade (m/dia)	EnS (m)	TnS (dias)	TtnS (dias)	Tr120 (dias)	DzS (m)
1	Não Saturada	C1	0,170	8,2	48	48		
	Saturada	C1	0,0034				72	0,25
2	Não Saturada	C1	0,667	2	3	87,4		
		C2	0,120	10	83			
		C3	2,940	4	1,4			
	Saturada	C3	0,088				32,6	2,90
3	Não Saturada	C1	0,283	4,3	15,2	15,2		
	Saturada	C2	0,059				104,8	6,20
		Fatura	0,100					10,50

EnS: Espessura não saturada de cada camada

TnS: Tempo necessário para o vírus transitar verticalmente pela camada não saturada

TtnS: Tempo total necessário para o vírus percorrer a zona na saturada

Tr120: Tempo necessário para completar 120 dias (Tr120 = 120-TtnS)

DzS: Distância percorrida pelo vírus na zona saturada sob o gradiente natural durante o tempo Tr120

Na Tabela 6.2 são mostrados os cálculos dos tempos necessários para os vírus percorrerem a zona não saturada e para completar os 120 dias de transporte. Na mesma tabela são mostradas as distâncias percorridas na zona saturada. O resumo dos valores das distâncias percorridas nas zonas não saturadas e saturadas é mostrado na Tabela 6.3. São estes valores os que serão comparados com os valores do programa VirTran-3D.

Tabela 6.3 Distâncias Percorridas – MTAv.

Geometria	Distância percorrida na zona não saturada (m)	Distância percorrida na zona saturada (m)
1	8,2	0,25
2	16,0	2,90
3	4,3	6,20 (na matriz) 10,5 (na fratura)

6.4.

Análise do Transporte – Programa VirTran-3D

Foi feita uma análise das geometrias acima descritas empregando o programa VirTran-3D. As geometrias foram discretizadas através de elementos tetraédricos e triangulares com a versão profissional do Programa GID 8.0.9. desenvolvido pelo *International Center for Numerical Methods in Engineering CIMNE*. Na Tabela 6.4 são mostradas algumas informações sobre as malhas geradas.

Tabela 6.4 Informações sobre as malhas geradas.

Geometria	Dimensões xyz (m)	Número de nós	Número de elementos: tetraedros	Número de elementos: triângulos
1	30x20x30	152 561	864 000	-
2	30x30x12	117 386	540 000	-
3	30x20x16	50 867	230 400	12 480

No caso da Geometria 2, a camada inferior não foi discretizada, pois uma tentativa inicial indicou que os vírus não chegariam até essa profundidade.

As análises foram realizadas segundo a seqüência a seguir:

- a. Foram inicialmente realizadas simulações apenas do fluxo de água. Neste caso considerou-se uma zona de injeção coincidente com o campo de infiltração do sistema do tanque séptico. Isto é, foi injetada apenas água sem vírus. As condições de contorno foram estabelecidas de maneira tal a reproduzir o gradiente hidráulico do aquífero. A água foi injetada com uma vazão tal que permitisse a infiltração diária de 1080 litros. A dimensão do campo de infiltração foi obtida a partir do projeto desse campo segundo a metodologia do Ministério de Saúde da Costa Rica, para os valores de taxa de infiltração disponíveis para cada geometria. Na Tabela 6.5 são mostradas as condições de contorno para o problema de fluxo e os tempos de simulação. Os tempos de simulação foram escolhidos de maneira arbitrária a fim de representar injeções para sistemas de tratamento com pouco tempo de uso (Geometrias 1 e 2) e para sistemas com vários anos de antiguidade (Geometria 3). Sendo que nestas análises a direção do fluxo é conhecida, optou-se por definir o eixo X das coordenadas para representar essa direção, com valores crescentes na direção do fluxo. Desta forma, X_0 representa a coordenada no contorno (a montante) em $x = 0$, e X_L representa a coordenada no contorno (a jusante) em $x = L$ onde L é o comprimento do domínio na direção do fluxo (dimensão x da Tabela 6.4). As cargas iniciais foram definidas a partir da interpolação linear ao longo do eixo x das cargas impostas no contorno.

Tabela 6.5 Condições de contorno para a simulação do fluxo.

Geometria	Carga em X_0 (m)	Carga em X_L (m)	Gradiente Resultante	Dimensões do campo de Infiltração (m x m)	Vazão injetada ($m^3/m^2/dia$)	Tempo de simulação
1	22	21,4	0,02	7x7	0,0220	30 dias
2	8	7,1	0,03	8x8	0,0169	40 dias
3	12	11,4	0,02	7x7	0,0220	25 anos

- b. Seguidamente foram feitas as análises do transporte de vírus. Nestas análises foram mantidas as mesmas condições de contorno mostradas na Tabela 6.5. As condições iniciais para as cargas foram definidas a partir das distribuições obtidas nas análises do item anterior (a). Em relação à concentração, foi definido um valor unitário constante imposto no campo de infiltração. No plano do contorno em X_L foi imposta uma condição Tipo Cauchy, e nos planos restantes não foi imposta condição explícita. Foi definida uma concentração inicial nula em todo o domínio.

Para cada geometria foram analisados três casos e para todos eles o tempo de simulação foi de 120 dias. Os casos analisados são:

- Caso I: Transporte considerando Advecção e Dispersão
- Caso II: Transporte considerando Advecção, Dispersão e Inativação.
- Caso III: Transporte considerando Advecção, Dispersão, Inativação e Sorção Dinâmica

Nas Tabelas 6.6, 6.7 e 6.8 são mostrados os tempos de processamento computacional requerido durante às análises, para cada geometria.

Tabela 6.6 Tempos de Processamento computacional para os casos da Geometria 1.

Casos: Geometria 1	Passo de tempo (dias)	Tempo de simulação (dias)	Tempo de Processamento (horas)	Tipo de Processador
I. Adv.+Disp.	0,1	120	42,5	P1
II. Adv. + Disp. + Inat.	0,1	120	42,5	P1
III. Adv. + Disp. + Inat. + S.Din.	0,1	120	69,5	P1
Fluxo	0,1	30	5,25	P1

Tipos de processadores utilizados: P1 = Pentium (R) 4 1.71 GHz 768 MB de RAM,

P2 = Pentium (R) D 3.40 GHz 3.25 GB de RAM

Tabela 6.7 Tempos de Processamento computacional para os casos da Geometria 2.

Casos: Geometria 2	Passo de tempo (dias)	Tempo de simulação (dias)	Tempo de Processamento (horas)	Tipo de Processador
I. Adv.+Disp.	1	120	12,5	P1
II. Adv. + Disp. + Inat.	1	120	6,6	P2
III. Adv. + Disp. + Inat. + S.Din.	1	120	8,6	P2
Fluxo	1	40	1,4	P2

Tabela 6.8 Tempos de Processamento computacional para os casos da Geometria 3.

Casos: Geometria 3	Passo de tempo (dias)	Tempo de simulação (dias)	Tempo de Processamento (horas)	Tipo de Processador
I. Adv.+Disp.	0,1	120	15,7	P1
II. Adv. + Disp. + Inat.	0,1	120	8,2	P2
III. Adv. + Disp. + Inat. + S.Din.	0,1	120	13,8	P2
Fluxo	9125 (25 anos)	25 (anos)	1,8 (minutos)	P1

- c. Os resultados das análises do item (b) foram graficados no Processador gráfico POS-3D 2.24. Nesse processador foram desenhados os isovolumes de concentração considerando o valor mínimo da concentração a ser graficado de $C = 0,0002 \text{ virus/m}^3$. Esse valor define a dimensão da pluma de dispersão para a concentração máxima permitida ($1,8 \times 10^{-4} \approx 2 \times 10^{-4} \text{ vírus/m}^3$). Nas plumas obtidas, foram medidas as distâncias de interesse descritas no início deste capítulo. Nas Figuras 6.12, 6.13 e 6.14 são apresentados os resultados obtidos, e em cada uma delas são mostradas as formas e dimensões das plumas resultantes, também

vistas de cima e uma seção paralela ao sentido do gradiente natural no ponto médio do domínio. Na Tabelas 6.9, 6.10 e 6.11 são mostradas as distâncias de interesse para cada caso analisado. Nessas tabelas, a soma das distâncias verticais nas zonas saturadas e não saturadas corresponde com o valor da distância vertical mostrada nas seções das Figuras 6.12, 6.13 e 6.14.

Tabela 6.9 Distâncias percorridas para os casos da Geometria 1.

Casos: Geometria 1	Distâncias Percorridas (m)			
	Zona Não Saturada		Zona Saturada	
	Na Vertical	Na Horizontal	Na Vertical	Na Horizontal
I. Adv.+Disp.	8,2	6,3	0,2	0,0
II. Adv. + Disp. + Inat.	6,4	4,5	0,0	0,0
III. Adv. + Disp. + Inat. + S.Din.	2,4	1,9	0,0	0,0

Profundidade média do NA = 8,2 m

Tabela 6.10 Distâncias percorridas para os casos da Geometria 2.

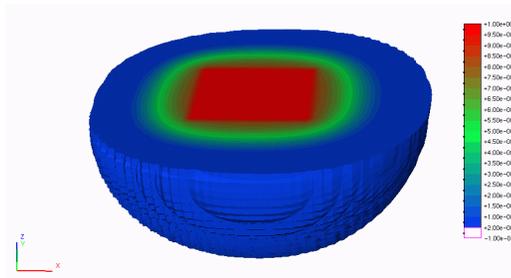
Casos: Geometria 2	Distâncias Percorridas (m)			
	Zona Não Saturada		Zona Saturada	
	Na Vertical	Na Horizontal	Na Vertical	Na Horizontal
I. Adv.+Disp.	7,5	8,7	0,0	0,0
II. Adv. + Disp. + Inat.	5,9	6,6	0,0	0,0
III. Adv. + Disp. + Inat. + S.Din.	2,3	2,4	0,0	0,0

Profundidade média do NA = 16,45 m

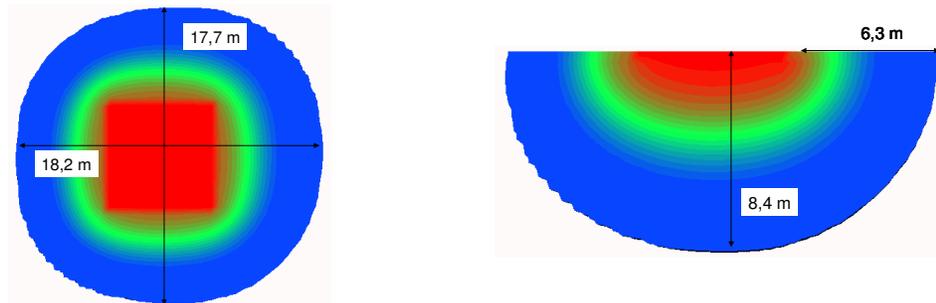
Tabela 6.11 Distâncias percorridas para os casos da Geometria 3.

Casos: Geometria 3	Distâncias Percorridas (m)			
	Zona Não Saturada		Zona Saturada	
	Na Vertical	Na Horizontal	Na Vertical	Na Horizontal
I. Adv.+Disp.	4,3	7,7	7,9	15,2
II. Adv. + Disp. + Inat.	4,3	6,1	3,9	6,8
III. Adv. + Disp. + Inat. + S.Din.	3,3	2,7	0,0	0,0

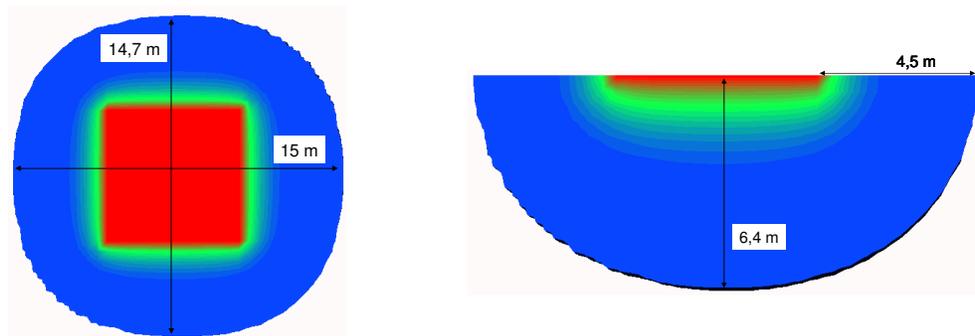
Profundidade média do NA = 4,3 m



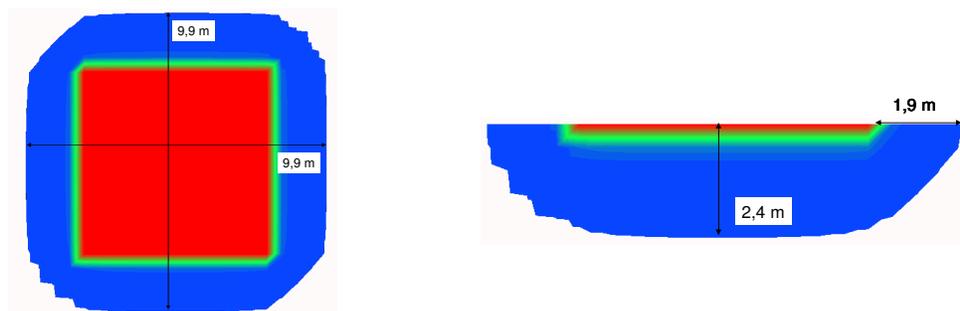
(a) Forma da Pluma



(b) Caso I: Dimensões da Pluma para Advecção e Dispersão

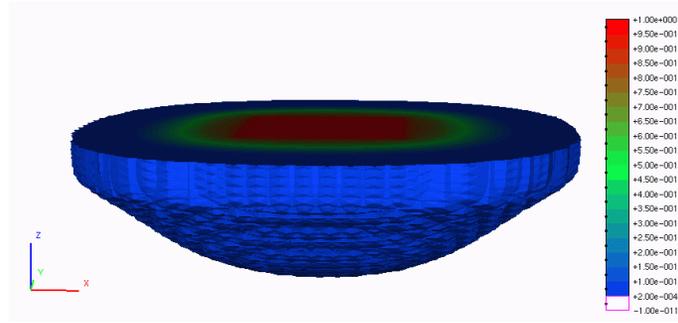


(c) Caso II: Dimensões da Pluma para Advecção , Dispersão e Inativação

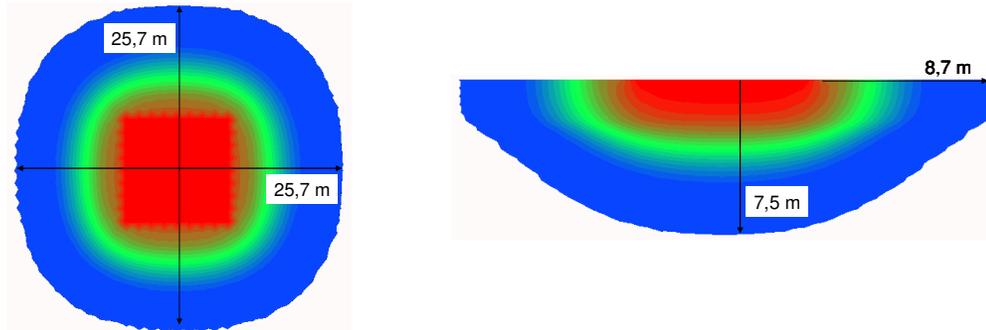


(d) Caso III: Dimensões da Pluma para Advecção, Dispersão, Inativação e Sorção Dinâmica

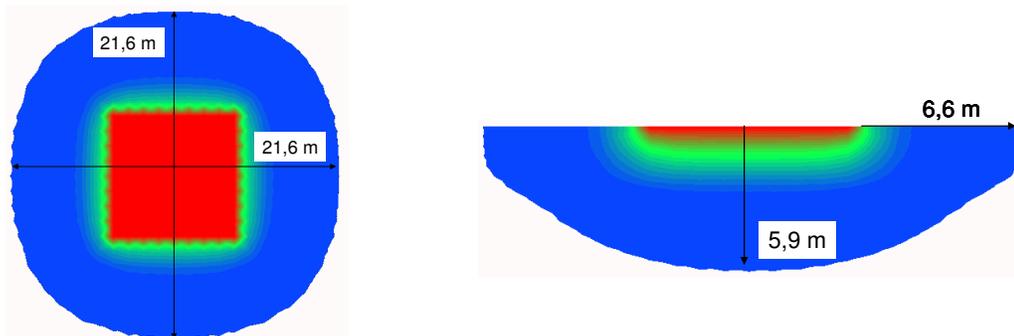
Figura 6.12. Resultados das Análises da Geometria 1.



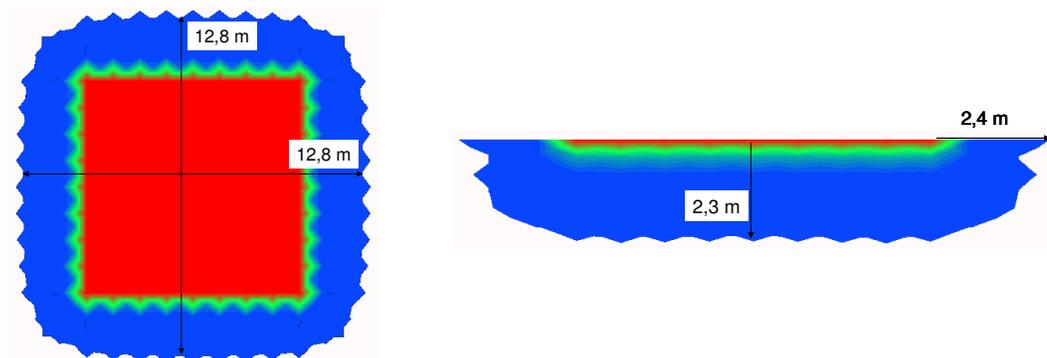
(a) Forma da Pluma



(b) Caso I: Dimensões da Pluma para Advecção e Dispersão

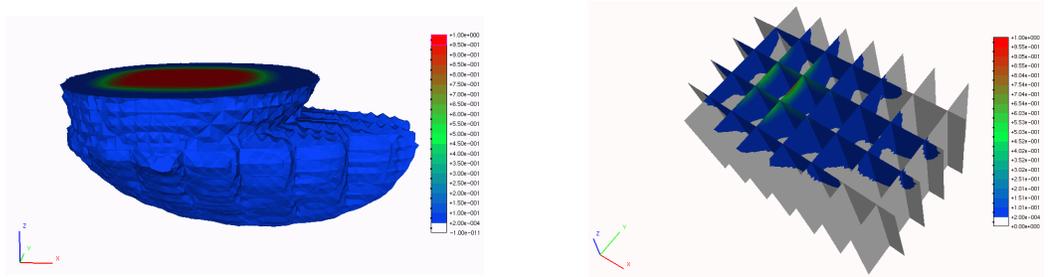


(c) Caso II: Dimensões da Pluma para Advecção, Dispersão e Inativação

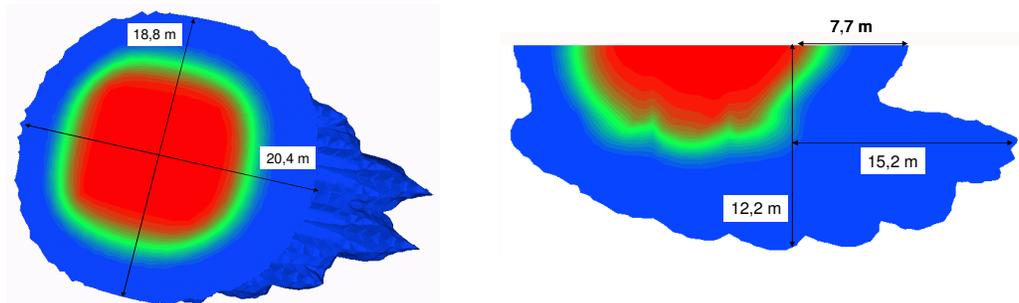


(d) Caso III: Dimensões da Pluma para Advecção, Dispersão, Inativação e Sorção Dinâmica

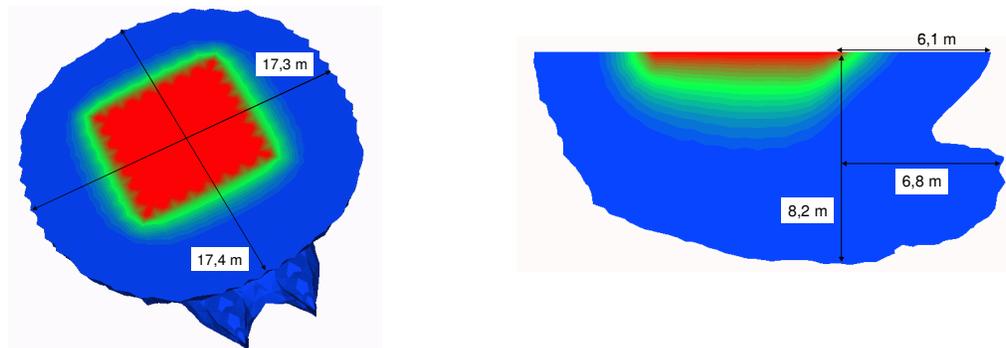
Figura 6.13. Resultados das Análises da Geometria 2.



(a) Forma da Pluma na Matriz e nas Fraturas



(b) Caso I: Dimensões da Pluma para Advecção e Dispersão



(c) Caso II: Dimensões da Pluma para Advecção, Dispersão e Inativação



(d) Caso III: Dimensões da Pluma para Advecção, Dispersão, Inativação e Sorção Dinâmica

Figura 6.14. Resultados das Análises da Geometria 3.

6.5. Análise dos Resultados e Comparação das Metodologias

- a. Na Tabela 6.12 são mostradas as comparações das distâncias percorridas pelos vírus segundo o método MTAv e o programa VirTran-3D. Os valores mostrados na tabela resultam da normalização dos valores das Tabelas 6.9 a 6.11 com os valores da Tabela 6.3. Foram comparadas as distâncias verticais na zona não saturada e as distâncias horizontais na zona saturada. Como indicado no início deste capítulo, essas distâncias calculadas com as duas metodologias podem ser comparadas de forma direta. Os valores normalizados mostrados na Tabela 6.12 permitem observar a relação direta entre as distâncias obtidas com o MTAv e as distâncias obtidas considerando outros fenômenos físicos durante o transporte dos vírus.

Tabela 6.12. Distâncias percorridas normalizadas com os valores do método MTAv.

Geometria	Distâncias Percorridas Normalizadas			
	Zona	Caso I	Caso II	Caso III
1	Não Saturada	1,00	0,78	0,29
	Saturada	0,00	0,00	0,00
2	Não Saturada	0,47	0,37	0,14
	Saturada	0,00	0,00	0,00
3	Não Saturada	1,00	1,00	0,77
	Saturada (Fratura)	1,45	0,65	0,00

Da Tabela 6.12 é possível observar que as distâncias diminuem sempre na seguinte ordem Caso I > Caso II > Caso III. Isto não é de surpreender devido ao fato dos casos II e III considerarem fenômenos que efetivamente removem vírus sendo que o Caso I incorpora fenômenos que atenuam as concentrações, mas não removem vírus.

Distâncias Verticais na Zona não Saturada: Os valores fornecidos pelo MTAv são em geral maiores aos valores obtidos com o programa VirTran-3D. Isto é claramente devido ao fato de considerar a permeabilidade saturada para determinar esta distância. As diferenças são maiores para a Geometria 2 onde a espessura da zona não saturada é maior e a permeabilidade menor. Para espessuras não saturadas menores (Geometria 3), o MTAv previu a chegada dos vírus no nível da água, como o programa VirTran-3D mesmo considerando fluxo não saturado. Em dependência dos parâmetros de transporte e especialmente das condições de fluxo, o MTAv pode fornecer distâncias muito conservadoras como indicam os valores para a Geometria 2, mas também pode indicar corretamente que os vírus chegarão no nível da água.

Distâncias na zona Saturada: Apenas na Geometria 3 foi atingido o nível saturado de maneira considerável. Isto é, embora no MTAv seja previsto o deslocamento horizontal dos vírus na zona saturada, nos resultados do programa VirTran-3D apenas na Geometria 3 foi previsto esse deslocamento (lembrar que esse deslocamento é medido a partir da borda do campo de infiltração e não dentro desse campo). No caso da Geometria 3, os valores obtidos com o programa foram diferentes dos calculados com o MTAv. A diferença nos valores é muito influenciada pelos fenômenos físicos envolvidos na simulação. No Caso I as distâncias normalizadas são maiores que 1, isto devido aos processos dispersivos ao longo das fraturas. Para os Casos II e III, os valores normalizados são menores que 1. Isto é, o MTAv forneceu valores superiores aos deslocamentos quando consideradas a inativação e a sorção dinâmica. No Caso III o nível da água não é atingido e por isto o deslocamento horizontal é nulo.

Das observações anteriores é possível concluir que mesmo se definindo critérios de igualdade para comparar as distâncias calculadas, as comparações mostraram uma alta variabilidade. No caso do transporte na zona não saturada, o MTAv pode prever corretamente a chegada de vírus no nível da água, mas dependendo especialmente da espessura da zona não saturada o MTAv pode fornecer resultados muito conservadores. No caso do transporte na zona saturada, com apenas um exemplo para comparação e devido à variabilidade dos resultados obtidos, não é possível concluir se o MTAv fornecerá valores corretos.

Em termos gerais, o MTAv se apresentou, para os exemplos aqui analisados, como bastante conservador quando considerados os casos III das Geometrias 1 e 3 e muito conservador para todos os casos da Geometria 2. Por outro lado a metodologia se mostrou pouco conservadora quando comparada com o caso I da Geometria III.

- b. Na Tabela 6.13 são apresentadas as comparações das distâncias percorridas nas zonas não saturada e saturada nos sentidos horizontal e vertical, respectivamente. Estes valores não são previstos no MTAv, mas foram calculados para verificar os efeitos da dispersão. Os valores foram normalizados da seguinte maneira: as distâncias horizontais na zona não saturada foram normalizadas com as distâncias horizontais na zona saturada da Tabela 6.3, e as distâncias verticais na zona saturada foram comparadas com as distâncias verticais na zona não saturada da mesma tabela.

Tabela 6.13. Distâncias percorridas normalizadas com os valores do método MTAv.

Geometria	Distâncias Percorridas Normalizadas			
	Zona	Caso I	Caso II	Caso III
1	Não Saturada (horizontal)	25,20	18,00	7,60
	Saturada (vertical)	0,03	0,00	0,00
2	Não Saturada (horizontal)	3,00	2,30	0,82
	Saturada (vertical)	0,00	0,00	0,00
3	Não Saturada (horizontal)	0,73	0,58	0,25
	Saturada (vertical, na Fratura)	1,80	0,90	0,00

Desta tabela é possível observar que o MTAv ao não considerar os efeitos dispersivos na zona não saturada, se mostra muito liberal na determinação da distância máxima horizontal percorrida, como mostram os resultados das Geometrias I e II. Isto é, a distância horizontal prevista pelo programa VirTran-3D na zona não saturada, é superior à distância horizontal prevista pelo MTAv na zona saturada, mesmo nos casos onde a sorção e o decaimento são considerados. A partir dos resultados para as Geometrias I e II (Tabelas 6.12 e 6.13) pode se dizer que é possível existir transporte horizontal na zona não saturada sem necessariamente existir transporte horizontal na zona saturada. No caso da Geometria III o MTAv mostra-se conservador, e isto provavelmente seja devido aos menores valores de dispersividade empregados nesta geometria.

Em relação ao trânsito vertical na zona saturada, apenas nos resultados da Geometria 3 foi possível observar penetração vertical no aquífero. Os deslocamentos verticais para os Casos I e II desta geometria, se comparados com a espessura do aquífero (12 m, Figura 6.11), representam penetrações verticais na ordem dos 65% e 30% da espessura, respectivamente. Se considerarmos a possibilidade de comunicação entre aquíferos, a dispersão pode ser um mecanismo importante de transmissão de vírus de um aquífero para outro. Esse risco não é previsto pelo MTAv.

- c. Se considerarmos que todos os Casos III das geometrias analisadas representam as condições reais de transporte dos vírus, pode se concluir que o MTAv se apresenta como conservador ou muito conservador para prever a chegada de vírus no nível da água. Por outro lado, essa mesma metodologia se apresenta como inadequada para determinar as distâncias horizontais máximas transitadas na zona não saturada podendo fornecer resultados muito liberais como na Geometria 1 ou muito conservadores como na Geometria III.
- d. Se pensarmos que os efeitos dispersivos estão sempre presentes no transporte de qualquer substância e considerarmos a inativação da mesma forma como é considerada no MTAv (isto é, a inativação não é colocada explicitamente dentro da formulação, mas define-se que ocorrerá durante o tempo de simulação), então os Casos I das geometrias analisadas seriam os casos representativos das condições de campo. Para estes casos, os resultados indicam que o MTAv pode prever de maneira correta a chegada de vírus ao nível da água, porém, quando a espessura da zona não saturada aumenta, o MTAv fornece resultados conservadores. Em relação às distâncias percorridas horizontalmente, dependendo dos parâmetros de dispersão, os resultados do MTAv podem ser conservadores ou muito liberais. Em relação às distâncias verticais na zona saturada, o MTAv não prevê o risco de forte penetração vertical no aquífero.

- e. Os pontos anteriores permitem concluir que, para os casos aqui analisados, o MTA_v pôde prever de maneira correta a chegada dos vírus ao nível da água dependendo principalmente da espessura da zona não saturada e dos parâmetros de transporte, mas, em geral se apresentou como muito conservador para prever essa chegada. O MTA_v se mostrou inadequado para definir as distâncias horizontais, pois dependendo das condições de campo, os resultados foram conservadores ou muito liberais. Isto é importante porque é essa distância horizontal a que define a distância de separação que deve existir em relação às captações vizinhas. O MTA_v não previu a possibilidade de contaminação vertical do aquífero. Este pode ser um mecanismo importante de contaminação entre aquíferos comunicados.
- f. Devido ao caráter aproximado dos parâmetros e concentrações empregados para simular as condições de transporte e fluxo não saturado nos materiais do Vale Central, não foi possível generalizar as conclusões anteriores para casos reais de campo. Isto não significa que as observações anteriores não sejam fisicamente válidas para as condições de campo no Vale Central, mas significa que é necessário verificar a intensidade dos efeitos observados a partir do emprego de parâmetros específicos dos materiais daqueles locais. É necessário verificar a possibilidade de que os resultados do MTA_v mostrem o mesmo comportamento observado nestes exemplos. Deve ser lembrado que nos exemplos aqui analisados, apesar de serem hipotéticos, foram empregados parâmetros reais embora não necessariamente representativos das condições locais da Costa Rica. Os resultados anteriores reforçam a idéia de se realizarem análises deste tipo para as condições de campo.