UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS E DOS PROCESSOS ATENUANTES DE TRANSPORTE NA DELINEAÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS (APPs) E NA REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS

Maria Tereza de Castelo Branco Ferreira Cleary

Orientador: Robert William Cleary, PhD

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós - Graduação em Recurso Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
1992

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS E DOS PROCESSOS ATENUANTES DE TRANSPORTE NA DELINEAÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS (APPs) E NA REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS

Maria Tereza de Castelo Branco Ferreira Cleary

Orientador : Robert William Cleary, PhD

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós - Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

1992

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS E DOS PROCESSOS ATENUANTES DE TRANSPORTE NA DELINEAÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS (APPs) E NA REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS

Maria Tereza de Castelo Branco Ferreira Cleary

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T1241
U. S. P.

Orientador: Robert William Cleary, PhD

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. A.Pacheco	
Examinadores:	Dr. B.P.F.Braga Junior	
	Dr. F.Taioli	

São Paulo
1992

Dedicatória

Para o meu pai Antônio (in memorium), que com certeza estaria contente de me ver entregar esta tese; para a minha mãe e amiga Odília, pela felicidade de tê-la presente nos acontecimentos importantes da minha vida, incentivando-me com o seu amor e o seu exemplo, contente de me ver concluir esta tese. À minha avó Rita, pelas horas felizes na sua fazenda. Para o meu marido e orientador Bob, um perseguidor da excelência profissional e meu mentor nesta área, pela clareza e abundância de informações, pelo amor, incentivo e apoio nos anos de realização desta tese. Para os meus filhos Tommy e Ticky, pelas horas que deixamos de brincar ou conversar para que esta tese fosse realizada. E também para meus irmãos Eduardo e Paulo, cunhadas Débora e Vânia, tios e tias e amigos, pelo amor, carinho e incentivo. Para os sobrinhos Marina, Felipe, Victor e Mariana, a geração futura que junto com meus filhos continuarão a proteger a água que necessitamos para viver. E para os governos estaduais e municipais brasileiros, interessados em manter a boa qualidade da água fornecida a seus cidadãos.

RESUMO

A importância da água subterrânea reside no fato de ser a água essencial à vida e, muitas vezes, ser esta a única fonte de água, ou representar uma porção significante da água total utilizada por uma cidade. A maioria dos habitantes das áreas rurais e dos subúrbios, 90% das indústrias e quase 50% dos habitantes urbanos do Brasil usam água subterrânea (Rebouças, 1988).

No Estados Unidos aproximadamente metade da população serve-se de água subterrânea para beber e cerca de 95% da população rural depende de água subterrânea.

A água subterrânea constitui então uma reserva estratégica. Ela representa 95% do volume de água doce do globo e apesar da abundância em quantidade é extremamente susceptível à degradação de sua qualidade por focos de poluição. Mais grave ainda é o fato de que uma vez poluída, a descontaminação do aqüífero até um nível de zero de concentração não pode ser obtida, ou então, a um custo financeiro muito elevado, consegue-se remediar esta poluição a um nível aceitável acima de zero.

O desafio, então, que enfrentam as municipalidades empenhadas no fornecimento de água de boa qualidade aos seus cidadãos é duplo: a) proteção de seus poços municipais (o ponto de suprimento mais comumente usado) para prevenir que sejam contaminados e b) remediação dos aqüíferos que, acidentalmente ou por negligência, acabaram sofrendo contaminação. Tendo em mente a importância deste assunto o governo americano estabeleceu em 1987 o Wellhead Protection Program (Programa de Proteção de Poços (PPP)), inspirado em programas similares europeus, para a delineação de Wellhead Protection Areas (Áreas de Proteção de Poços (APP)) para todos os poços municipais.

Devido ao quase total desconhecimento do assunto pelos órgãos brasileiros, e à

importância do assunto, esta dissertação de tese de mestrado aplica modelação matemática para investigar os efeitos dos principais parâmetros hidrogeológicos e processos envolvidos tanto em prevenção (APP) de contaminantes como em remediação.

Embora prevenção e remediação usem modelos matemáticos similares, estes são assuntos claramente distintos, que merecem tratamento individual. Esta tese, então, foi dividida em duas partes:

Parte I: investiga os efeitos dos principais parâmetros hidrogeológicos na fase de prevenção de contaminação de água subterrânea para poços municipais, quando as APPs são delineadas.

Parte II: investiga os efeitos de heterogeneidade geológica, parâmetros hidráulicos e processos atenuantes de transporte sobre o tempo e os esquemas de remediação, quando, apesar dos PPPs, ocorre contaminação e os níveis de concentração dos contaminantes precisam ser reduzidos a níveis aceitáveis para proteger a saúde pública e o meio ambiente natural.

Na parte I os efeitos dos seguintes parâmetros em APPs foram investigados, através de modelos de fluxo analíticos e numéricos:

1 - gradiente regional
2 - transmissividade
3 - anisotropia
4 - falhamento
5 - porosidade efetiva

Na parte II foram investigados, através de modelos de transporte advectivo e dispersivo, os seguintes parâmetros:

1 - dispersividade

2 - retardamento

3 - heterogeneidade

Entre os muitos resultados mostrados nesta tese pode-se citar:

1 - Para um poço único, bombeando em aqüífero homogêneo e isotrópico, e usando o Modelo Analítico de Fluxo Uniforme, a largura da APP desenvolvida é inversamente afetada pelo aumento da condutividade hidráulica, da espessura e do gradiente do aqüífero onde se encontra o poço a ser protegido, e diretamente afetados pelo aumento da taxa de bombeamento deste poço.

2 - O desenvolvimento da APP não ocorre na direção perpendicular a linhas eqüipotenciais perfeitamente eqüidistantes e paralelas, se a anisotropia deste aqüífero for levada em consideração.

3 - A condição assintótica da concentração de contaminantes em água subterrânea sujeita a bombeamento e tratamento mostrou estar sujeita a ter como causa heterogeneidades do aqüífero, que envolve meios de baixa e de alta condutividade hidráulica onde ocorre o desenvolvimento da zona que contribui água para o poço. Em poços de remediação esta condição pode representar um aumento significativo do tempo necessário de bombeamento até que uma concentração menor pré-estabelecida seja obtida.

4 - A heterogeneidade é, de todos os parâmetros investigados, aquele que causa os efeitos mais dramáticos em APPs e em esquemas de remediação.

ABSTRACT

The importance of groundwater resides in the fact that it is essential to life and, many times, it is the only source of water, or it represents a significant portion of the total water used in a city. The majority of the inhabitants living in rural and suburban areas, 90% of the industries and almost 50% of the urban inhabitants in Brazil use groundwater (Rebouças, 1988).

In the United States, approximately half of the population utilizes groundwater for drinking and about 95% of the rural population depends on groundwater.

Groundwater is, then, a strategic resource. It represents 95% of the volume of the fresh water of the globe, and, despite its abundancy in quantity, it is extremely susceptible to degradation of its quality by pollution sources. Even worse is the fact that once pollution occurs, the complete cleanup of the aquifer (levels of zero concentration) likely will not be possible. Even to remediate to non-zero acceptable levels will have high financial costs (the average cleanup cost for superfund sites in the U.S. is 20 million dollars)

The challenge, then, that the municipalities face to supply good quality water to their citizens is double: a)protection of municipal wellheads (the most common supply) to prevent their being contaminated and b)remediation of the aquifers that, by accident or by negligence, end up being contaminated. With the importance of this subject in mind, the American government established in 1987 the Wellhead Protection Program (Programa de Protecao de Pocos (PPP)), inspired by similar European programs, for the delineation of the Wellhead

Protection Area (Area de Protecao de Pocos (APP)) for each municipal wellhead.

Due to the almost total lack of knowledge of this subject by Brazilian organizations, and to its critical importance, this master's thesis applies mathematical modeling to investigate the effects of the principal hydrogeologic parameters and processes involved in prevention (APP) of contamination as well as in its remediation.

Although prevention and remediation use similar mathematical models, they are clearly distinct subjects, and they deserve individual treatment. The thesis, then, is divided into two parts:

Part I: Investigate the effects of the principal hydrogeologic parameters on the delineation of APPs (to prevent groundwater contamination).

Part II: Investigate the effects of geologic heterogeneity, hydraulic parameters and transport attenuation processes on the total time for remediation, when, despite the PPPs, contamination occurs and the concentration levels of the contaminants need to be reduced to acceptable levels to protect the public health and the natural environment.

In part I the effects of the following parameters on APPs were investigated through analytical and numerical flow models:

1 - regional gradient
2 - transmissivity
3 - anisotropy
4 - faults
5 - effective porosity

In part II the following parameters were investigated through the use of advective and dispersive transport models:

1 - dispersivity

2 - retardation

3 - heterogeneity

The following are some of the results found in this thesis:

1 - For a single well, pumping in a homogeneous isotropic aquifer, and using the Uniform Flow Analytical Model, the boundary limit of the developed APP is inversely proportional to the hydraulic conductivity, the thickness and the gradient of the aquifer and directly proportional to the pumping rate of the well.

2 - The development of the APP in isotropic, homogeneous, sloping aquifers produces elipsoidal-shaped drawdown and equipotential curves. The simulation of the above situation, however, produces perfect circular drawdown curves because the available mathematical models for microcomputers do not account for the slope of the aquifer base, as suggested by Hantush (1964). If anisotropy is present, the simulated drawdown curves are elipsoidal (like the theoretical drawdown curves).

3 - The asymptotic condition of the concentration of the contaminants in groundwater, subject to pump and treat, is shown to be able to be caused by heterogeneities of the aquifer, which involve areas of low and high hydraulic conductivity located throughout the contribution zone of the aquifer.

4 - Of all the parameters investigated, hydraulic conductivity heterogeneity is the one that causes the most dramatic effects on APPs and remediation schemes.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

2. O QUE SÃO ÁREA DE PROTEÇÃO DE POÇO (APP) E PROGRAMA DE PROTEÇÃO DE POÇO (PPP) 9

3. ZONAS EM TORNO DE POÇO A SER PROTEGIDO:
ZI - ZONA DE INFLUÊNCIA
ZC - ZONA DE CONTRIBUIÇÃO
ZT - ZONA DE TRANSPORTE 11

3.1 ZONA DE INFLUÊNCIA (ZI) 11
3.2 ZONA DE CONTRIBUIÇAO (ZC) 11
3.3 ZONA DE INFLUÊNCIA VERSUS ZONA DE CONTRIBUIÇAO 13
3.4 CONTORNOS CIRCULARES VERSUS CONTORNOS ELIPSOIDAIS DA ZI 14
3.5 ZONA DE TRANSPORTE (ZT) OU ZONA DE CAPTURA PARA DETERMINADO TEMPO DE TRÂNSITO 17
3.6 ZONA DE TRANSPORTE VERSUS ZONA DE INFLUÊNCIA 18

4. CRITÉRIOS E LIMITES DE CRITÉRIOS PARA A DELINEAÇÃO DE APPs . . . 21

4.1 CRITÉRIO DE DISTÂNCIA 21
4.2 CRITÉRIO DE REBAIXAMENTO 22
4.3 CRITÉRIO DE TEMPO DE TRÂNSITO (TT) 25
4.4 CRITÉRIO DE CONTORNOS DE FLUXO 25
4.5 CRITÉRIO DE CAPACIDADE ASSIMILATIVA 26

5. MÉTODOS DE DELINEAÇÃO DE APPs 26
5.1 MÉTODOS DE DELINEAÇÃO DE APPs EM AQÜÍFEROS NÃO CONFINADOS SEDIMENTARES 26
5.1.1 MÉTODO DO RAIO FIXO ARBITRÁRIO (RFA) 28
5.1.2 MÉTODO DO RAIO FIXO CALCULADO (RFC) 29
5.1.3 MÉTODO DE FORMATOS SIMPLES VARIÁVEIS (FSV) 30
5.1.4 MÉTODOS ANALÍTICOS 32
5.1.5 MÉTODO DE MAPEAMENTO HIDROGEOLÓGICO 34
5.1.6 MÉTODOS NUMÉRICOS DE FLUXO E DE TRANSPORTE . . 37
5.2 EXEMPLO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DELINEAÇÃO: 3 ZCs DELINEADAS PELOS MÉTODOS DO RAIO FIXO CALCULADO, ANALÍTICO E NUMÉRICO DE DELINEAÇÃO DE APPs 39
5.3 MÉTODO DE DELINEAÇAO DE APP EM AQÜÍFEROS CONFINADOS 40
5.4 MÉTODO DE DELINEAÇAO DE APP EM AQÜÍFEROS FRATURADOS 41
5.5 MÉTODO DE DELINEAÇAO DE APP EM AQUÍFEROS CÁRSTICOS . . 42
5.6 ESTIMATIVA DE CUSTOS DE APLICAÇÃO DE ALGUNS MÉTODOS . PARA A DELINEAÇÃO DE APPs. 43

6. ABORDAGENS INTERNACIONAIS PARA PREVENIR A CONTAMINAÇÃO DE POÇOS 44
6.1 EXPERIÊNCIA EUROPÉIA SOBRE PROGRAMA DE PROTEÇAO DE POÇOS 44
6.2 EXPERIÊNCIA AMERICANA SOBRE PROGRAMA DE PROTEÇAO DE POÇOS 46
6.2.1 LEIS AMERICANAS ANTERIORES AOS PPPs 48

7. EXEMPLOS DE PPPs NOS ESTADOS UNIDOS: PPP EM FLORIDA E NEW JERSEY 49
7.1 PPP EM FLORIDA (Dade County - Miami) 49

7.2 PPP EM NEW JERSEY 54
7.2.1 DEFINIÇÁO DOS POÇOS AFETADOS 54
7.2.2 MÉTODO DE DELINEAÇÁO DAS APPs EM NEW JERSEY . . 55
7.2.3 MÉTODO DE DELINEAÇÁO DAS APPs INTERINAS E FINAIS 55
7.2.4 MÉTODO DE DELINEAÇÁO DE APP PARA AQÜÍFEROS CONFINADOS EM NEW JERSEY 60
7.2.5 IDENTIFICAÇAO DE FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇAO . 60
7.2.6 APROVAÇAO DA APP PELO NJDEPE 61

8. FERRAMENTAS AUXILIARES NA DELINEAÇÃO DE APPs: HIDROGEOLOGIA E MODELAÇÃO MATEMÁTICA 61
8.1 HIDROGEOLOGIA 61
8.1.1 FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA 61
8.2 MODELAÇÃO MATEMÁTICA 62
8.2.1 MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS EM PCs PARA A DELINEAÇÃO DE APPs 62
8.2.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA 63
8.2.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA . . . . . 8) 66
8.2.4 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO 67
8.2.5 ESTADOS ESTACIONÁRIO E TRANSIENTE 73

9. INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS E ELEMENTOS HIDROGEOLÓGICOS SOBRE A FORMA, TAMANHO E ORIENTAÇÃO DE APPs 75
9.1 EFEITOS DE GRADIENTE REGIONAL 76
9.2 EFEITO DE TRANSMISSIVIDADE 79
9.3 EFEITOS DE ANISOTROPIA (CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA) 80
9.4 EFEITO DE RECARGA INDUZIDA DE RIO 85
9.5 EFEITO DE ZONA DE FALHAMENTO 87

9.6 EFEITO DE POROSIDADE EFETIVA 89

10. REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS 94
10.1 REMEDIAÇÃO POR BOMBEAMENTO 95
10.2 FONTES ANTROPOGÊNICAS POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO DE POÇOS 98
10.3 MODELAÇÃO MATEMÁTICA NA REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS 101
10.4 EXEMPLO COMPARATIVO DE APPs E DE VOLUME PARA DESCONTAMINAÇÃO CALCULADOS POR MODELOS NUMÉRICO E ANALÍTICO TRIDIMENSIONAIS 102

11. INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DE HETEROGENEIDADES GEOLÓGICAS E DE PROCESSOS ATENUANTES DE TRANSPORTE NO TEMPO E NOS ESQUEMAS DE REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS 104
11.1 ÁREA A SER REMEDIADA - MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO . 104
11.1.1 GRADIENTE REGIONAL NATURAL 106
11.1.2 VELOCIDADE REAL 106
11.1.3 TAXA DE BOMBEAMENTO DE POÇO ÚNICO 107
11.1.4 LOCALIZAÇÃO DO POÇO 108
11.1.5 TEMPO DE REMEDIAÇÃO CONSIDERANDO-SE SOMENTE TRANSPORTE ADVECTIVO 109
11.2 ZONA DE CONTRIBUIÇÃO CRIADA PELO POÇO DE REMEDIAÇÃO - EFEITO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO SOBRE A ZONA DE CONTRIBUIÇÃO 111
11.3 EFEITO DE DISPERSIVIDADE 114
11.4 EFEITO DE RETARDAMENTO 117
11.5 EFEITO DE HETEROGENEIDADE GEOLÓGICA 122
11.5.1 EFEITO DE GEOLOGIA HETEROGÊNEA I 122

11.5.2 EFEITO DE GEOLOGIA HETEROGÊNEA II 127
11.5.3 EFEITO DE GEOLOGIA HETEROGÊNEA III 130

12. CONCLUSÕES 133

13. BIBLIOGRAFIA 136

ÍNDICE DAS FIGURAS

Número

1(a) - Blocos de condutividade hidráulica (m/dia) em aqüífero heterogêneo 3

1(b) - APP levando-se em conta os blocos de condutividade hidráulica (aqüífero heterogêneo) 4

1(c) - Fontes potenciais de poluição na cidade A 5

1(d) - APP se o aqüífero é considerado homogêneo
APP levando-se em conta a heterogeneidade do aqüífero 6

1(e) - Bloco diagrama mostrando fontes potenciais de poluição sobre APPs (em aqüífero homogêneo e heterogêneo) (Cleary and Cleary, 1990). 7

2 - Exemplos de atividades que contaminam a água subterrânea (CH2M HILL, 1989) 10

3 - ZI e ZC (U.S.EPA, 1987b) 12

4 - ZC e ZI são circulares e perfeitamente coincidentes sob condições de gradiente regional zero e geologia homogênea e isotrópica (U.S.EPA, 1987b) 13

5 - ZC sobreposta a ZI. ZI exibe círculos concêntricos de rebaixamento, quando a equação de fluxo bidimensional usual é utilizada. 15

6 - Ilustração gráfica do critério de tempo de trânsito e das zonas em torno de poço a ser protegido: zonas de contribuição (ZC), zona de influência (ZI), zona de transporte (ZT) (como em Cleary, 1989) 16

7 - Curvas elipsoidais de rebaixamento quando o gradiente regional é maior do que 0,01 e menor do que 0,02, calculadas a partir da equação (1) (Hantush, 1964) 17

8 - Poço bombeando próximo a rio e ZT de 1 ano. 19

9 e 10 - Forma, tamanho e orientação da ZC de 1 ano não mudam com o passar do tempo de bombeamento: após 1 dia de bombeamento (9), e após 365 dias de bombeamento (10). A ZI, no entanto, continua a crescer. 20

11 - Definindo-se uma APP, usando o critério de rebaixamento (como em Cleary, 1989) 23

12 - Sob condições de superfície inclinada, a APP delineada com base em critério de rebaixamento difere totalmente da ZC, a zona que reúne todas as áreas que contribuem água para o poço, e que de preferência deve-se tomar como a APP. 24

13 - Delineação de APP circular utilizando-se o método de raio fixo arbitrário (RFA) (como em Cleary, 1989) 28

14 - Delineação de APP utilizando-se o método de raio fixo calculado (RFC) (como em Cleary, 1989) 29

15 - Delineação de APPs usando o método de formatos simples variáveis (U.S.EPA, 1988) 31

16 - Delineação de APP usando o método analítico, através do modelo analítico de fluxo uniforme (U.S.EPA, 1987b) 33

17 - Delineação de APP usando o método de mapeamento hidrogeológico - uso de contatos geológicos (U.S.EPA, 1987b). 35

18 - Delineação de APP usando o método de mapeamento hidrogeológico - uso de divisores de água subterrânea (traduzido de U.S.EPA, 1987b). O espaçamento entre as curvas de rebaixamento está errado nesta figura, quando a menor distância entre estas curvas deveria ser no lado de montante (ver Figura 6, reproduzida de Hantush,1964) 36

19 - Efeitos de geologia altamente heterogênea (a) sobre uma APP delineada através do método numérico (modelo numérico de fluxo GWPATH

(Schafer, 1988)). Somente os métodos numéricos podem levar em conta heterogeneidades do aqüífero. 38

20 - Delineação de APP em aqüífero fraturado (U.S.EPA, 1987b) 41

21 - Delineação de APP em aqüífero cárstico (U.S.EPA, 1987b). 42

22(a) e (b) - Sistema de zonamento na Holanda (Van Waegeningh, 1985) 45

23 - APP original baseada em (A) TT de 210 dias e cone de influência total (B) estimado pela segundo modelo de fluxo de água subterrânea assumindo um bombeamento de 832.787 m^3/d (220 mgd) da bateria de poços do Northwest e um bombeamento de 283.905 m^3/d (75 mgd) das baterias de poços em Hialeah e Miami Springs, e condições extremas de estiagem (Walters, 1987). 51

24 - Contornos de PPP trifásico. (a) O contorno da fase 1 está localizado a uma distância que corresponde à TT de 5 anos a leste do contorno da fase 2, assumindo um bombeamento de 567.809 m^3/d (150 mgd) na bateria de poços de Northwest e 10 mgd nas baterias de Hialeah e de Miami Springs, e condições de extrema estiagem. (b) O contorno da fase 2 está localizado a oeste do aterro, a uma distância que corresponde a TT de 5 anos, baseado no bombeamento de 454.248 m^3/d (120 mgd) na bateria de poços de Northwest e 189.270 m^3/d (50 mgd) nas baterias de poços de Hialeah e Miami Springs, e condições médias de período de chuvas. (c) O contorno da fase 3 está baseado no bombeamento de 832.787 m^3/d (220 mgd) na bateria de poços de Northwest assumindo condições médias de período de chuvas e uma zona adicional de segurança a leste do canal de recarregamento, baseada em 3 anos consecutivos de períodos de estiagem (Walters, 1987). 53

25 - APP interina usando um método híbrido: do modelo analítico de fluxo uniforme (MFU) do método analítico e o método de raio fixo calculado (RFC). Exemplo usando poço com TT múltiplos: níveis finais da APP serão calculados de acordo com o PPP de New Jersey (Draft, 1991). Abordagem também denominada "buraco de fechadura" ("key hole"). . . 57

26 - APP interina usando um método híbrido: o modelo analítico de fluxo

uniforme (MFU) do método analítico, o método de raio fixo calculdado (FRC) e os principais contornos de fluxo. Exemplo usando poço com TT de 25 anos: níveis finais da APP estarão de acordo com o PPP de New Jersey (Draft, 1991). Abordagem também denominada "buraco de fechadura" ("key hole"). 58

27 - APP interina com área consultiva. Exemplo usando poço com TT de 10 anos: níveis finais da APP estarão de acordo com o PPP de New Jersey (NJDEPE, 1991). Abordagem também denominada de "buraco de fechadura" ("key hole"). 59

28 - (a) Zona de captura de 20 anos (aqüífero heterogêneo) calculada através da técnica de caminhamento reverso (reverse pathline) (Shafer, 1987)

(b) Zona de captura para um sistema de injeção-extração (Zheng, 1989)

(c) Três zonas de captura delineadas através da divisão das linhas de fluxo (indicadas pelos números circulados) em torno de um canal de irrigação, para a porção de um aqüífero arenoso no centro de Wisconsin (Zheng et al., 1988b). As linhas de fluxo foram calculadas através da modificação dos dados de entrada do modelo MODFLOW, para produzir funções de fluxo. Ψ é a linha de fluxo dividida, em m^2/d. As três zonas de captura possuem as seguintes características:

(1) $K_1 = K_2$; (2) $K_1/K_2 = 100$; (3) $K_2/K_1 = 100$

Nos três casos a condutividade horizontal é 20 vezes maior do que a vertical.

(d) Zona de captura de um lago (Townley and Davidson, 1988) (Anderson and Woessner, 1992) 63

29 - Mapa potenciométrico de (a) um problema regional, mostrando contornos físicos que incluem dois rios, uma falha e um afloramento de rocha cristalina; e (b) um problema local mostrando três contornos hidráulicos introduzidos para descrever o fluxo no contorno com a área regional, representados por três condições de contorno especificadas que incluem equipotenciais e linhas de fluxo (modificado de Anderson and Woessner, 1992). 69

30 - Representação de fluxos: volumes de água são introduzidos ou extraídos dos blocos utilizando-se poços (Q), recarga areal ($R\Delta X\Delta Y$) ou drenança

(VΔXΔY) (modificado de Anderson and Woessner, 1992) 70
31 - Mudança na relação da superfícies potenciométricas faz o fluxo ascendente tornar-se descendente, estabelecendo a APP (U.S.EPA, 1988) 72
32 - Expansão da APP (ZT de 1 ano) após o início do bombeamento: 1,44 minutos (a); 14,4 minutos (b); e 144 minutos (c). 74
33 - APP quando i_o = 0,000006 (Cleary and Cleary, 1990) 77
34 - APP quando i = $100i_o$ (Cleary and Cleary, 1990) 78
35 - APP quando T = 100 T_o e i = 0,00006 (Cleary and Cleary, 1990) 79
36 - Modelo conceitual: poço bombeando entre dois rios. Linhas equipotenciais paralelas e eqüidistantes. (Cleary, 1989) 81
37 - Discretização (malha de diferenças finitas) do modelo conceitual (traduzido de Cleary and Cleary, 1990) 82
38 - Desenvolvimento de APP nas direções (a) isotrópica e (b) anisotrópica (traduzido de Cleary and Cleary, 1990) 83
39 - APP e caminho seguido pela contaminação sob condições (a) isotrópicas e (b) anisotrópicas (traduzido de Cleary and Cleary, 1990) 84
40 - Dois poços bombeando próximo a um rio, com poço 1 recebendo recarga induzida do rio. 86
41 - Zona de falhamento cria uma área de heterogeneidade geológica (Cleary and Cleary, 1990). Associada ao bombeamento do poço, a heterogeneidade promove a deformação das linhas equipotenciais. 87
42 - Surpreendente forma irregular da APP devido ao efeito de um falhamento (traduzido de Cleary and Cleary, 1990) 88
43 - Equipotenciais desenvolvidas pelo poço municipal no.12. 90
44 - APP de 5 anos quando n_{ef} = 0,4. O intervalo entre as setas é de 2 anos. . . 91
45 - APP de 5 anos quando a n_{ef} = 0,2. O intervalo entre as setas é de 2 anos. 92
46 - Curva de chegada de benzeno, utilizando dados de campo, mostrando a região de condição assintótica (American Petroleum Institute, 1991). . . . 97
47 - Zona de Captura utilizando um modelo de fluxo tridimensional (Larson et. al., 1987, como reproduzido em Domenico and Schwartz, 1990) 103
48 - Modelo físico (a) e malha de diferenças finitas e condições de contorno (b)

para a simulação de esquema de remediação por bombeamento e tratamento, utilizando o modelo numérico MOC. 105

49 - Bloco diagrama do aqüífero homogêneo e isotrópico 110

50 (a) - ZC (largura de 420 pés (182,88 m)) desenvolvida em aqüífero homogêneo por poço de esquema de remediação para pluma de benzeno. Vetores de velocidade mostram a direção do fluxo da água subterrânea. O tamanho de cada vetor é uma função do valor da velocidade (o forte gradiente em do poço faz as velocidades aumentarem). 112

50 (b) - Zona de contribuição desenvolvida longe da influência do contorno de carga hidráulica constante a montante. A largura da ZC é de 700 pés (213,36 m), como assumida para os cálculos de Q (taxa de bombeamento). 113

51 (a) - Efeito de dispersividade sobre o tempo de remediação 115

51 (b) - Ampliação de parte do gráfico da Figura 51 (a), mostrando que a concentração zero só é atingida após mais de 2 anos de bombeamento. . 116

52 - Efeito de retardamento e de dispersividade sobre o tempo de remediação de pluma de 1,1,1-TCA e de clorobenzeno 120

53 - Efeito de retardamento e dispersividade sobre o tempo de remediação de pluma de benzeno. A concentração normalizada atinge o valor 0 após 9,7 anos de bombeamento. 121

54 - Bloco diagrama do aqüífero heterogêneo (conferido pelos blocos de condutividade hidráulica) 123

55 - Comparação entre curvas de concentração de benzeno para esquema de remediação por bombeamento e tratamento, quando o mesmo aqüífero é idealisticamente tomado como homogêneo (—■—), e quando o aqüífero heterogêneo I (—✳—) é considerado, causando a condição de concentração assintótica e aumentando o tempo de remediação da pluma de benzeno em quase cinco vezes. 125

56 - Zona de contribuição desenvolvida no aqüífero heterogêneo I. Os rios a montante e a jusante fornecem recarga induzida. 126

57 - Bloco diagrama mostrando a distribuição de blocos de condutividade

hidráulica numa área de geologia heterogênea II. 127

58 - Efeito de geologia heterogênea II sobre o tempo de remediação de pluma de benzeno. 128

59 - Zona de contribuição desenvolvida em aqüífero heterogêneo II. O tamanho maior dos vetores de velocidade indicam os caminhos mais fáceis de serem percorridos dentro deste aqüífero. 129

60 - Bloco diagrama de aqüífero heterogêneo III, mostrando a distribuição dos blocos de condutividade hidráulica. 130

61 - Efeito de geologia heterogênea III sobre o tempo de remediação de pluma de benzeno. 131

62 - ZC do poço bombeando sobre aqüífero heterogêneo III. O rio a montante fornece recarga induzida ao poço. A água subterrânea move-se a uma velocidade muito baixa (pequenos vetores de velocidade), fora do local de ocorrência da pluma (K_1). 132

ÍNDICE DAS TABELAS

Número

1 - Zonas a serem protegidas e respectivas categorias de ameaça, objetivo de todo PPP 10
2 - Critérios de delineação de APPs e exemplos correspondentes 17
3 - Métodos de delineação de APPs 26
4 - Resumo dos resultados da análise comparativa do uso de três metodologias em 4 estados americanos (traduzido de U.S.EPA, 1988) 39
5 - Critérios mais indicados para diferentes tipos de aquíferos confinados (Cleary and Cleary, 1990) 40
6 - Áreas de Proteção de Poços usadas na Europa (traduzido e modificado de Van Waegeningh, 1985) 44
7 - Restrições nas zonas de proteção (traduzido de Van Waegeningh, 1985) . . . 46
8 - Exemplos de aplicações de métodos de delineamento de APP e locais onde foram usados (traduzido e modificado de U.S.EPA, 1988) 47
9 - Exemplos de algumas condições de contorno do primeiro tipo que são usadas para adicionar contaminantes a um sistema unidimensional (traduzido e modificado de Domenico and Schwartz, 1990) 62
10 - Características da área a ser protegida que afetam um projeto remediador (traduzido de U.S.EPA, 1985) 93
11 - Inventário das empresas de Novo Horizonte - SP e material poluente provavelmente associado às suas atividades (Cleary e Cleary, 1988b) . . . 98
12 - Classificação de fontes de contaminação de água subterrânea (traduzido e modificado de Daggett, 1989) 99
13 - Valores de parâmetros utilizados na simulação que assume ser o aqüífero homogêneo e isotrópico 105

14 - Estudos de campo que produziram estimativas confiáveis de coeficiente de retardamento (R_f) para contaminantes orgânicos em aqüíferos arenosos/de cascalho (traduzido de Mackay, 1990) 117

1. INTRODUÇÃO

Como a obtenção de água subterrânea para o abastecimento público se dá mais comumente através de poços, é a área em torno desses pontos de suprimento que deve ser protegida, porque se a poluição atinge ou ameaça atingir um poço municipal, o abastecimento à população pode imediatamente ser afetado.

Para assegurar a qualidade da água bombeada em poços ou baterias de poços municipais, as áreas superficiais ou subsuperficiais de onde a água é extraída devem ser delineadas e protegidas. Este é o principal objetivo dos Programas de Proteção de Poços (Wellhead Protection Program), PPP, estabelecido nos Estados Unidos através de emendas ao Safe Drinking Water Act (SDWA), em junho de 1986, para delinear áreas chamadas de áreas de proteção de poços (Wellhead Protection Areas), APP, para todos os poços municipais daquele país. As emendas de 1986 requisitam de cada estado americano a preparação de um PPP, designam o United States Environmental Protection Agency (U.S.EPA) o órgão responsável pela orientação técnica no desenvolvimento do PPP, e estabelecem o prazo de 3 anos para apresentação de seu PPP. Em 1987, U.S.EPA lançou o Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Area (U.S.EPA, 1987). A utilização em excesso deste guia no presente trabalho justifica-se por constituir-se o documento oficial mais completo e esclarecedor na assistência técnica aos governos estaduais e municipais desenvolvendo PPPs e APPs.

A experiência européia em programas de proteção de poços inspirou os PPPs americanos. Embora a delineação e a proteção de APPs seja uma das maiores prioridades em programas de proteção de água subterrânea na Europa e nos Estados Unidos, o assunto é virtualmente desconhecido no Brasil.

Preparando-se para enfrentar o desafio de proteger os poços ou baterias de poços de abastecimento público, os governos estaduais e municipais elaboram o PPP, apresentando todas

as medidas de proteção a esse(s) poço(s) e todas as medidas remediadoras caso ocorresse poluição. Isto inclui a delimitação de uma ou mais áreas de proteção em torno do poço - APP - ou bateria de poços, e a identifição de fontes de poluição dentro dessa(s) área(s). Cada uma das fontes potenciais de poluição localizadas dentro da APP deve ser considerada uma ameaça ao poço, justificando e exigindo um monitoramento constante dessas fontes. É indispensável o estabelecimento de regulamentações que, entre muitas outras medidas, determine a identificação, inventário e classificação das fontes potenciais de poluição da área em estudo; manuseio e disposição de material perigoso; disposição da coleta de lixo industrial e doméstico; programas de monitoramento para detecção de poluição; encargos das agências privadas, estaduais e federais envolvidas na fiscalização do PPP, na assistência técnica e de planejamento do controle da poluição; uso da terra; local para futuros poços municipais; alternativas de abastecimento de água à população, caso o poço municipal seja contaminado; medidas remediadoras a serem seguidas caso ocorra poluição do aqüífero que ameace o poço municipal.

Como medida de prevenção, a municipalidade deve determinar o mais acuradamente possível de onde vem a água extraída em seus poços, procedendo em linhas gerais de acordo com a seqüência de etapas mostrada nas Figuras 1(a) a 1(d). Elabora-se:

I) mapa com blocos de condutividade hidráulica do município interessado na delineação da APP, Figura 1(a)
II) mapa com a delimitação da APP, de preferência baseada na distribuição de condutividades hidráulica, Figura 1(b)
III) mapa com as localizações das fontes potenciais de poluição, Figura 1(c)
IV) superposição dos mapas 1(b) e 1(c), Figura 1(d), para identificação das fontes que se encontram dentro da APP delineada
V) apresentação tridimensional da localização das fontes potenciais de poluição sobre APPs (em aqüífero homogêneo e heterogêneo)

A importância do assunto, no momento em que se constata a população em geral cada vez mais atenta ao perigo de se consumir água que foi contaminada por uma indústria ou mesmo por um aterro sanitário doméstico, levou à elaboração desta tese de mestrado, dividida em duas partes:

Parte I - investigação, através de modelos matemáticos em microcomputadores, dos efeitos dos principais parâmetros hidrogeológicos na delineação de áreas de proteção de poços como medida de prevenção de poluição da água servida às municipalidades.

Parte II - investigação, através de modelos matemáticos em microcomputadores, dos efeitos de heterogeneidade geológica e de processos atenuantes de transporte no tempo e nos esquemas de remediação dos aquíferos que sofreram contaminação.

Na primeira parte serão apresentadas a teoria e a prática sobre as diversas abordagens em proteção das áreas em torno dos poços. A finalidade é fornecer às municipalidades brasileiras interessadas informações e ferramentas para a proteção da água subterrânea captada por seus poços e distribuída à população. Como há pouco material sobre este assunto escrito em português, será apresentado muito mais material introdutório do que o usualmente acontece numa tese de mestrado. A intenção é fornecer às municipalidades e outros órgãos públicos um entendimento mais completo deste assunto. Como ferramentas serão mostradas e discutidas, então, a terminologia empregada em APP, os critérios, limites de critério e métodos usados na delineação das APPs, e a experiência européia e americana na delineação das APPs. Serão também demonstrados graficamente, através da aplicação de vários modelos analíticos e numéricos em microcomputadores da linha IBM PC, os efeitos surpreendentes de muitos cenários hidrogeológicos comuns - tais como superfície potenciométrica inclinada, geologia heterogênea, anisotropia - sobre a forma, o tamanho e a orientação da área de proteção de poço.

Complementando o estudo, serão apresentadas na parte II o resultado das investigações sobre os efeitos de heterogeneidade geológica e de processos atenuantes de transporte sobre o tempo e os esquemas de remediação de aquíferos que incluem poços municipais, e que tendo sofrido contaminação no interior de sua APP. A aplicação de modelos numéricos de fluxo e de transporte em microcomputadores da linha IBM PC ilustrarão a eficácia de alguns esquemas de remediação comumente utilizados, sob diferentes condições hidrogeológicas e tipos diversos de contaminantes.

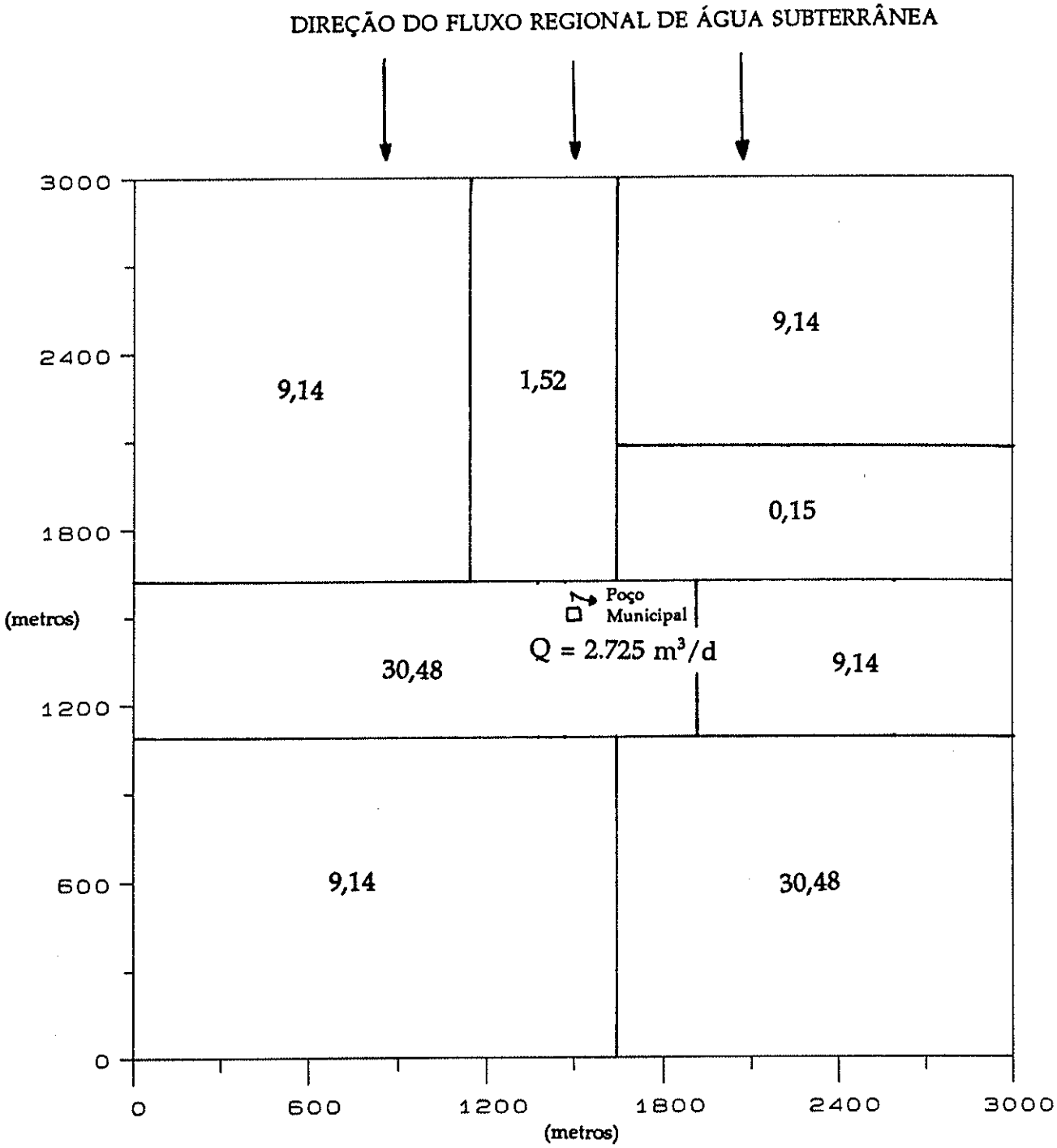


Figura 1(a) - Blocos de condutividade hidráulica (m/dia) em aqüífero heterogêneo

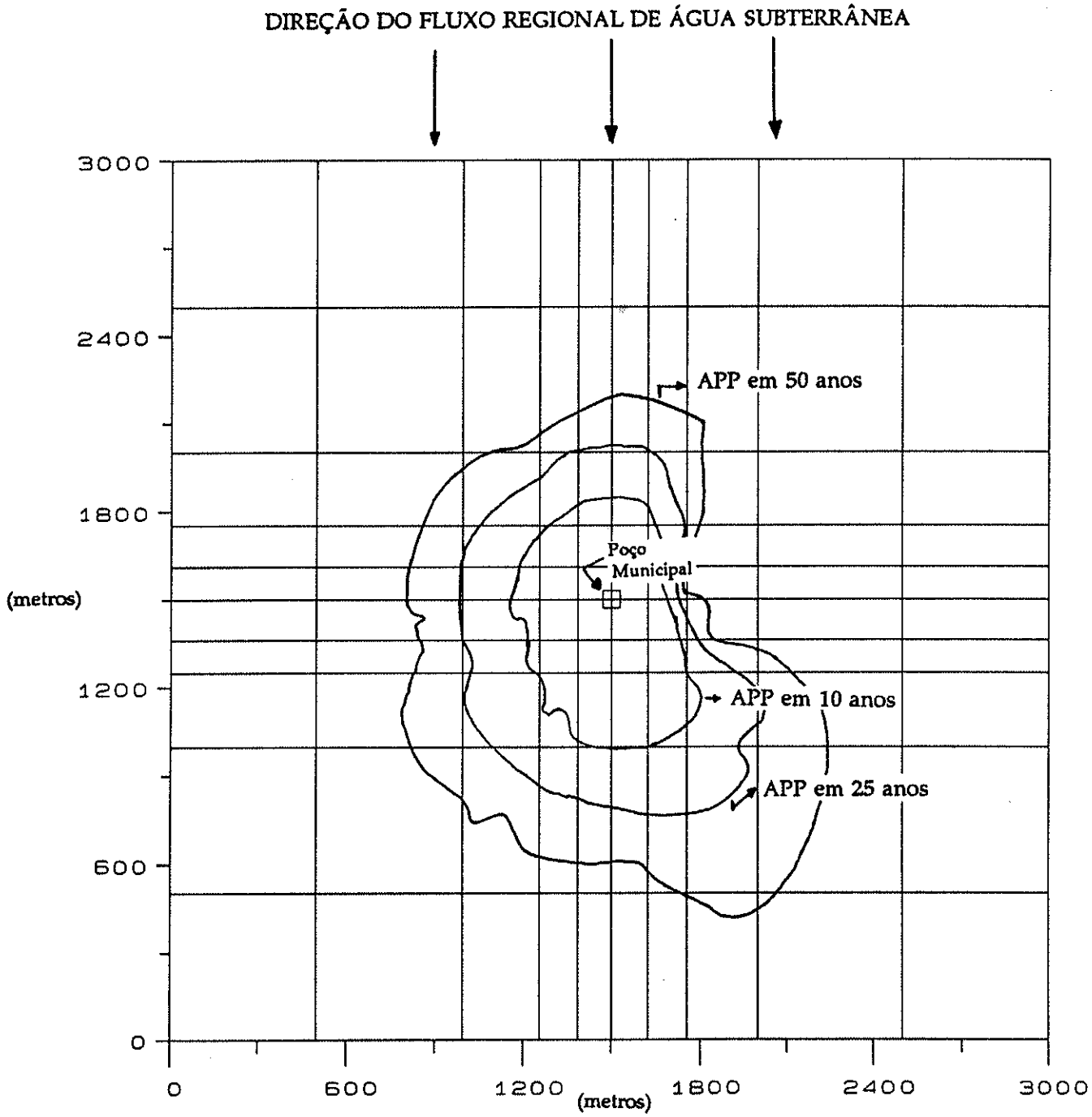


Figura 1(b) - APP levando-se em conta os blocos de condutividade hidráulica (aqüífero heterogêneo)

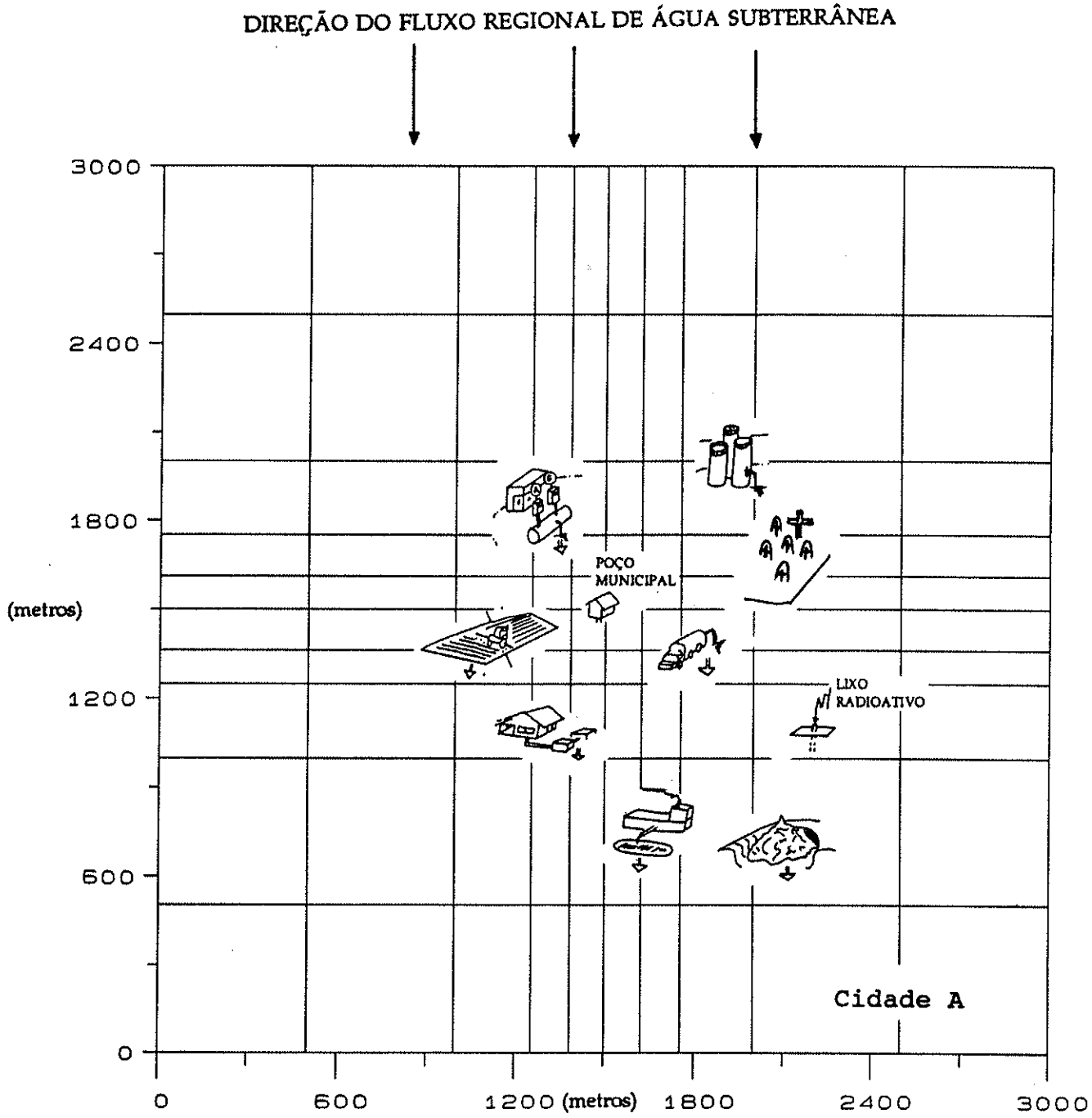


Figura 1(c) - Fontes potenciais de poluição na cidade A

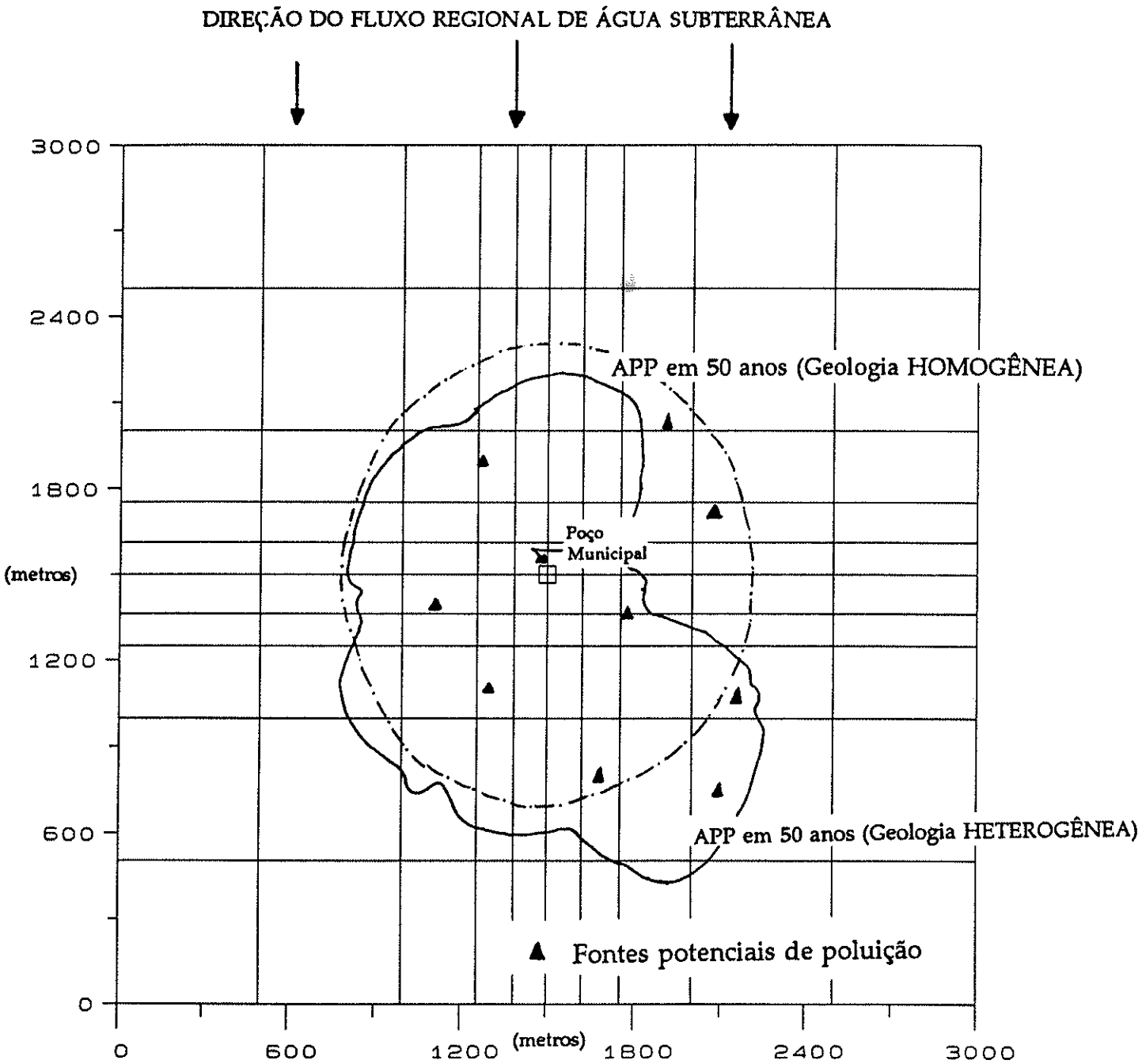


Figura 1(d) -·- APP se o aqüífero é considerado homogêneo

/ APP levando-se em conta a heterogeneidade do aqüífero

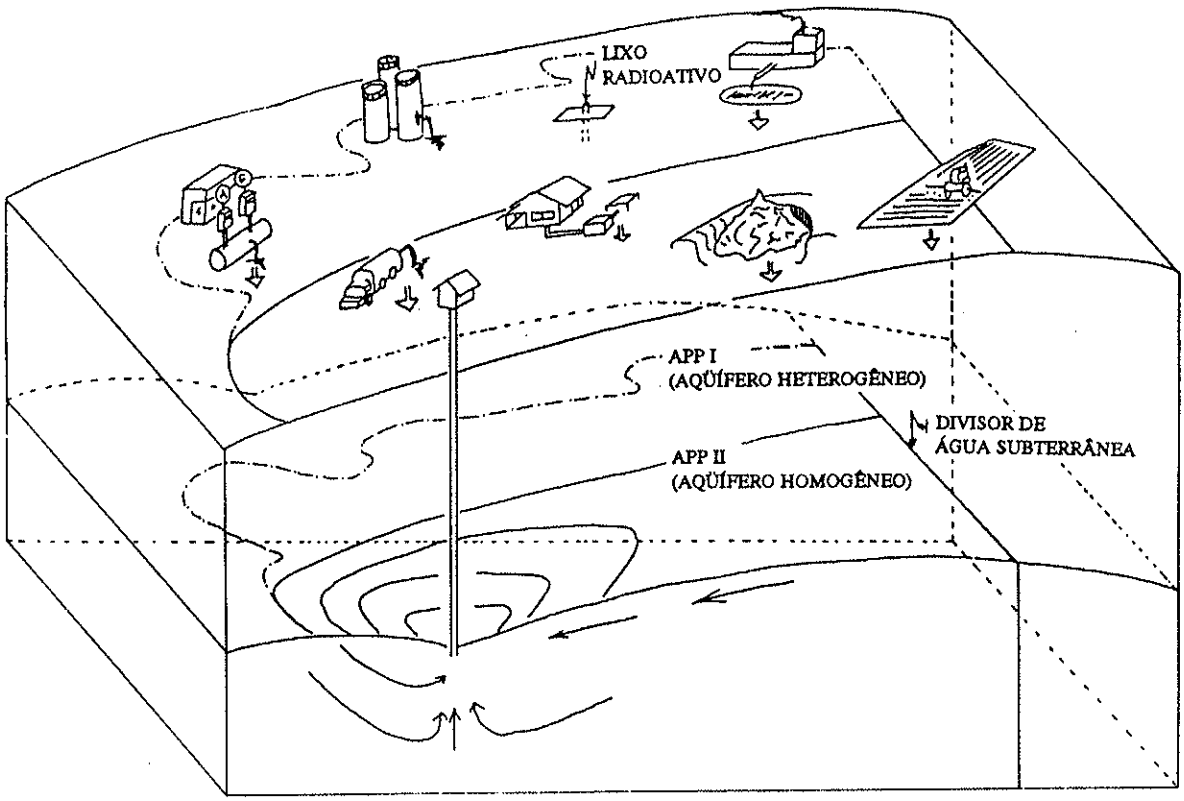


Figura 1(e) - Bloco diagrama mostrando fontes potenciais de poluição sobre APPs (em aqüífero homogêneo e heterogêneo) (traduzido de Cleary & Cleary, 1990).

PARTE I - INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORS DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS NA DELINEAÇÃO DE ÁREAS DE PROTEÇÃO DE POÇOS (APPs)

2. O QUE SÃO ÁREA DE PROTEÇÃO DE POÇO (APP) E PROGRAMA DE PROTEÇÃO DE POÇO (PPP)

A definição de APP encontra-se na Subseção 1428(e) das emendas de 1986 à SDWA:

"..., o termo "área de proteção de poço" significa a área superficial e a subsuperficial em torno de um poço ou de uma bateria de poços, abastecendo um sistema público de água, através da qual é razoavelmente provável que contaminantes se desloquem e atinjam esse poço ou bateria de poços...."

O suporte técnico aos estados, a cargo da U.S.EPA, segundo as emendas, deve ser usado na determinação da extensão de tais áreas de proteção. Até junho de 1989, os estados tiveram 3 anos para submeterem ao EPA seu PPP, quando então começou o prazo de 2 anos para sua implementação.

Cada estado, desejando proteger a área de onde provém a água bombeada por cada um dos poços que abastecem a municipalidade deve, de acordo com a subseção 1428(a) das emendas ao SDWA, desenvolver seu PPP contendo, no mínimo:

- ***especificação dos encargos de agências estaduais, municipais e de sistemas de abastecimento público de água na implementação do programa***
- ***determinação de áreas de proteção para cada poço ou bateria de poços***
- ***identificação de todas as fontes antropogênicas dentro da área de proteção***
- ***especificação de abordagens de gerenciamento***
- ***inclusão de planos de contingência para os suprimentos alternativos de água em casos de contaminação***
- ***indicação da localização de novos (futuros) poços***
- ***participação do público***

Os objetivos dos PPPs incluem providenciar zonas, criadas pela delineação das APPs para cada poço que abastece a municipalidade, para que o poço seja protegido das categorias gerais

de ameaças (U.S.EPA, 1988) apresentadas na Tabela 1.

O gerenciamento dessas zonas deve incluir o controle do uso da terra e da instalação de novos poços. O monitoramento das atividades das indústrias, do comércio e da agricultura deve basear-se em cadastramento que contenha de cada companhia a localização geográfica e os possíveis contaminantes envolvidos nos processos de fabricação, manuseio e disposição no solo ou rio de rejeito final. A medida visa possibilitar a identificação de todas as fontes antropogênicas da área em torno do poço (Figura 2) que se propõe proteger. Há sempre a possibilidade de uma dessas fontes potenciais de poluição começar a vazar e a infiltração atingir a água subterrânea. O programa deve também definir padrões para a construção e o abandono de poços, e planos alternativos de abastecimento nos casos de contaminação.

ZONA	CATEGORIA DE AMEAÇA
. providenciar uma zona de ação remediadora em torno de um poço (wellhead) para funcionar como "uma zona de segurança" ("a safety buffer" que permita tempo para responder a um derramamento ("release" ou "spill") acidental).	. a introdução direta de contaminantes através e em redor do poço (proteção contra derramamentos acidentais, águas de escoamento, poços mal construídos e abandonados)
. criar uma zona de atenuação para reduzir na água subterrânea concentrações de contaminantes conhecidos, antes deles atingirem o poço.	. contaminantes microbianos (especialmente de bactérias e vírus)
. usar zonas de gerenciamento de baterias de poços para regular a atividade em toda ou em parte da área de recarga.	. contaminantes químicos (especialmente os químicos tóxico que persistem por longos períodos de tempo)

Tabela 1 - Zonas a serem protegidas e respectivas categorias de ameaça, objetivo de todo PPP (baseada em U.S.EPA, 1988)

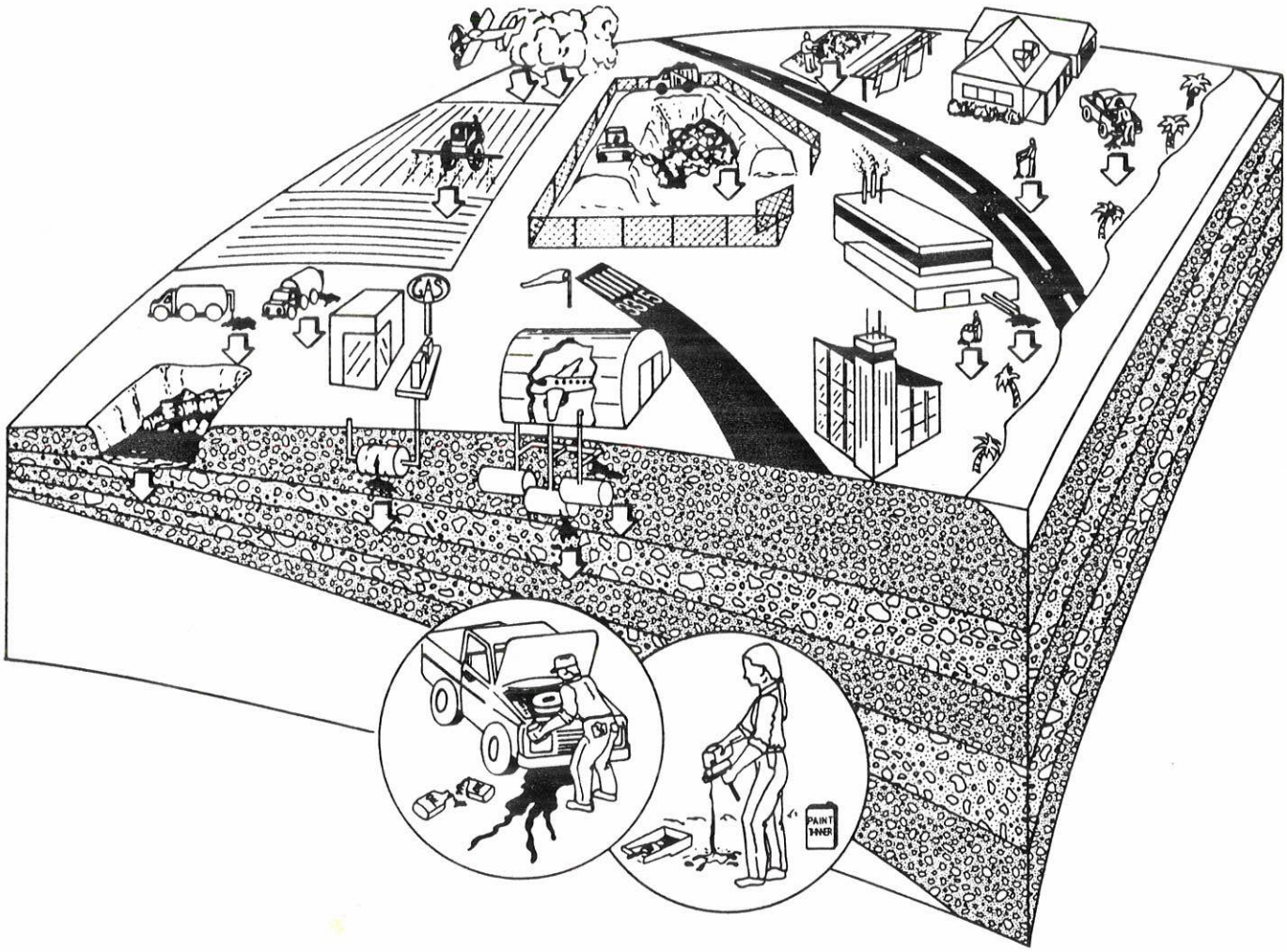


Figura 2 - Exemplos de atividades que contaminam a água subterrânea (CH2M HILL, 1989)

A capacidade técnica, a verba disponível e as características únicas da área de implementação do programa determinarão o critério e o método, apresentados nas Tabelas 2 e 3 respectivamente e discutidos mais a frente, a serem escolhidos para o delineamento da APP.

A única retaliação prevista nas emendas SDWA diz respeito à perda da parte cabida de fundos federais (Grant Funds) para o estado que não participar da elaboração de PPP. A maior perda, porém, seria expor o poço municipal ao perigo da contaminação.

Provavelmente, o aspecto mais importante na elaboração de um programa de proteção de poço seja o conhecimento técnico das pessoas envolvidas. É necessário, assim, considerar seu domínio com relação aos controles hidrogeológicos e ao comportamento de contaminantes, bem como sua capacidade no uso de modelos matemáticos analíticos e numéricos.

3. ZONAS EM TORNO DE POÇO A SER PROTEGIDO:

ZI - ZONA DE INFLUÊNCIA
ZC - ZONA DE CONTRIBUIÇÃO
ZT - ZONA DE TRANSPORTE

3.1 ZONA DE INFLUÊNCIA (ZI)

O bombeamento de qualquer poço estabelece o rebaixamento da superfície potenciométrica em seu redor, criando uma área chamada de cone de depressão ou zona de influência (ZI) (Figura 3). O cone de depressão ou a ZI corresponde à área encerrada pelo contorno de menor rebaixamento (que possa, na prática, ser medido no campo, ou um valor pequeno previamente estabelecido) em torno do poço bombeando.

3.2 ZONA DE CONTRIBUIÇAO (ZC)

A área de recarga do poço é denominada zona de contribuição (ZC) (Figura 3). Qualquer partícula de água subterrânea, pura ou poluída, que entra a ZC eventualmente atinge o poço e, se poluída, compromete a qualidade da água de abastecimento ao público. Por esta razão, a ZC é a zona que os programas de proteção de poço devem procurar proteger.

A zona de contribuição (ZC) corresponde então à toda a zona (área superficial ou volume subsuperficial) ou elemento hidrológico (por exemplo, um rio) contribuindo com água para o poço ou bateria de poços bombeando. Toda a ZC é envolta por uma superfície que une os pontos de estagnação (ou seja, é uma superfície divisória de águas); no contato desta superfície de estagnação com a superfície potenciométrica, produz-se uma linha de estagnação ou contorno de APP, que delinea a APP.

A Figura 3 mostra bem que os contaminantes que estão fora do cone de influência do poço, mas dentro da ZC, migrarão e eventualmente chegarão ao poço. Pode-se também notar que nem toda recarga interceptando a ZI entrará o poço. A superfície potenciométrica inclinada cria um divisor ou ponto de estagnação na porção a jusante do cone de depressão. No caso de proteção de poço isso representa uma vantagem porque, se esse é um poço de abastecimento, os contaminantes gerados a jusante do "divisor" não constituem ameaça ao poço.

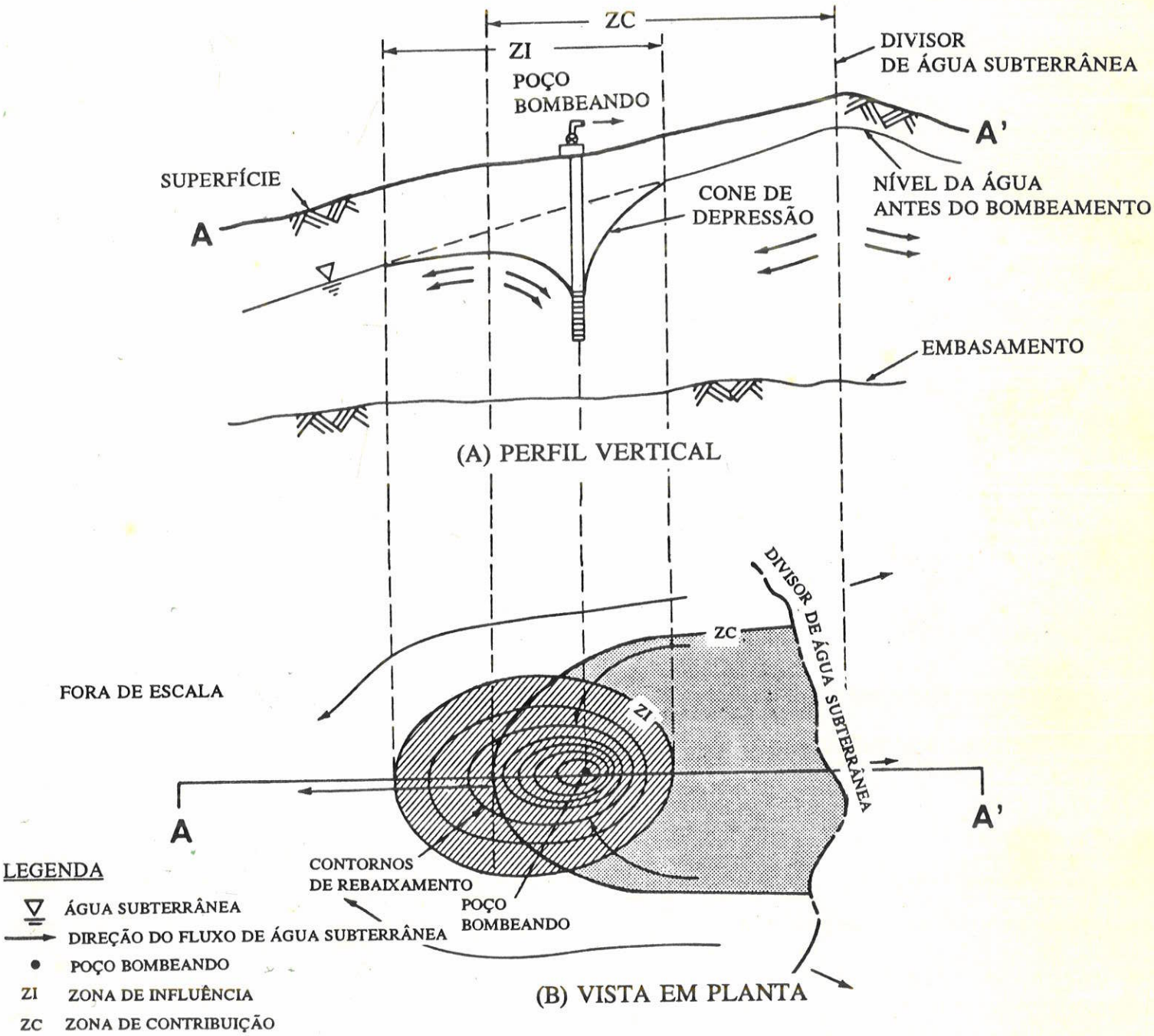


Figura 3 - ZI e ZC (traduzido de U.S.EPA, 1987b)

3.3 ZONA DE INFLUÊNCIA VERSUS ZONA DE CONTRIBUIÇAO

Segundo Morrisey (como citado em EPA, 1987b), a ZC e a ZI somente serão iguais em circunstâncias hipotéticas de superfície potenciométrica perfeitamente plana e propriedades do aqüífero uniformes (homogeneidade) dentro da área de influência. Neste caso, as ZI e ZC são perfeitamente circulares (Figura 4).

O mais comum, no entanto, é que a superfície potenciométrica anterior ao bombeamento apresente-se inclinada, situação que ocorre com freqüência na natureza já que a inclinação é responsável pelo movimento natural da água subterrânea no aqüífero. Nestes casos a ZC desenvolvida em torno do poço perde a forma circular, que apresenta quando o gradiente é nulo, e alonga-se na direção do fluxo regional, quando a geologia é isotrópica e homogênea. Quando a perturbação causada à superfície potenciométrica pelo bombeamento atinge um contorno físico (geralmente um divisor de água, um rio ou uma litologia impermeável), como mostrado na Figura 3, a forma elipsoidal da ZC, seu tamanho, e a direção que a ZC assume são estabelecidos, e não mudam com o passar do tempo de bombeamento. Isto acontece porque a condição de estado estacionário é atingida, com o corpo de água superficial suprindo a vazão demandada pelo poço bombeando.

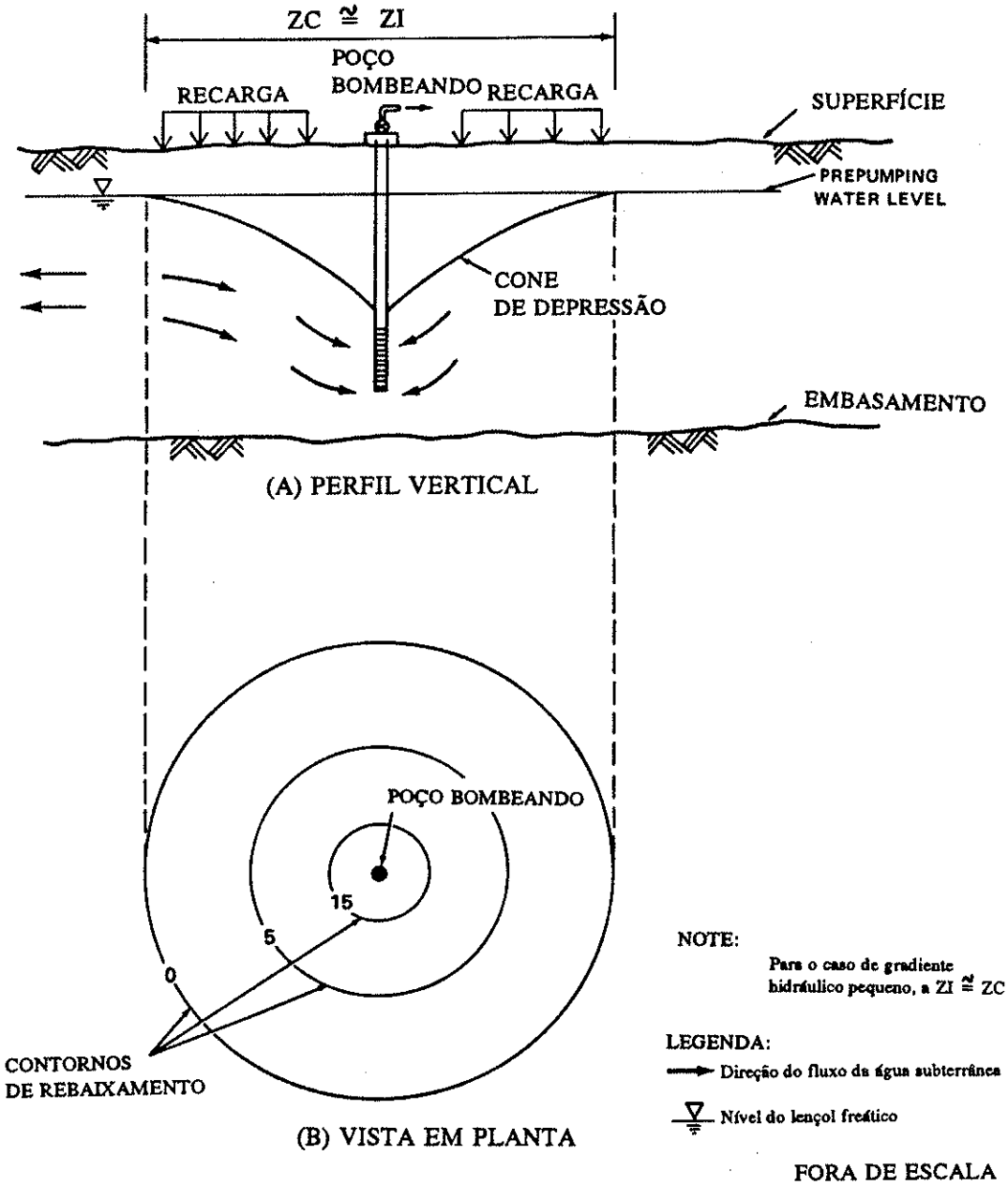


Figura 4 - ZC e ZI são circulares e perfeitamente coincidentes sob condições de gradiente regional zero e geologia homogênea e isotrópica (traduzido de U.S.EPA, 1987b)

3.4 CONTORNOS CIRCULARES VERSUS CONTORNOS ELIPSOIDAIS DA ZI

A forma da ZI (simulada com o modelo Flowpath (Franz and Guiguer, 1990)) exibe círculos concêntricos para os rebaixamentos em torno do poço, mesmo quando a superfície potenciométrica apresenta-se inclinada (Figura 5). Um hidrogeólogo experiente intuitivamente poderia esperar que a curva de rebaixamento fosse afetado pelo forte gradiente (0,015), tornando-a elipsóide, como acontece com a distribuição de carga hidráulica. Surpreendentemente, porém, quando:

1 - a geologia é homogênea e isotrópica
2 - a equação de fluxo bidimensional usual é usada
3 - não há influência de condições de contorno

o formato da ZI (rebaixamento) é um círculo.

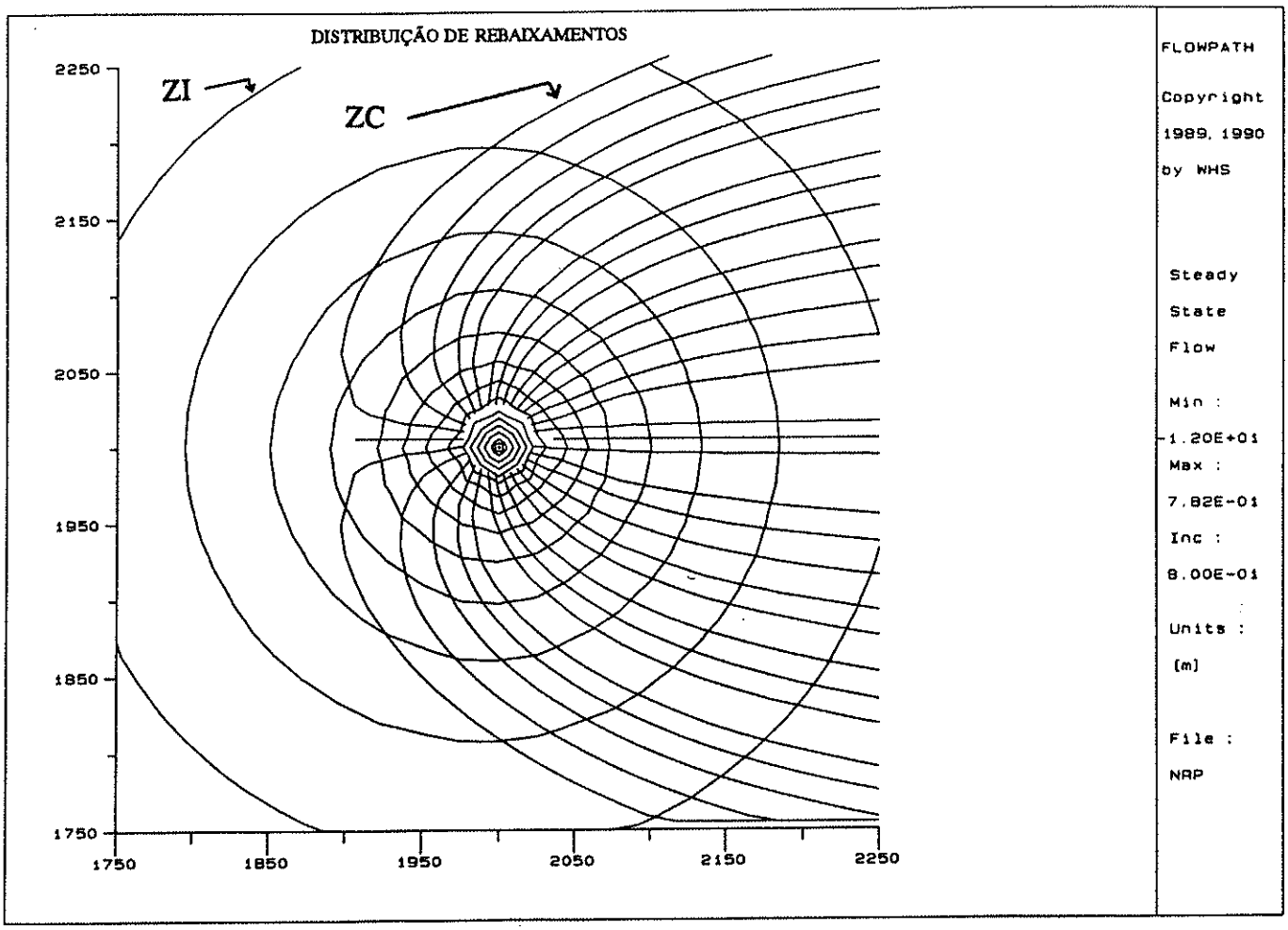


Figura 5 - ZC sobreposta a ZI. ZI exibe círculos concêntricos de rebaixamento, quando a equação de fluxo bidimensional usual é utilizada.

É interessante notar que no guia para delineação de APPs (U.S.EPA, 1987b) os contornos de rebaixamento mostrados nas Figuras 3 e 6, são elipsoidais.

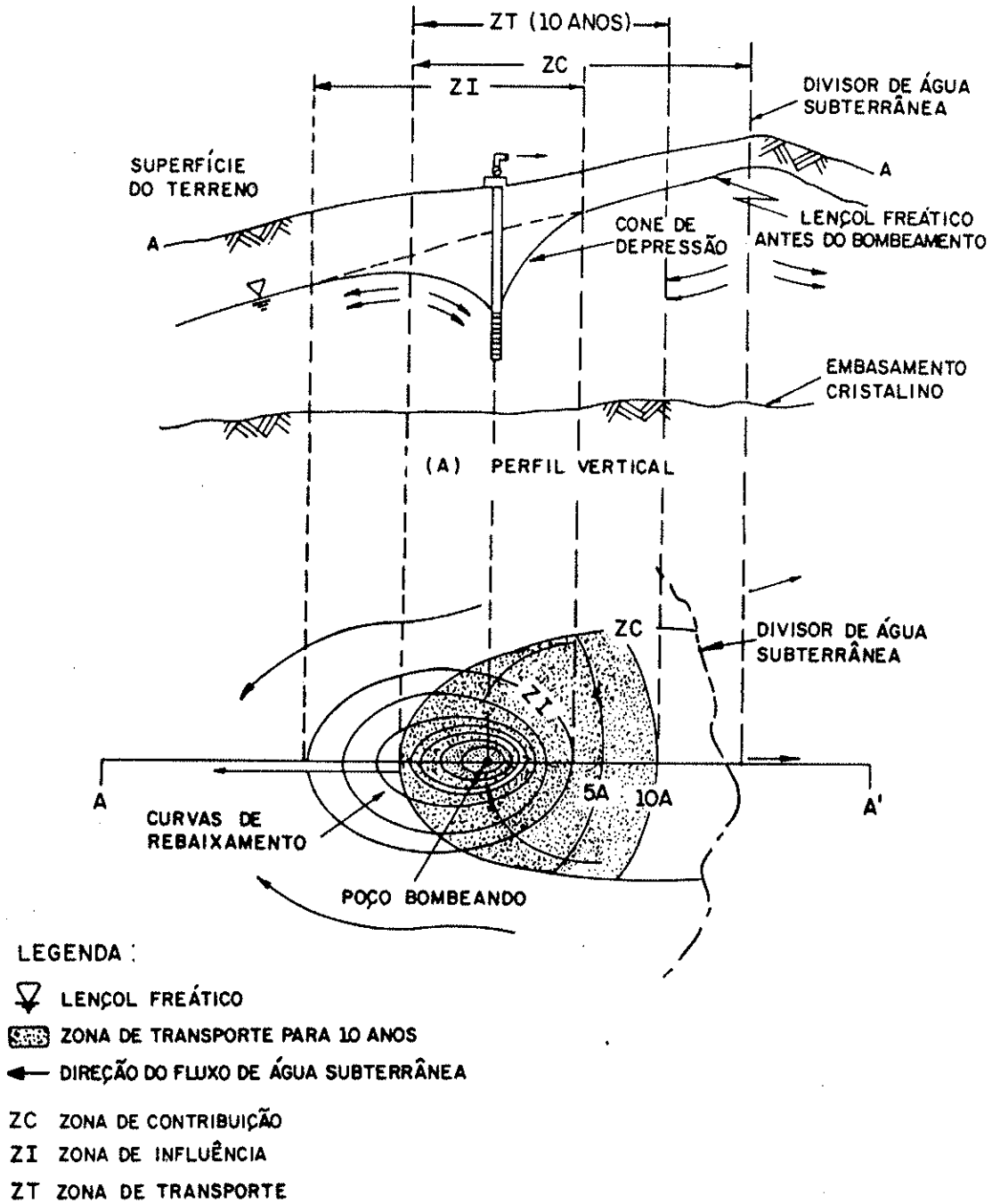


Figura 6 - Ilustração gráfica do critério de tempo de trânsito e das zonas em torno de poço a ser protegido: zonas de contribuição (ZC), zona de influência (ZI), zona de transporte (ZT) (como em Cleary, 1989)

Suporte para a existência de curvas de rebaixamento no formato de um elipsóide é raro, mas disponível na literatura. Hantush (1964) considerou o problema de um aqüífero cuja base é muito inclinada (entre 0,01 e 0,02). Para estes casos, a equação bidimensional de fluxo apresenta um termo extra envolvendo um derivado de primeira ordem em rebaixamento:

$$\frac{2\epsilon}{K}\frac{\partial D}{\partial t} = 2i\frac{\partial D}{\partial X} + \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 D}{\partial Y^2} + \frac{2K'}{b'K}(D_a - D) \qquad (1)$$

D é uma função de rebaixamento e os outros parâmetros são definidos no trabalho original.

A equação de fluxo, neste caso, passa a ser governada pela equação (1), que matematicamente se comporta como se fosse a equação advectiva-dispersiva de transporte. Os contornos de rebaixamento calculados através da equação (1), refletindo o efeito do gradiente da base do aqüífero, passam a ter o formato elipsoidal (Figura 7). Voltando à Figura 6, ZC superposta à ZI, é interessante notar que somente parte da ZI fornece água que efetivamente entra no poço. A área de interseção entre ZC e ZI, somada à área de recarga a montante, definem a zona de contribuição (ZC).

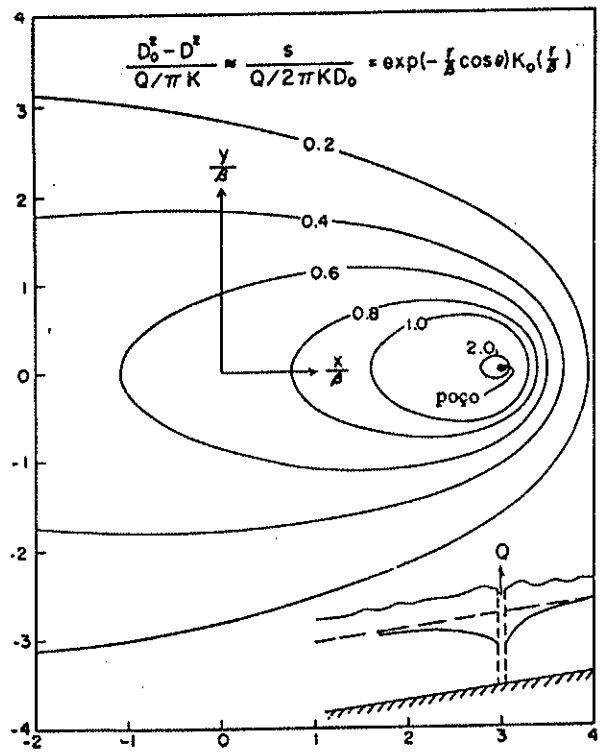


Figura 7 - Curvas elipsoidais de rebaixamento quando o gradiente regional é maior do que 0,01 e menor do que 0,02, calculadas a partir da equação (1) (Hantush, 1964)

3.5 ZONA DE TRANSPORTE (ZT) OU ZONA DE CAPTURA PARA DETERMINADO TEMPO DE TRÂNSITO

Em algumas ocasiões, a ZC é muito extensa para ser economicamente protegida. Para esses casos, recomenda-se o uso de zonas de transporte (ZT) (Figura 6).

As APPs definidas nos PPPs podem então constituir toda ou parte da zona de contribuição.

Na Figura 6, a área hachurada representa as zonas delimitadas por isócronas (contornos de igual tempo de trânsito), chamadas de zonas de transporte (ZT). Em alguns casos, a ZT

corresponde a áreas circundadas não por isócronas (contornos de igual tempo de trânsito) mas por isoconcentrações (contornos de igual valor de concentração).

A zona de transporte pode ser igual à zona de contribuição, ou aí estar contida se delimitada por isócrona de menor tempo de trânsito. As ZT são também chamadas de zonas de captura para determinado tempo de trânsito, TT, (time-related capture zone). A ZT é parte da ZC, se delineada por uma isócrona de menor tempo de trânsito. A ZT é também chamada de zona de captura de tempo específico (por exemplo, zona de captura de 5 anos, se circundada por uma isócrona de 5 anos). Se o processo de dispersão não for considerado, um poluente partindo de uma isócrona levará o tempo especificado por ela para atingir o poço, de outro modo levará menos tempo. As áreas de proteção de poço são usualmente calculadas para condições de estado estacionário, em que os efeitos de adsorção não são considerados (adsorção é um fenômeno de estado não estacionário). O tempo de trânsito, selecionado para delinear a ZT, deve ser suficiente para permitir a atenuação adequada dos contaminantes, antes que eles atinjam o poço.

3.6 ZONA DE TRANSPORTE VERSUS ZONA DE INFLUÊNCIA

A forma elipsoidal de uma ZT, e como já mencionado, a de uma ZC, não mudam com o passar do tempo de bombeamento porque a condição de estado estacionário é atingida, por exemplo, pela proximidade de um corpo de água superficial que supre a vazão demandada pelo poço bombeando.

Ilustrando este conceito a Figura 8 mostra um poço bombeando a 826,3 metros de um contorno físico (linha de valor 0 representa um rio e o datum; o rio é efluente do lado onde os valores são positivos), e a ZT de 1 ano é desenvolvida em torno do poço. A ZC se estende até o rio, uma fonte de água permanente. Entre o poço e o rio há um número infinito de ZTs que podem ser definidas. As zonas de captura ou zona de transporte não se estendem até o contorno físico, mas são delimitadas pelas distâncias percorridas pela água naquele período de tempo (no caso 1 ano). Estas distâncias dependem das velocidades no aqüífero que por fim dependem da distribuição de condutividades hidráulicas. A forma, o tamanho e a direção tanto da ZT não muda com o passar do tempo de bombeamento, como mostrado nas Figuras 9 e 10 em que as

Zts são idênticas para diferentes tempos de bombeamento. As Figuras 9 e 10 são ampliações da ZT de 1 ano mostrada na Figura 8.

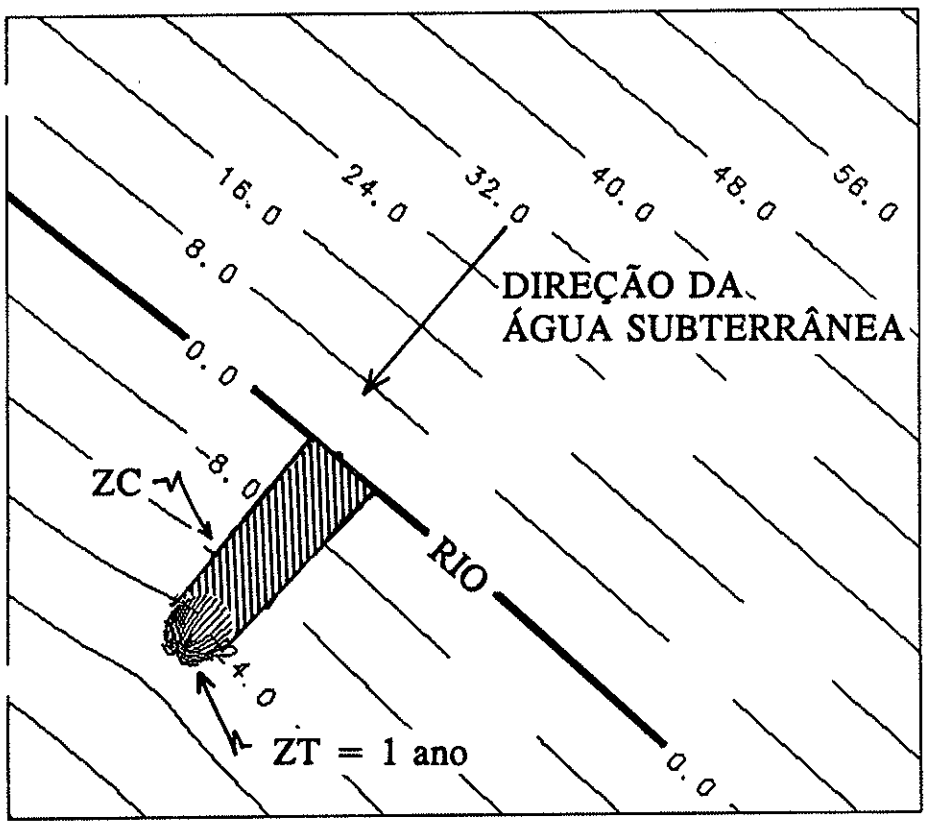


Figura 8 - Poço bombeando próximo a rio e ZT de 1 ano.

O que muda com o passar do tempo dentro da ZT (e da ZC também) são os rebaixamentos que crescem para manter o afluxo de água para o poço. Nas Figuras 9 e 10 pode-se observar como o tamanho da ZI continua a crescer com o passar do tempo de bombeamento. O rebaixamento mínimo na ZT de 1 ano atinge o valor negativo de 20,2 pés (a linha de rebaixamento de - 20,2 pés toca a extremidade da ZT de 1 ano) após 1 dia de bombeamento (Figura 9). Após 1 ano de bombeamento o rebaixamento mínimo na ZT de 1 ano é de 21 pés (a linha de 20,2 pés encontra-se a cerca de 80 metros de distância de onde encontrava-se há 364 dias) (Figura 10). O rebaixamento cresce com o passar do tempo de bombeamento, e conseqüentemente a ZI expande-se, para manter a demanda da taxa de

(9)

(10)

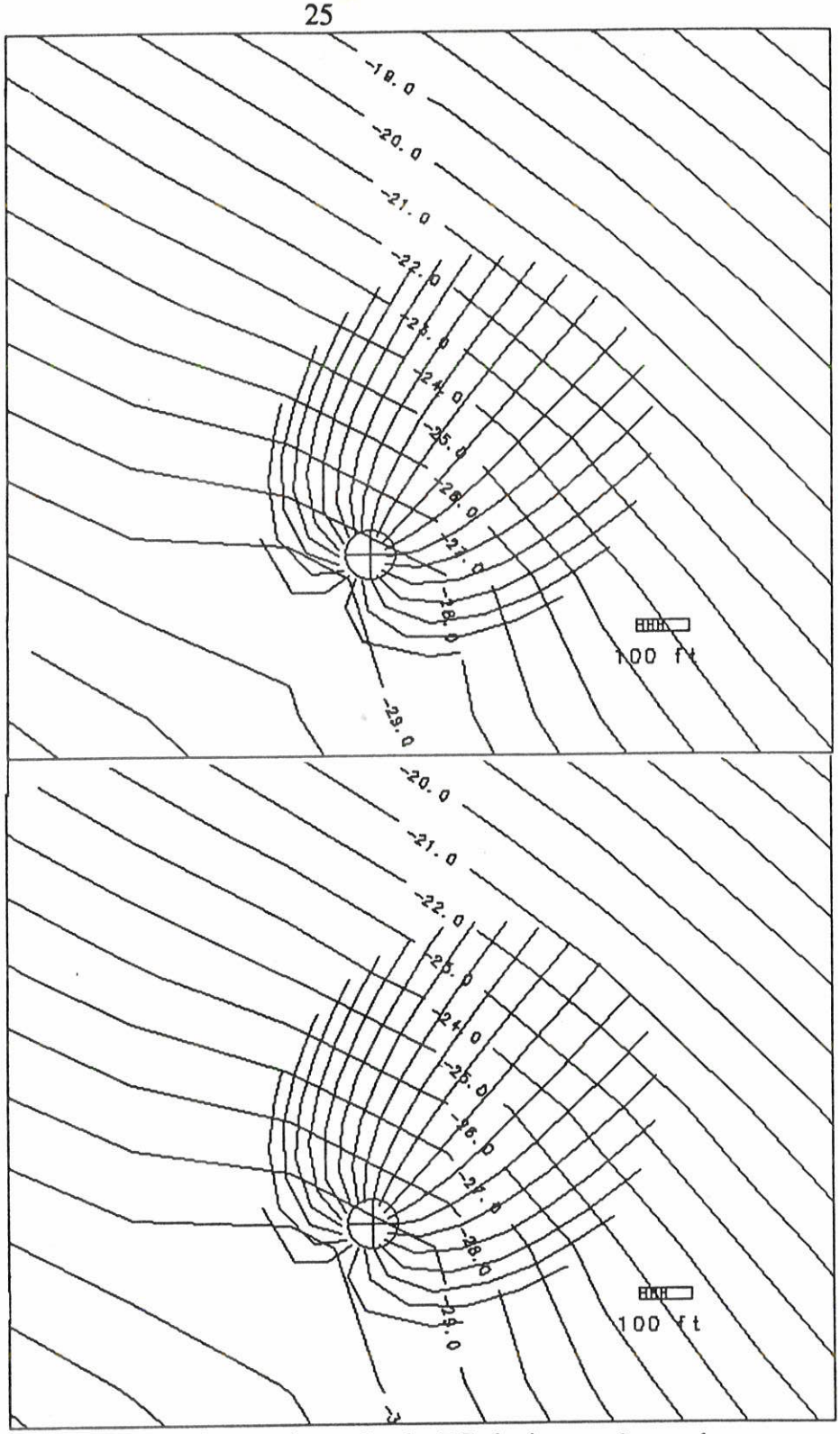


Figura 9 e 10 - Forma, tamanho e orientação da ZC de 1 ano não mudam com o passar do tempo de bombeamento: após 1 dia de bombeamento (9), e após 365 dias de bombeamento (10). A ZI, no entanto, continua a crescer.

bombeamento, até que a taxa de recarga (por precipitação, drenança de aqüífero sobrejacente ou subjacente, ou até atingir um corpo de água, como um rio ou lagoa) iguale a taxa de bombeamento. Se as duas taxas não se compensarem, o cone continuará em expansão para sempre e eventualmente toda a água do aqüífero será bombeada.

4. CRITÉRIOS E LIMITES DE CRITÉRIOS PARA A DELINEAÇÃO DE APPs

A delineação de APPs é baseada em conceitos padrões conhecidos como critérios de delineação. Os critérios referem-se a fatores usados como conceitos nos quais baseia-se a delineação da área de proteção de poço. O limite do critério ("criteria thresholds") refere-se "a um valor ou grupo de valores que deve ser selecionado para representar os limites acima ou abaixo do qual um dado critério cessará de fornecer o grau desejado de proteção".

A escolha do critério depende da capacidade técnica e administrativa de se considerar um maior ou menor número de processos que controlam o movimento da poluição na água subterrânea.

Para cada critério de delineação existe um valor numérico associado, o limite de critério. O WHPA Guidelines Delineation (EPA, 1987b), o guia de delineação de APP preparado pela EPA para orientar as municipalidades americanas (conforme emendas à SDWA) identifica cinco critérios, relacionados, na Tabela 2, a exemplos de limites de critérios para ameaça de compostos químicos:

CRITÉRIO	LIMITE DE CRITÉRIO
distância	3 metros, a mais de 3 quilômetros
rebaixamento	3 a 30 centímetros
tempo de trânsito (TT)	5 - 50 anos (dentro do aqüífero); < 5 anos em situações de fluxo rápido, como em terreno cárstico
contornos de fluxo	físico e hidrológico
capacidade assimilativa	substância específica; destinado padrões de água potável

Tabela 2 - Critérios de delineação de APPs e exemplos correspondentes

4.1 CRITÉRIO DE DISTÂNCIA

No critério de distância, uma determinada distância é escolhida como raio, que é medido a partir do poço até o ponto onde gera-se um círculo representando a APP. Este critério tem a desvantagem de não levar em conta nenhuma característica do aqüífero que se deseja proteger, ou do contaminante que o ameaça. Nem mesmo a taxa de bombeamento do poço é considerada. Este critério tem sido freqüentemente selecionado como um primeiro passo na delineação de APPs, já que oferece mais vantagens que a ausência de uma APP. Por exemplo, no estado da Flórida nos Estados Unidos, poços municipais bombeando mais do que 100.000 gpd têm uma área de proteção de 200 pés. Na Alemanha, é usada uma distância de 2 km (baseada em vários casos de poluição de água subterrânea).

4.2 CRITÉRIO DE REBAIXAMENTO

Para se utilizar o rebaixamento como critério de delineação de APP, unem-se os pontos de igual rebaixamento criado pelo bombeamento do poço, criando uma área superficial em torno do poço. A área superficial delineada corresponde à APP. O contorno da APP pode estender-se até onde a superfície potenciométrica não sofre mais o efeito do bombeamento, e que corresponde ao cone de depressão ou influência, ou ainda zona de influência (ZI). O valor do rebaixamento é previamente escolhido, satisfazendo ao grau desejado de proteção do poço. Dependendo do valor do rebaixamento escolhido a APP corresponderá total ou parcialmente ao cone de depressão (Figura 11).

Rebaixamento mínimo

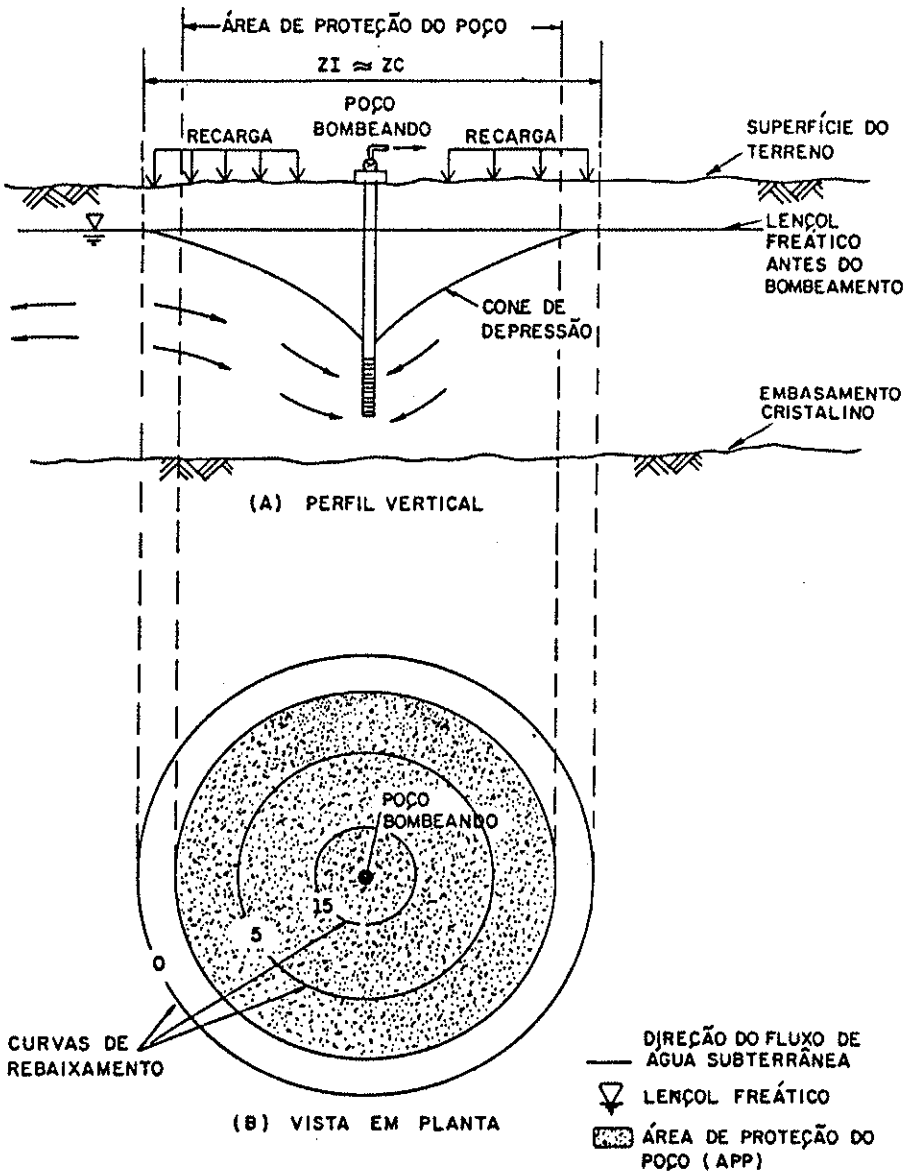


Figura 11 - Definindo-se uma APP, usando o critério de rebaixamento (como em Cleary, 1989)

No caso de aquíferos confinados o cone de depressão pode estender-se por muitos quilômetros, sendo viável delimitar a APP correspondente a um rebaixamento que se encontra mais próximo do poço, de modo que a área obtida é uma parte do cone de depressão e não sua totalidade.

Quando a superfície potenciométrica anterior ao bombeamento é horizontal e o aqüífero isotrópico e homogêneo, a ZI é circular e coincide com a zona de contribuição, ZC (Figura 4). Por outro lado, a ZC no cenário mais freqüentemente encontrado na natureza, em que a superfície potenciométrica encontra-se inclinada, difere totalmente da ZI (Figura 12). Nestes

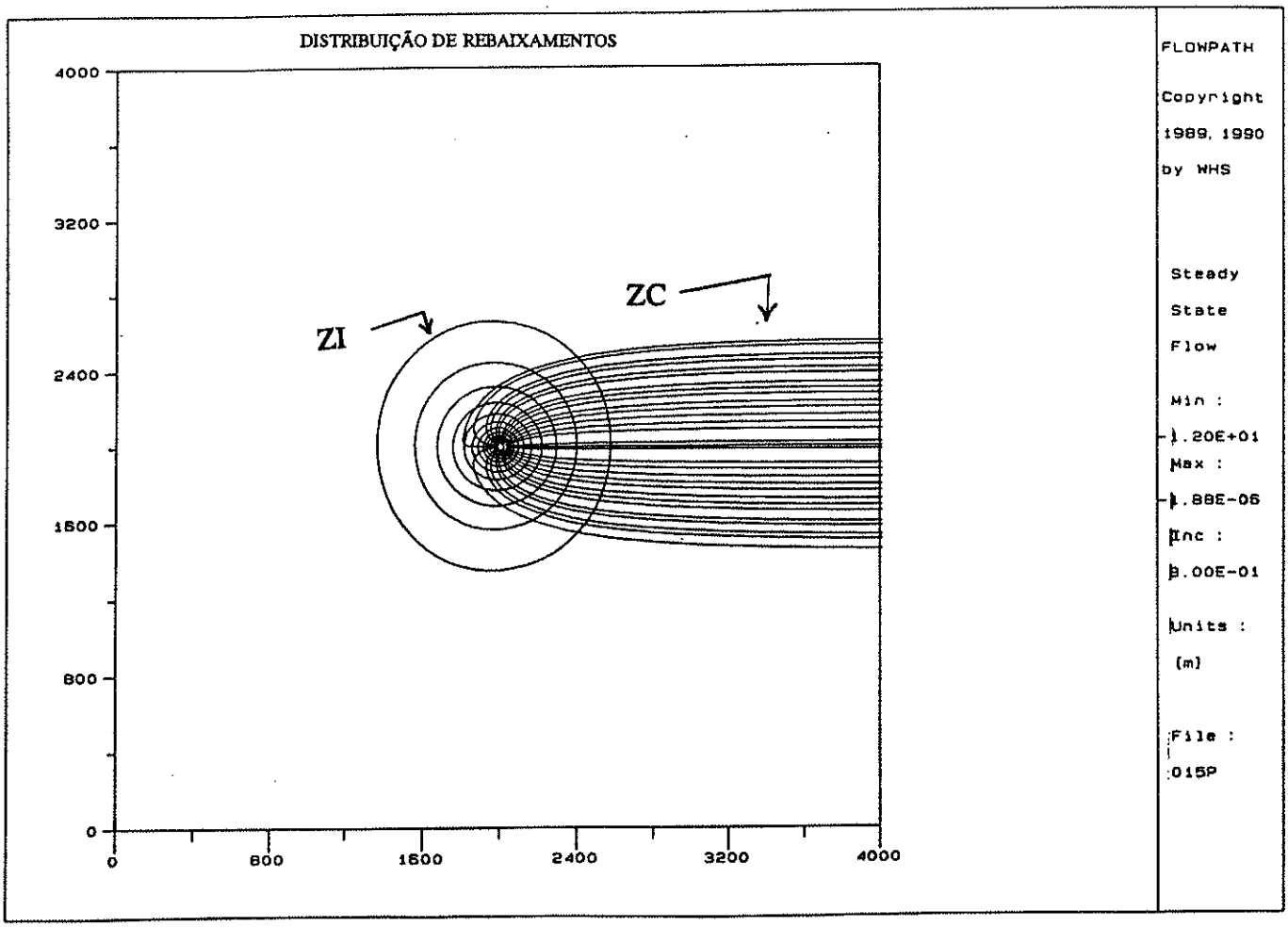


Figura 12 - Sob condições de superfície inclinada, a APP delineada com base em critério de rebaixamento difere totalmente da ZC, a zona que reúne todas as áreas que contribuem água para o poço, e de preferência tomada como a APP.

casos, a APP delineada com base em rebaixamento não fornece proteção a todas as áreas que contribuem água ao poço.

4.3 CRITÉRIO DE TEMPO DE TRÂNSITO (TT)

No critério de tempo de trânsito a distância entre o limite externo da APP e o poço é uma função do tempo máximo que um contaminante na água subterrânea leva para a percorrer estes dois pontos.

Para um mesmo tempo de trânsito, quanto maior a distância percorrida pelo contaminante na água subterrânea maior será a velocidade aí desenvolvida; como a velocidade é diretamente proporcional ao gradiente e à condutividade hidráulica do local, maior serão estes parâmetros (ver Exemplo 9.1, na seção 9).

Os processos de transporte de contaminantes na água subterrânea também influem na distância percorrida em determinado TT. Advecção é o principal processo em condições de alta velocidade, como próximo ao poço. Em fluxo de baixas velocidades predomina a macrodispersão de contaminantes, usualmente significante, fazendo com que atinjam o poço antes do previsto. Nas mesmas condições, quanto maior o tempo de trânsito, maior o decaimento biológico ou abiológico sofrido pelos contaminantes. A diluição através da macrodispersão é favorecida pelo aumento da distância percorrida, e contribui para a diminuição de concentrações em plumas que atingem o poço.

4.4 - CRITÉRIO DE CONTORNOS DE FLUXO

Quando contornos de fluxo são empregados como critério de delineação de APPs, utiliza-se os locais ou regiões de divisores de água subterrânea e/ou outras feições físicas/hidrológicas que controlam o fluxo de água subterrânea, para delimitar a ZC. Morros, rios, canais e lagos são exemplos de contornos superficiais de fluxo; os limites de um aqüífero e de um divisor

regional de água subterrânea são exemplos de contornos subsuperficiais (U.S.EPA, 1987b).

A APP delineada é uma parte ou a totalidade da ZC, dependendo da distância entre contornos. O critério é portanto mais adequado a aquíferos pequenos, ou quando, em grandes aquíferos, o poço encontra-se próximo a estes contornos, evitando-se ter que proteger grandes extensões de áreas geográficas.

Em aquíferos cársticos e rochas fraturadas a APP inicial tem sido delineada com este critério. Este critério, porém, exige a presença de hidrogeólogos com muita experiência no campo para que esses elementos físicos/hidrológicos possam ser definidos com confiança.

4.5 - CRITÉRIO DE CAPACIDADE ASSIMILATIVA

O critério de capacidade assimilativa apóia-se na atenuação de contaminantes antes deles atingirem o poço, ao atravessarem zonas não saturadas e/ou saturadas da formação.

A complexidade dos mecanismos de assimilação limita a avaliação a contaminantes específicos em composição e condições também específicas de solo, e oferece pouca segurança como critério para delineação de APPs.

O estado de São Paulo estabeleceu uma zona imediata de TT de 50 dias para proteção de seus poços, com base na eliminação de 99.9% da maioria das bactérias pesquisadas por Matthess et al., 1985. Para este tempo de trânsito, porém, vírus como S. paratyphie não são eliminados, e vírus como S. typhimuriumda e da poliomielite, hepatite e entero só o são parcialmente (90%) (U.S.EPA, 1987b).

5. MÉTODOS DE DELINEAÇÃO DE APPs

5.1 MÉTODOS DE DELINEAÇÃO DE APPs EM AQÜÍFEROS NÃO CONFINADOS SEDIMENTARES

O processo de delineação de APP envolve a seleção de um critério apropriado e seu

limite correspondente para que a proteção da zona de contribuição seja assegurada. A partir daí seleciona-se um método viável para implementar o critério, delimitando-se a APP no próprio solo, através de cercas ou outros meios que impeçam a degradação dessa área em torno do poço; a delimitação pode também ser transcrita para um mapa. Os seis métodos mais comuns usados para delinear a APP, em ordem crescente de sofisticação técnica são apresentados na Tabela 3 (EPA, 1987b):

MÉTODOS
. *RAIO FIXO ARBITRÁRIO*
. *RAIO FIXO CALCULADO*
. *FORMATOS SIMPLIFICADOS VARIÁVEIS*
. *MÉTODOS ANALÍTICOS*
. *MAPEAMENTO HIDROGEOLÓGICO*
. *MODELOS NUMÉRICOS DE FLUXO/TRANSPORTE*

Tabela 3 - Métodos de delineação de APPs

A escolha do melhor método para a delineação da APP de uma municipalidade considera:

1. o grau de acuidade desejado para a APP
2. disponibilidade de dados específicos da área em questão (valores e distribuição espacial de condutividade hidráulica, gradiente da superfície potenciométrica, porosidade efetiva, coeficiente de armazenamento (para simulações em estado transiente), taxa de bombeamento, taxa de infiltração e/ou evapotranspiração, espessura saturada do aqüífero (não confinados) ou espessura do aqüífero (confinados), coeficiente de retardamento, entre outros)
3. disponibilidade financeira para implementação do método
4. possibilidade de incluir no cálculo da APP condições locais hidrogeológicas de heterogeneidade e anisotropia, e corpos existentes de água superficiais (rios, lagoas, canais, açudes)
5. facilidade de aplicação do método escolhido
6. adequabilidade do método às condições hidrogeológicas locais

A importância da definição do local do contorno da APP o mais próximo possível da zona de contribuição, ou seja, de se obter as delineações mais acuradas de APPs, está no fato de que dentro dessas áreas muitas atividades que contaminam ou possam contaminar a água bombeada do poço são proibidas de operar. Quando a acuidade da APP é suficientemente convincente, pode-se sentir pouca ou nenhuma resistência à observância da proibição, além da certeza de estar sendo garantida uma maior proteção ao poço.

Muito comumente, os métodos são combinados entre si para melhor delinear a APP. O Departamento de Proteção do Meio Ambiente de New Jersey (NJDEP) planeja usar o método de raio fixo calculado juntamente com o modelo analítico de fluxo uniforme (método analítico).

Os seis métodos, descritos detalhadamente no guia técnico preparado pelo U.S. EPA em 1987b, serão aqui discutidos, e as vantagens e desvantagens inerentes a cada um dos métodos apresentadas.

5.1.1 MÉTODO DO RAIO FIXO ARBITRÁRIO (RFA)

É o mais simples dos métodos. A partir de um valor de raio fixo e arbitrariamente escolhido, gera-se uma área circular (Figura 13) centrada no poço ou bateria de poços que se deseja proteger.

Vantagens - Baixo custo, rapidez e facilidade de aplicação deste método. Bastante utilizado na primeira fase de delineação de APP, aplicando o critério de distância.

Desvantagens - Como o valor do raio é escolhido arbitrariamente, sem nenhuma base científica, a APP delineada pode resultar em proteção excessiva ou a menos das áreas de recarga deste poço. Este tipo de erro aumenta em situações de heterogeneidade, anisotropia e presença de contornos de fluxo, pois não podem ser consideradas neste método. A contestação da APP pode encontrar baixa defensibilidade.

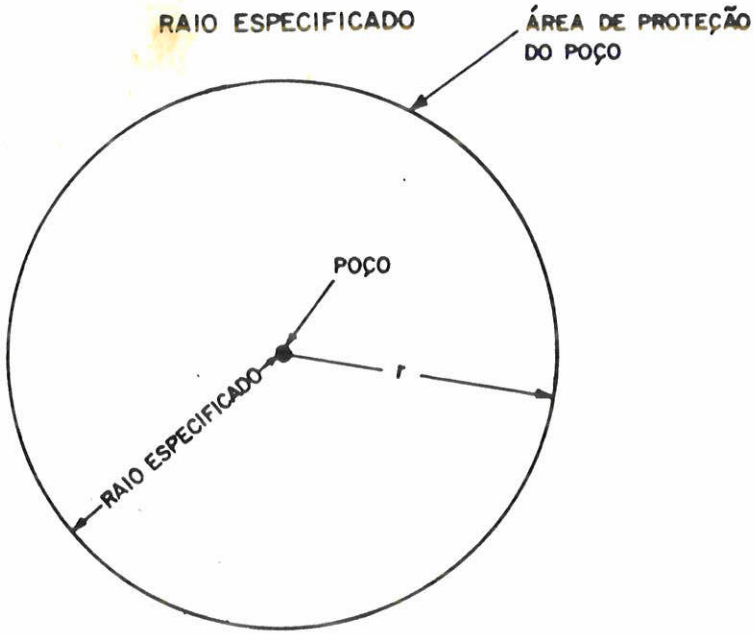
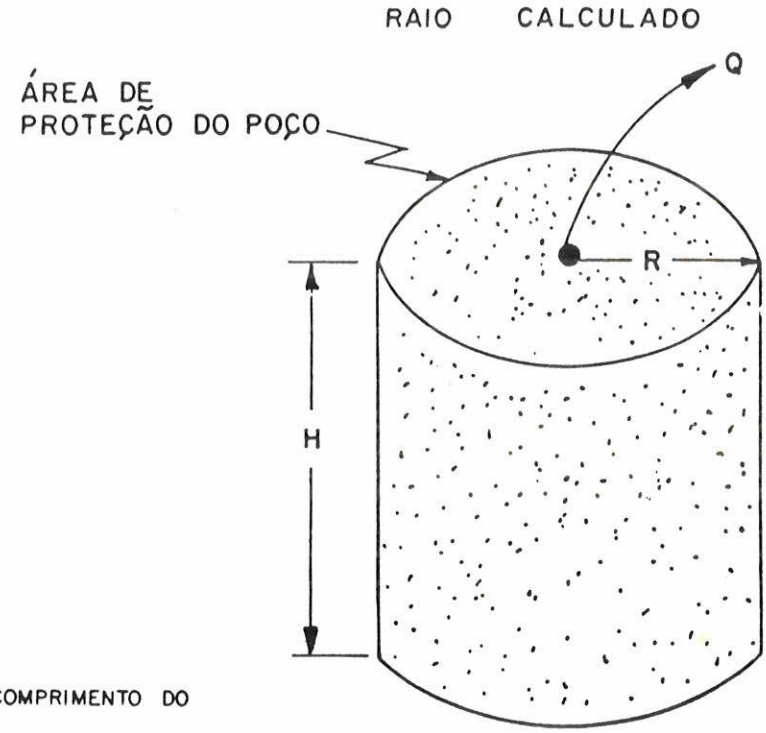


Figura 13 - Delineação de APP circular utilizando-se o método de raio fixo arbitrário (RFA) (como em Cleary, 1989)

5.1.2 MÉTODO DO RAIO FIXO CALCULADO (RFC)

Neste método, a APP corresponde ao círculo gerado pelo raio calculado. O raio é calculado com base no tempo de trânsito (TT) escolhido como limite de critério. O TT escolhido deve permitir a limpeza de contaminantes que colocam em perigo o poço, ou permite uma diluição ou dispersão adequadas dos contaminantes. O raio é calculado utilizando-se uma equação analítica, e gera o volume de água subterrânea a ser extraído pelo poço naquele tempo de trânsito. A disponibilidade de dados de teste de bombeamento, como condutividade hidráulica (K) e coeficiente de armazenamento específico (S_s, no caso de aqüífero confinado, ou S_y, no caso de aqüífero livre, que é igual à porosidade efetiva em meios porosos que não apresentam

apreciável número de zonas de água imóvel ou zonas mortas (Cleary, 1989)), permite o uso da equação de Theis para o cálculo de um raio, baseado em critério de rebaixamento. A área circular definida por este raio corresponde em parte à ZI daquele poço. Se apenas a porosidade efetiva é conhecida, uma equação de fluxo volumétrico é empregada e a APP assume o formato, em três dimensões, de um cilindro (Figura 14).



R = RAIO
Q = TAXA DE BOMBEAMENTO
t = TEMPO DE TRÂNSITO
n = POROSIDADE TOTAL
H = ESPESSURA DA ZONA SATURADA = COMPRIMENTO DO POÇO TOTALMENTE PENETRANTE

$$R = \sqrt{\frac{Qt}{\pi n H}}$$

Figura 14 - Delineação de APP utilizando-se o método de raio fixo calculado (RFC) (como em Cleary, 1989)

Vantagens - Requer uma quantidade limitada de habilidade técnica, não comprometendo o baixo custo, facilidade e rapidez de aplicação do método. Comparado ao RFA, é um pouco mais caro porque exige dados hidrogeológicos e mais tempo para a aplicação; é também mais acurado porque leva em consideração dados específicos do local.

Desvantagens - A acuidade da APP delineada por este método pode ser afetada uma vez que condições existentes de heterogeneidade, anisotropia e contornos de fluxo não podem ser consideradas.

5.1.3 MÉTODO DE FORMATOS SIMPLES VARIÁVEIS (FSV)

No método de formatos simples variáveis utiliza-se métodos analíticos, como a equação de fluxo uniforme (ver métodos analíticos), com critérios de tempo de trânsito e contornos de fluxo, para delinear formas "padrões" (Figura 15).

Primeiro calcula-se a distância entre o poço e os limites à jusante e laterais do contorno do fluxo da água subterrânea. O critério de tempo de trânsito é então utilizado para calcular-se o limite à montante do mesmo contorno de fluxo. Pode-se também considerar a distância à montante entre o poço e um contorno de fluxo. A seqüência de cálculos delinea a zona de captura para determinado TT (time related capture zone), ou a própria zona de contribuição (ZC) do poço, quando um contorno de fluxo é considerado. A zona delineada corresponde à forma "padrão".

A forma "padrão" é adequadamente escolhida quando as condições hidrogeológicas do local do poço que se deseja proteger aproximam-se daquelas consideradas no delineamento da forma, e as taxas de bombeamento são semelhantes. A forma padrão escolhida é delineada sobre o poço na direção do fluxo da água subterrânea.

Vantagens - Se as condições hidrogeológicas consideradas no desenvolvimento da forma padrão coincidir com aquelas onde se encontra o poço, a delineação é fácil, rápida, exige um número limitado de dados específicos da área, e pouca experiência técnica. A aplicação do método FSV, com apenas um aumento moderado no custo da delineação em relação ao método RFA, oferece uma análise mais refinada (U.S.EPA,1987b).

Desvantagens - A aplicação das formas padrões deve limitar-se à áreas de parâmetros hidrogeologicamente semelhantes aos usados na equação analítica que gerou a forma. A presença

de grandes quantidades de heterogeneidade e contornos hidrogeológicos produzem APPs de pouca acuidade.

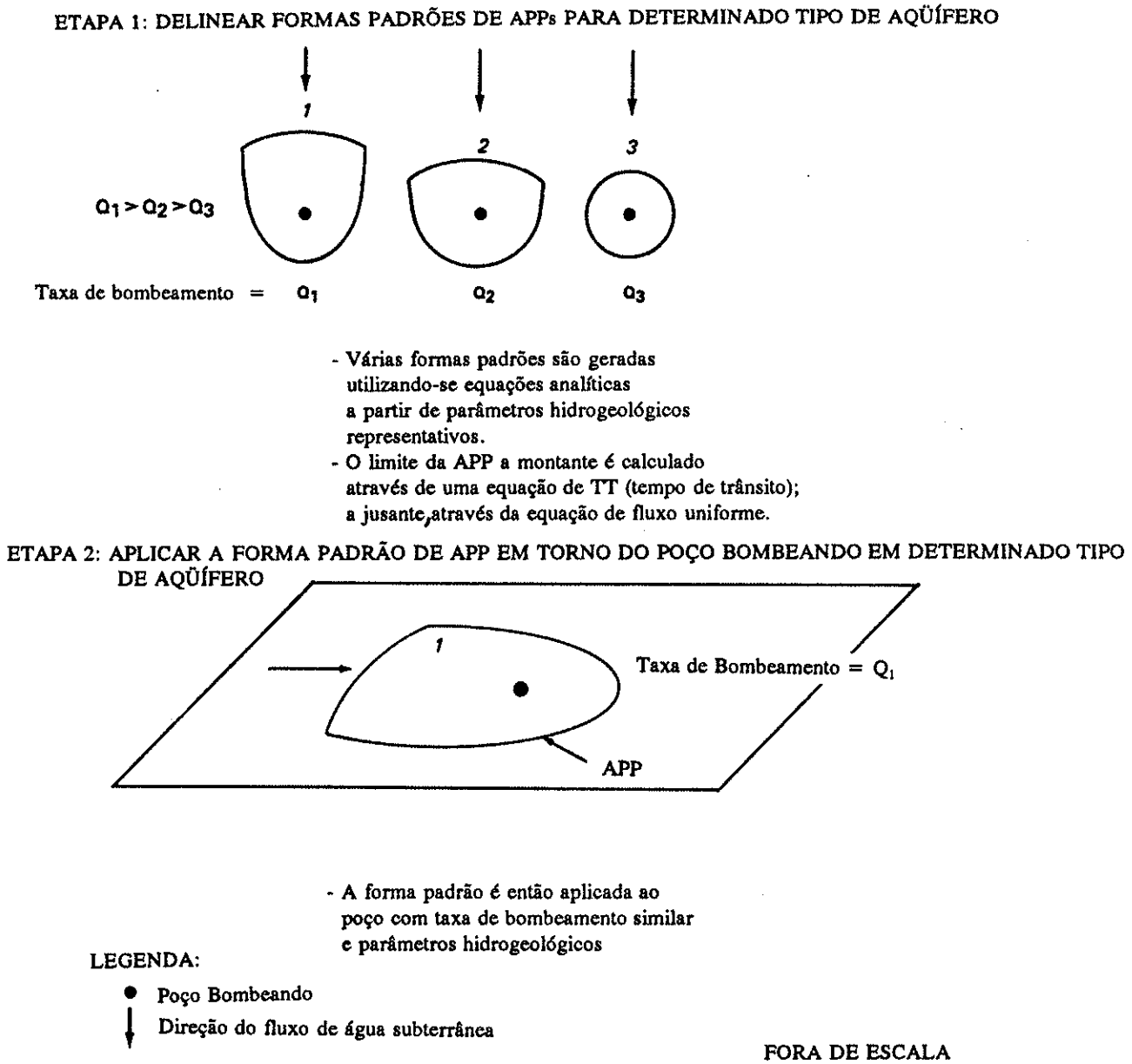


Figura 15 - Delineação de APPs usando o método de formatos simples variáveis (traduzido de U.S.EPA, 1988)

5.1.4 MÉTODOS ANALÍTICOS

Nos métodos analíticos a APP é delineada através de equações analíticas. As equações de fluxo uniforme são provavelmente os métodos analíticos mais usados para definir a zona de contribuição de um poço bombeando em condições de superfície potenciométrica inclinada. Utilizando-se parâmetros hidrogeológicos específicos do local do poço, calcula-se a distância entre o poço e o ponto de estagnação à jusante, e a largura da zona de contribuição (ZC). Estas equações não calculam o limite à montante da ZC (Figura 16). Outras técnicas que determinam o limite à montante da ZC devem ser empregadas, como a equação de TT utilizada pela Southern Water Authority na Inglaterra (U.S.EPA), 1987b); os contornos de fluxo exemplificam outra técnica utilizada com o mesmo propósito.

As equações de fluxo uniforme podem delinear a ZC de um poço bombeando, mas geralmente não calculam rebaixamentos, que determinam a ZI. A equação de Theis é um exemplo de uma solução analítica que calcula uma ZI parcial correspondente à APP, limitada pelo valor limite do critério de rebaixamento utilizado. A equação de fluxo volumétrico é também analítica, e calcula uma área circular correspondente à APP. De acordo com as Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas (U.S.EPA, 1987b), o chamado métodos analíticos está mais associado à equação de fluxo uniforme, que determina a ZC, e portanto menos a essas duas equações, reservadas como exemplos dos métodos de raio fixo calculado e determinação de ZIs parciais.

Numa outra abordagem (U.S.EPA, 1988), os métodos analíticos estão classificados como:

. métodos analíticos de rebaixamento - utilizam equações analíticas que calculam rebaixamento, delineando a ZI, em geral parcial (ZI total é obtida quando escolhe-se o rebaixamento limite igual a zero). Ideal para situações de superfície potenciométrica plana, porque ZI coincide com ZC. A equação mais comumente usada neste caso é a de Theis.

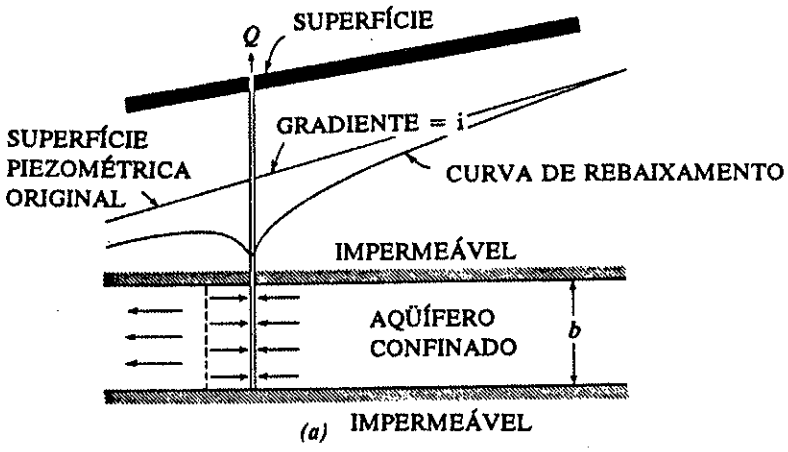
. métodos analíticos de tempo de trânsito - utilizam equações analíticas para delinear APPs baseadas em critério de tempo de trânsito. A distância entre o poço e o contorno da APP é o produto da velocidade média da água subterrânea vezes o valor limite do tempo de trânsito.

A equação volumétrica de fluxo é um exemplo deste método analítico.

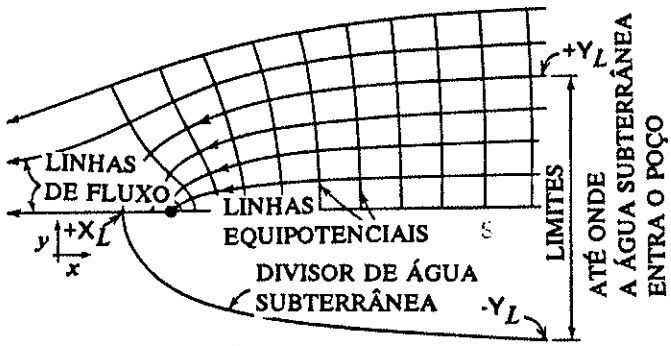
. métodos analíticos de zona de contribuição - as equações de fluxo uniforme são as mais utilizadas para definir a ZC.

Vantagens - Quando os métodos analíticos, envolvem somente equações analíticas que exigem dados específicos do local do poço (abordagem do U.S.EPA, 1987b), a APP delineada é mais acurada. Existem disponíveis modelos matemáticos que, utilizando equações analíticas, podem levar em conta anisotropia, recarga e evapotranspiração que variam no espaço, poços, rios, lagos, canais, aqüíferos confinados e livres, estado constante e transitório. Estes modelos analíticos que atendem à necessidade de contornos de fluxo e de anisotropia serem considerados, fazem deste um método acurado.

Desvantagens - Nenhum modelo analítico pode levar em consideração condições de geologia heterogênea, que certamente afeta a delineação de uma APP.



(a)



(b)

$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2\pi Kbi}{Q}Y\right)$$

EQUAÇÃO DE FLUXO UNIFORME

$$X_L = -\frac{Q}{2\pi Kbi}$$

DISTÂNCIA ATÉ O PONTO DE ESTAGNAÇÃO A JUSANTE

$$Y_L = \pm\frac{Q}{2Kbi}$$

LIMITES DO CONTORNO

LEGENDA

- poço bombeando

Onde:

Q = taxa de bombeamento do poço

K = condutividade hidráulica

b = espessura saturada

i = gradiente hidráulico

π = 3,1416

FORA DE ESCALA

Figura 16 - Delineação de APP usando o método analítico, através do modelo analítico de fluxo uniforme (traduzido de U.S.EPA, 1987b)

5.1.5 MÉTODO DE MAPEAMENTO HIDROGEOLÓGICO

Neste método, procura-se coincidir os contornos da APP com feições físicas hidrogeológicas, porque estas agem como fator limitante da expansão da ZC do poço bombeando.

Algumas das feições hidrogeológicas incluem contornos de sistema de fluxo, subdivididos em três tipos (U.S.EPA, 1988):

. contornos impermeáveis - a diminuição no valor da condutividade hidráulica, no contato entre um aqüífero e uma litologia do tipo rocha cristalina ou depósitos de grãos finos, podem funcionar como barreira para o fluxo da água subterrânea. A zona de contribuição da APP estaria limitada, pelo contorno impermeável, de expandir-se naquela direção (Figura 18).

. divisores de fluxo de água subterrânea - bacias de água subterrânea são delimitadas por divisores de água subterrânea. A zona de contribuição de um poço bombeando nesta bacia não estende-se além desses divisores de água subterrânea (Figura 18).

. contornos de recarga - em aqüíferos rasos, contornos de recarga como rios, lagos, e canais, que apresentam boa conexão hidráulica entre si, podem funcionar como contornos de fluxo (U.S.EPA, 1988). A APP delineada em condições hidrogeológicas de rio influente, por exemplo, indica receber infiltração induzida do corpo de água superficial para o poço. A razão entre a taxa de bombeamento e a taxa de infiltração do contorno de recarga pode determinar se a zona de contribuição expande-se além deste contorno.

As condições hidrogeológicas ideais para a delineação de APP através de mapeamento hidrogeológico indicam a presença de contornos de fluxo bem próximos à superfície (aqüíferos glaciais e aluvionares, por exemplo) com altas velocidades, e aqüíferos altamente anisotrópicos tais como rocha cristalina altamente fraturada e aqüíferos cársticos que apresentam canais de dissolução. Para a delineação da APP, os critérios de contorno de fluxo e tempo de trânsito (TT) podem ser mapeados através de técnicas de mapeamento geológico geral, mapeamento geofísico

e de testes com traçadores. Estas técnicas são detalhadamente discutidas em U.S.EPA (1987b).

Vantagens - como os dados obtidos através do método de mapeamento geológico são específicos do local e melhor caracterizam o aqüífero, a APP delineada tende a ser mais acurada do que quando o suposições simplificadas inerentes aos métodos analíticos são utilizados.

Desvantagens - o método deve ser aplicado à situações adequadas, evitando-se aqüíferos de grande extensão e profundos. A aplicação do método demanda especialistas em mapeamento geológico e geomorfológico, e o discernimento sobre o que constituem prováveis contornos de fluxo (U.S.EPA, 1987b).

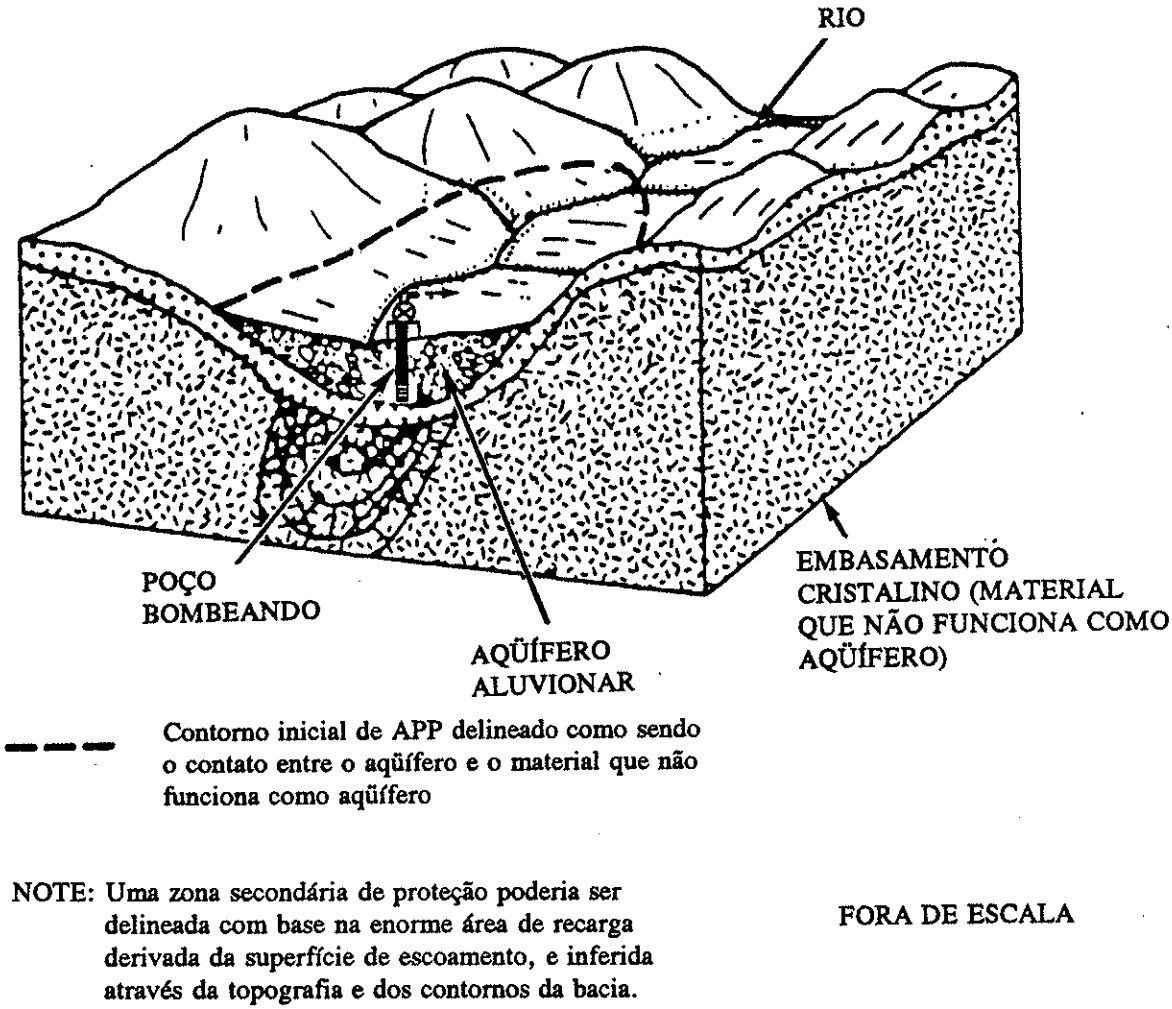


Figura 17 - Delineação de APP usando o método de mapeamento hidrogeológico - uso de contatos geológicos (traduzido de U.S.EPA, 1987b).

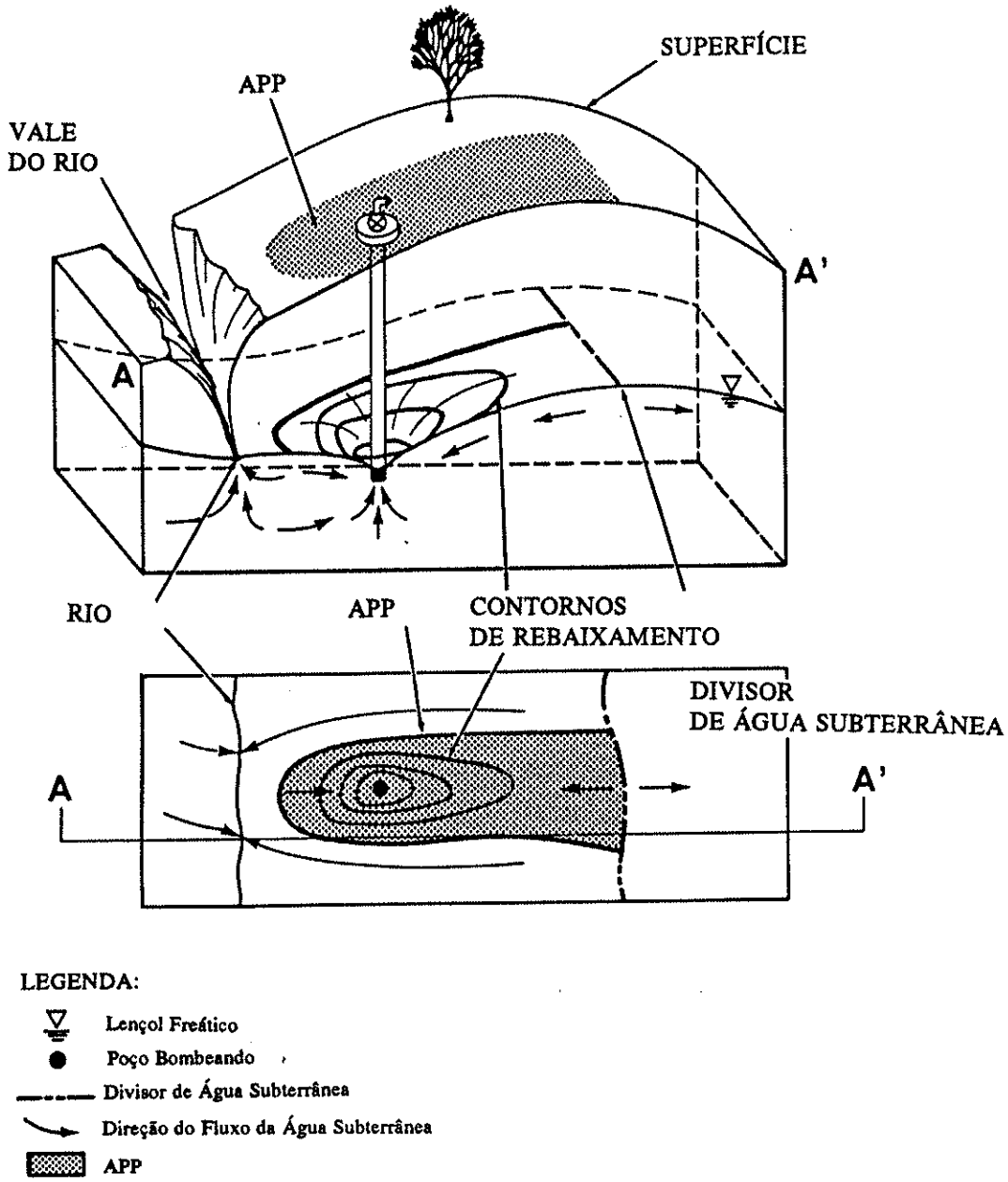


Figura 18 - Delineação de APP usando o método de mapeamento hidrogeológico - uso de divisores de água subterrânea (traduzido de U.S.EPA, 1987b). O espaçamento entre as curvas de rebaixamento está errado nesta figura, quando a menor distância entre estas curvas deveria ser no lado de montante (ver Figura 6, reproduzida de Hantush,1964)

5.1.6 MÉTODOS NUMÉRICOS DE FLUXO E DE TRANSPORTE

Os métodos numéricos são os mais sofisticados tecnicamente, e potencialmente os que produzem a delineação mais acurada de uma APP. Estes métodos consistem de modelos matemáticos numéricos de fluxo e/ou de transporte de massa, usualmente escritos para simulações em microcomputadores. Estes modelos são os únicos que podem descrever o aqüífero com fidelidade, levando em conta, nas simulações de estado constante e não estacionário, condições de heterogeneidade de parâmetros hidrogeológicos, além de também poder levar em conta anisotropia e contornos de fluxo.

Considerado como um dos métodos mais caros, é no entanto muito importante avaliar desde o início se a relação custo/benefício, neste caso, acuidade da APP, favorece a municipalidade.

A aplicação de um modelo numérico exige a coleta de dados específicos do aqüífero, em escala local ou regional, dependendo da área a ser simulada. Entre os parâmetros requeridos por um modelo numérico de fluxo pode-se citar condutividade hidráulica, porosidade efetiva, espessura saturada, taxas de bombeamento, evaporação, recarga, geometria do aqüífero e contornos hidrogeológicos; para os modelos numéricos de transporte de massa dados de dispersividade, retardamento, decaimento, entre outros, podem ser incorporados a esses modelos.

Os critérios que podem ser mapeados através dos modelos numéricos, para a delineação da APP, incluem rebaixamento, tempo de trânsito e contornos de fluxo. A partir dos valores de carga hidráulica, calculados pelo modelo numérico de fluxo depois de incorporar possíveis dados de anisotropia, heterogeneidade e contornos de fluxo, os limites da APP são delineados com base no critério previamente escolhido. A delineação da APP nesta fase da simulação é obtida, na maioria das vezes, através do método numérico denominado seguimento de partículas (particle tracking) ou de um modelo de transporte de massa.

<u>Vantagens</u> - O método de modelos numéricos de fluxo e de transporte de massa podem ser utilizados em praticamente qualquer tipo de condição hidrogeológica, como heterogeneidade,

anisotropia e contornos de fluxo, podendo assim delinear a APP com mais acuidade do que todos os outros métodos.

Desvantagens - A utilização deste método envolve custos mais altos do que os outros métodos, devido aos especialistas requeridos, dados de campo, software adequado, e tempo de simulação no microcomputador ou mainframe. Os modelos numéricos que não permitem o uso de malha (discretização) irregular da área simulada, são menos adequados do que os modelos analíticos para o cálculo de rebaixamento próximo a poços bombeando, porque sob gradientes fortes o tamanho da malha precisa ser bastante pequeno. Isto ocorre porque sob gradientes fortes o modelo numérico pode estimar uma reta entre dois pontos da malha, para um cone de depressão que é altamente curvo (Cleary, 1989).

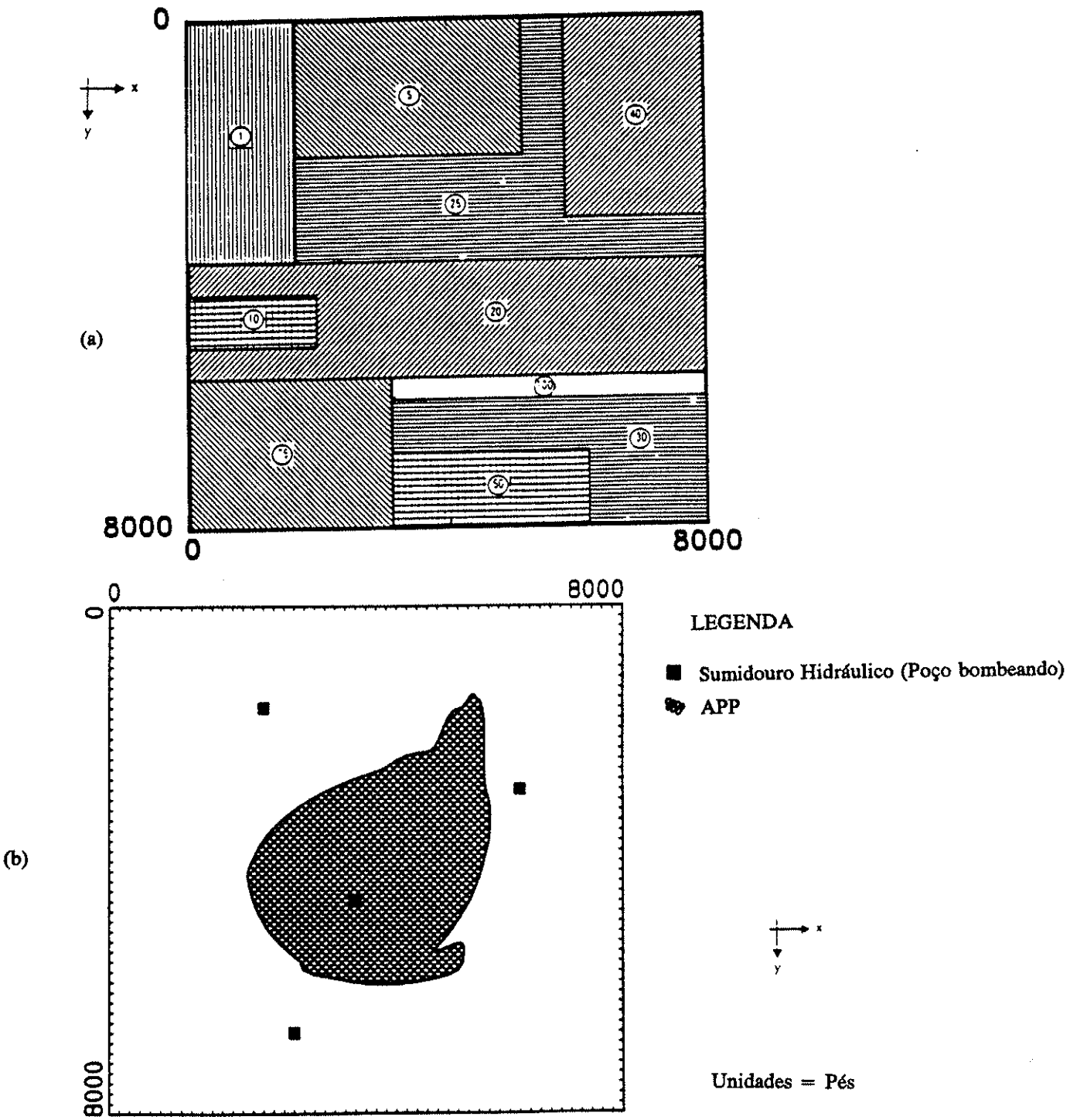


Figura 19 - Efeitos de geologia altamente heterogênea (a) sobre uma APP delineada (b) através do método numérico (modelo numérico de fluxo GWPATH (traduzido e modificado de Schafer, 1988)). Somente os métodos numéricos podem levar em conta heterogeneidades do aqüífero.

5.2 EXEMPLO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DELINEAÇÃO: 3 ZCs DELINEADAS PELOS MÉTODOS DO RAIO FIXO CALCULADO, ANALÍTICO E NUMÉRICO DE DELINEAÇÃO DE APPs

Incentiva-se a análise comparativa de métodos utilizados na delineação de APP, como a realizada em 4 estados americanos. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 4. Os métodos em geral, baseados em diferentes limites de critério de tempo de trânsito, mostraram maiores diferenças entre as APP delineadas quanto maiores os gradientes da superfície potenciométrica e a presença de contornos hidrogeológicos, porque estes não podem ser incorporados ao método do raio fixo calculado (RFC). É o caso da Flórida, em que o RFC providenciou uma proteção mais acurada do que em Connecticut porque os gradientes da superfície potenciométrica são menores e os contornos de fluxo estão geralmente ausentes. A percentagem errônea de cobertura foi, respectivamente, 0% contra 290%.

	MÉTODO											
FATOR COMPARATIVO	COLORADO[1]			CONNECTICUT[2]			FLORIDA[3]			MASSACHUSETTS[4]		
	RFC	MA	MN	RFC	MA	MN	RFC	MA	MN	RFC	MA	MN
% DE COBERTURA MÚTUA	N/A	N/A	N/A	100%	91%	100%	57%	100 %	100 %	41%	79%	100 %
% ABAIXO DA PROTEÇAO	N/A	N/A	N/A	0%	9%	0%	43%	0%	0%	59%	21%	0%
% DE COBERTURA ERRÔNEA	N/A	N/A	N/A	290%	160%	0%	0%	21%	0%	50%	52%	100 %

RFC = Raio Fixo Calculado
MA = Modelo Analítico
MN = Modelo Numérico
N/A = Não Aplicável

1. Resultados, não disponíveis, de modelação numérica como padrão para comparação
2. Comparação efetuada para um TT de 5 anos
3. Comparação efetuada para um TT de 500 dias
4. Comparação efetuada para um TT de 50 anos para o poço no. 1

Tabela 4 - Resumo dos resultados da análise comparativa do uso de três metodologias em 4 estados americanos (traduzido de U.S.EPA, 1988)

Outra abordagem usada na análise comparativa de APPs aplica o mesmo método de delineação a condições hidrogeológicas diferentes e compara as áreas de proteção resultantes.

5.3 MÉTODO DE DELINEAÇAO DE APP EM AQÜÍFEROS CONFINADOS

O processo de definição de área de proteção de poço em aqüíferos livres é conceitualmente mais fácil do que em aqüíferos confinados. É apresentado a seguir a abordagem que tem sido discutida para a delineação de APP em aqüíferos confinados, embora o assunto ainda esteja sendo pesquisado:

TIPOS DE AQÜÍFEROS CONFINADOS	MELHOR CRITÉRIO
confinados, com drenança	cone de depressão
altamente confinados (drenança insignificante através da camada confinante)	tempo de trânsito (TT)

Tabela 5 - Critérios mais indicados para diferentes tipos de aqüíferos confinados (traduzido de Cleary and Cleary, 1990)

"Drenança insignificante" é um termo subjetivo quando se considera que mesmo um fluxo extremamente pequeno de PCBs (polychlorinated biphenyls) ou de água contaminada por hidrocarbonetos clorados, cancerígenos, pode ser suficiente para destruir um poço municipal. É também subjetivo e está em debate o tempo de trânsito em anos.

No estado de New Jersey (ver 7.2 PPP em New Jersey, seção 7), associa-se a quantidade de drenança permitida através da camada confinante ao critério de tempo de trânsito. Se a drenança através da camada confinante de um aqüífero confinado for igual ou superior ao TT utilizado como limite de critério para a APP mais exterior (nível 3) em torno de um poço, ou seja um TT entre 10 e 15 anos, o PPP determina que uma área circular de 17 metros (50 pés)

de raio em torno do poço seja utilizada como APP. A área circular de 17 metros (50 pés) de raio é possuída ou controlada pelo dono do poço para guardar a boca do poço. Como o TT entre 10 e 15 anos é o tempo mínimo que a água subterrânea deve levar para atravessar verticalmente uma ou mais camadas confinantes, não levando em conta o tempo de trânsito da água subterrânea no aqüífero até aquele ponto, a abordagem é considerada conservativa.

Justifica-se a aplicação desse determinado TT como melhor critério para a delineação da APP porque a fonte da água subterrânea para o poço, ou seja, o aqüífero confinado, estará além do TT da APP mais distante do poço que está recomendada no PPP de New Jersey. Onde o TT da drenança através da camada confinante for menor que o sugerido para a APP do nível 3, exige-se uma APP interina delineada com os mesmos métodos empregados para poços em aqüíferos não confinados.

5.4 MÉTODO DE DELINEAÇAO DE APP EM AQÜÍFEROS FRATURADOS

A abordagem da delineação de APPs em aqüíferos fraturados depende das condições de confinamento em que se encontra. Em aqüíferos livres ou semi-livres a velocidade do fluxo da água subterrânea, ou de transporte de massa, pode atingir altos valores após recarga súbita, como em tempestades, indicativa da alta vulnerabilidade deste tipo de aqüífero. As fraturas interconectadas, o contato com aqüíferos aluviais, saprólitos saturados e corpos de água superficial (U.S.EPA, 1987b), e a taxa de precipitação controlam o fluxo da água subterrânea para o poço a ser protegido. A presença das fraturas irregularmente distribuídas e interconectadas determinam o caráter altamente anisotrópico dos meios fraturados. No momento não existem modelos matemáticos de propriedade pública que possam ser usados com confiança nestes meios. É atualmente um assunto em pesquisa.

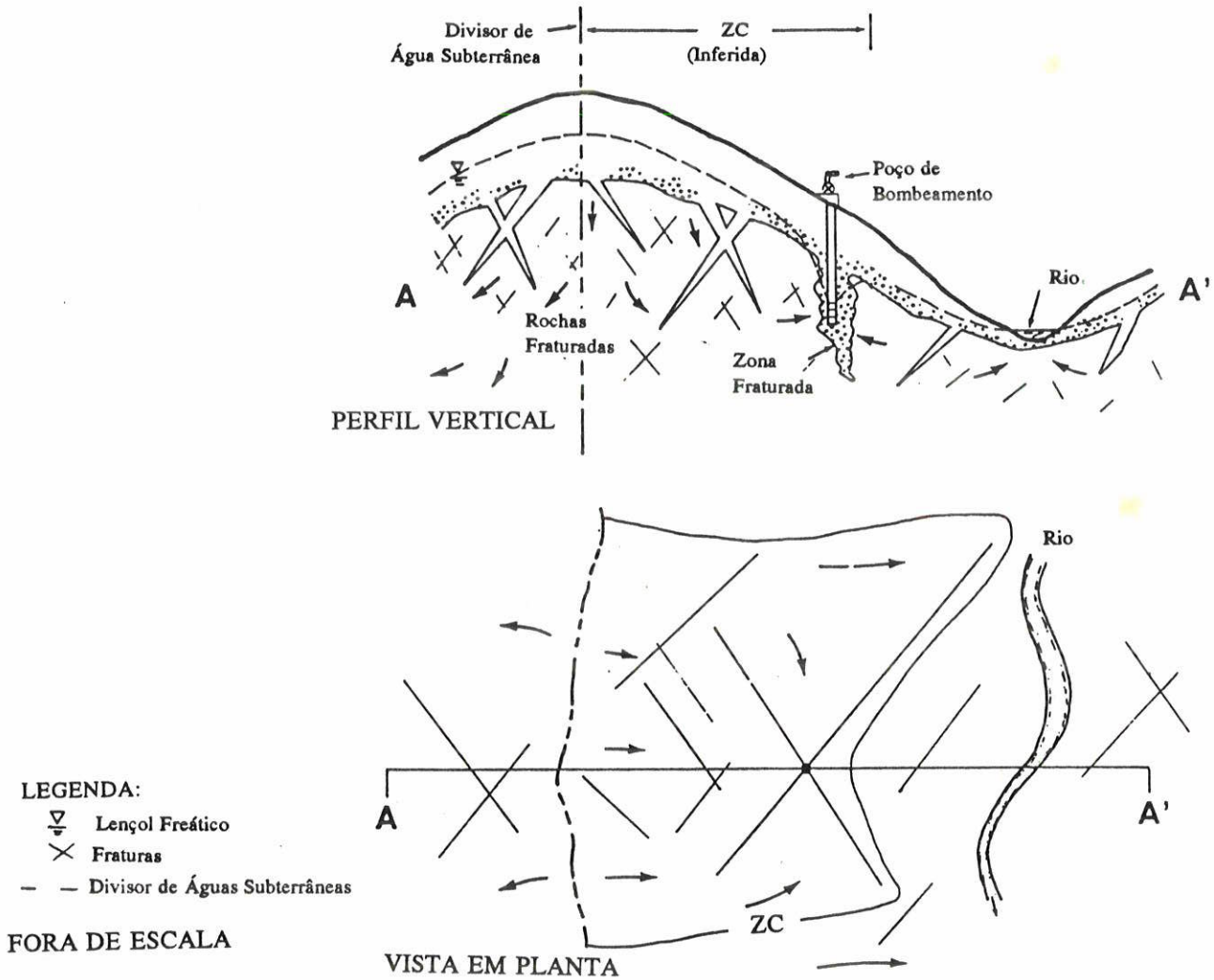


Figura 20 - Delineação de APP em aqüífero fraturado (traduzido de U.S.EPA, 1987b)

5.5 MÉTODO DE DELINEAÇAO DE APP EM AQÜÍFEROS CÁRSTICOS

A delineação de APPs em aqüíferos cársticos é dificultada pela presença de condutos de fluxo que variam desde pequenas dimensões, tomam a forma de rios subterrâneos ou alargam-se em forma de grutas e cavernas, e desenvolvem-se sem preferência de direção. As velocidades

atingidas nestes ~~meio~~ meios porosos variam tipicamente entre 500 a 1500 m/dia. O recorde de velocidade é de cerca de 8000 m/dia (25000 pés/dia).

Um poço bombeando nestas condições estabelece uma zona de contribuição altamente irregular e extremamente difícil de ser inferida a partir da superfície (U.S.EPA, 1987b), capturando água de zonas de recarga somente determinadas através de estudos de traçadores. Um estudo sobre um método de delineação de APP em aqüíferos cársticos está em andamento, mas nada foi publicado até o momento.

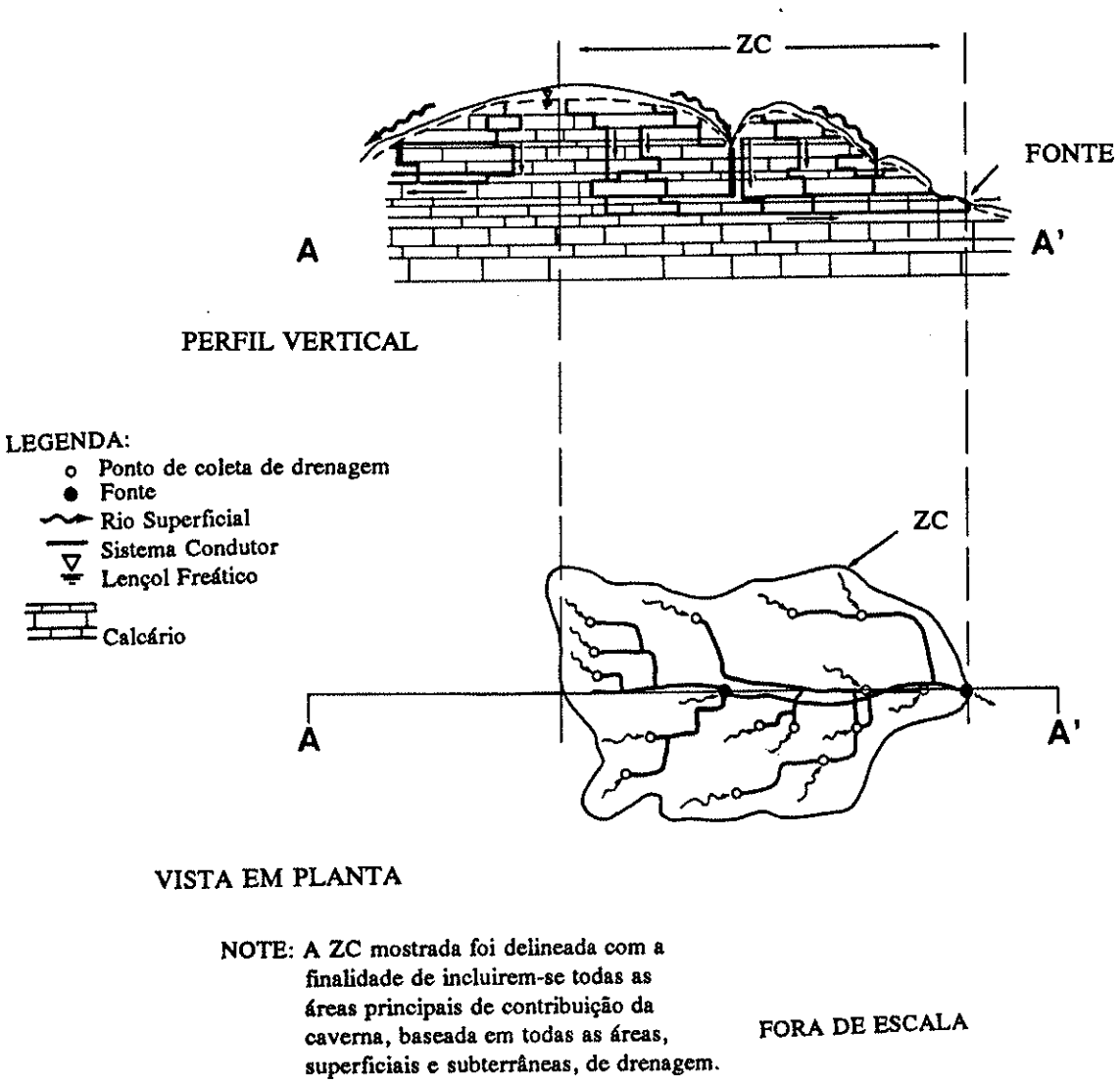


Figura 21 - Delineação de APP em aqüífero cárstico (traduzido de U.S.EPA, 1987b)

5.6 ESTIMATIVA DE CUSTOS DE APLICAÇÃO DE ALGUNS MÉTODOS PARA A DELINEAÇÃO DE APPs

Dados da pesquisa de salários de cientistas de água subterrânea da National Ground Water Association (NWGA - Associação Nacional de Água Subterrânea) de 1985 (U.S.EPA, 1987b) revelam custos entre 10 a 50 dólares para a aplicação do método de raio fixo arbitrário, envolvendo uma pessoa não técnica por 1 a 5 hora. Já para a aplicação do método numérico seriam necessários entre 10 e 200 horas de um hidrogeólogo/modelador senior, a um custo variando entre 175 e 3500 dólares. Os custos mencionados não aplicam-se a firmas particulares de consultorias, que em geral pagam salários mais altos do que os de agências estaduais ou municipais envolvidas em delineação de APPs. Estes custos também não refletem custos adicionais potenciais com equipamentos para a coleta de dados, computadores e programas de computadores e custos associados à preparação de relatórios (processando o texto, criando mapas e figuras). Em firmas de consultoria nos Estados Unidos, estimativas atualizadas indicam um custo médio de cem mil a trezentos mil dólares (U.S.$ 100,000.00 a 300,000.00) por aplicação de modelo numérico para a delineação de APP, incluindo desde a coleta de dados específicos do local para simulação em microcomputador, até a preparação do relatório final.

6. ABORDAGENS INTERNACIONAIS PARA PREVENIR A CONTAMINAÇÃO DE POÇOS

6.1 EXPERIÊNCIA EUROPÉIA SOBRE PROGRAMA DE PROTEÇAO DE POÇOS

Na Europa, a idéia de proteger-se não só a área que circunda um poço, mas de um modo geral prevenir que contaminantes se infiltrem na subsuperfície, começou no século passado, embora as leis e regulamentações mais importantes datem dos anos cinqüenta. A experiência acumulada através dos anos e em mais de dez países naquele continente que possuem programas

de proteção de poço, inspiraram similares desenvolvidos nos Estados Unidos.

A Europa gasta anualmente cerca de 2 bilhões de dólares, sendo que 40% desse total é gasto pela Holanda, realizando remediações em áreas poluídas.

Van Waegeningh (1985) sumariza onze programas europeus de proteção de água subterrânea na Tabela 6, que apresenta os sistemas de proteção, as restrições e as proibições

República Federal da Alemanha	Áustria	Bélgica	Finlândia	Holanda	França	Tchecoslo-váquia	Suíça	Hungria	Suécia	República Democrática da Alemanha
Zona I Bateria de Poços 10 -100m	Área de Proteção 50 dias	Zona Imediata de Proteção 100 m 24 h	Área de Tomada	Área de Recolhimento (>30 m) 50 - 60 dias	Proteção Imediata (10 - 20m)	Proteção Sanitária Primária zona 10 - 50m	Zona I 10 - 20m	Zona de Proteção	Área de Poço	Zone I 5 - 100 m
		Área de Proteção Interna (300 - 100m) 50 dias	Zona de Proteção Interna 60 dias		Área de Proteção Interna	Zona Secondária Interna de Proteção Sanitária	Zona II 10 dias >100m		Área de Proteção Interna > 60 dias > 100 m	Zona de Proteção II 60 dias
Zona II 50 dias	Área de Proteção Parcial	Área de Proteção Remota	Zona de Proteção Externa	Área de Proteção, TT de 10 anos	Área de Proteção Remota	Zona Secundária Externa de Proteção Sanitária	Zona III A 200 m	Área de Proteção Hidro-geológi-ca		
Zona III A 2 km									Área de Proteção Externa	Zona III A 10 anos
				Área de Proteção, TT de 25 anos			Zona III B	TT de 25 - 100 anos Proteção Regional		Zona III B 25 anos
Zona III B				Área Distante de Recarga						

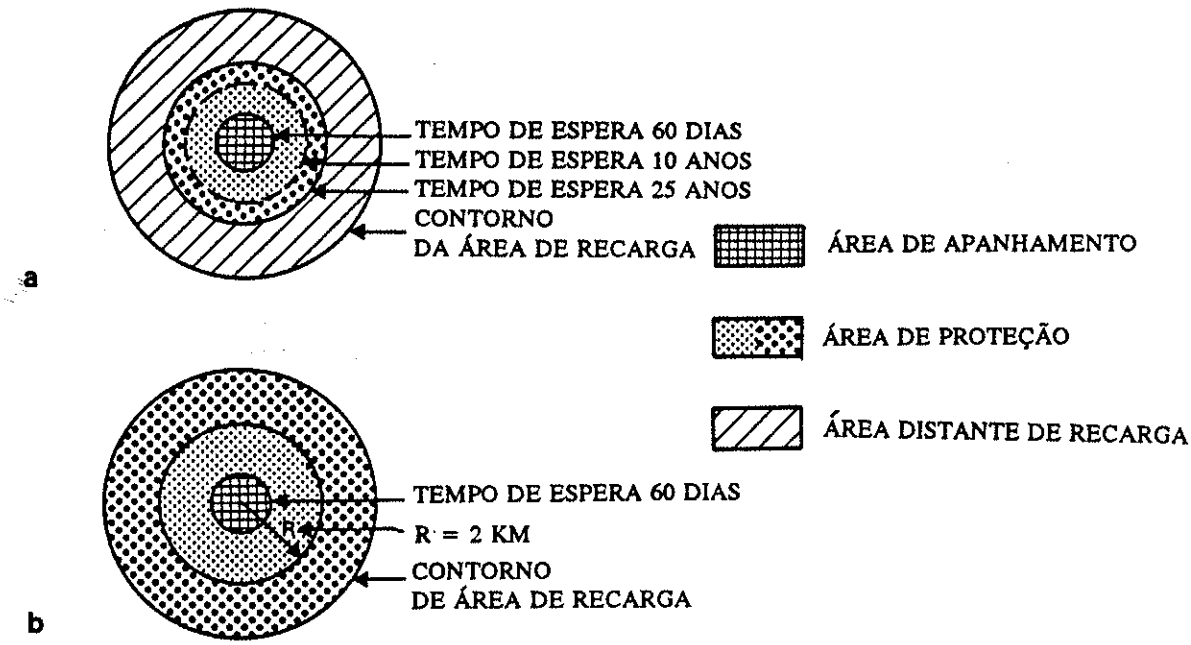
Tabela 6 - Áreas de Proteção de Poços usadas na Europa (traduzido e modificado de Van Waegeningh, 1985)

aplicadas em diferentes zonas, na maioria do tempo em pelo menos três zonas de proteção, definidas através de critério de distância ou tempo de trânsito. Na zona I somente atividades de

suprimento de água são permitidas; na zona II as construções são proibidas e as atividades agrícolas restritas; na zona III e um pouco além desta, há restrições sobre certos tipos de indústrias, e sobre a disposição, armazenamento e o transporte de produtos químicos e de óleo.

Em geral, a delineação das zonas leva em conta o conceito europeu das áreas de proteção serem tão grandes quanto necessárias para a segurança do suprimento da água, mas também tão pequenas quanto possível para acomodar interesses diferentes (U.S.EPA, 1987b).

Na Holanda, o sistema de zonamento era uma cópia do sistema da antiga Alemanha oriental até o fim dos anos de 1970 (Van Waegeningh, 1985). O sistema era baseado em tipos de aqüíferos e no uso de modelos analíticos para definir as zonas de proteção, de tempo de trânsito de cinquenta dias e de uma distância, não estabelecida cientificamente, de 2 quilômetros. O novo sistema de zonamento na Holanda, adotado em 1977, usa o critério, cientificamente mais convincente, de tempo de trânsito para delinear APPs em aqüíferos de meio poroso e aqüíferos cársticos fissurados (Figuras 22 (a) e (b)).



a) Aqüífero de meio poroso permeável b) Aqüífero cárstico fissurado

Figura 22 (a) e (b) - Sistema de zonamento na Holanda (traduzido de Van Waegeningh, 1985)

A Tabela 7 apresenta as restrições para cada tipo de área a ser protegida no sistema holandês. As zonas de proteção de TT (tempo de trânsito) de 10 e 25 anos formam a área de proteção.

Área de alcance	Área de Proteção	Área Remanescente de Recarga
60 dias e > 30 metros	TT de 10 e de 25 anos ou 2 quilômetros	
proteção contra bactérias patogênicas e vírus, e contra fontes de produtos poluentes	proteção contra produtos químicos dificilmente degradáveis	Regido por lei de proteção do solo e de água subterrânea
somente atividades relacionadas à abastecimento de água são admissíveis	como regra não são admissíveis: - transporte e armazenamento de produtos perigosos - indústrias - áreas de rejeitos - prédios - atividades militares - agropecuária intensa - escavações do solo, areia ou calcário - água de rejeito	

Tabela 7 - Restrições nas zonas de proteção (traduzido de Van Waegeningh, 1985)

Dr. Stephen S.D. Foster (Hidrogeólogo chefe do British Geological Survey, comunicação pessoal, 1990), exemplifica o caso da aplicação bem sucedida de tempo de trânsito de 10 anos na antiga Alemanha oriental, delineando uma APP dentro dos limites geográficos daquele antigo país; o mesmo TT reaplicado na antiga Alemenha ocidental, de condições geológicas diferentes, bem mais permeáveis, gerou uma APP que alcançou o território suíço; além de muito extensa para ser economicamente protegida, cumprir a regulamentação para aquela APP era politicamente inviável; a delineação teve que ser refeita, desta vez para um TT de 5 anos. O

resultado da reutilização inadequada de uma solução anteriormente bem sucedida demonstra que as condições geológicas de cada aplicação devem ser cuidadosamente avaliadas, confirmando serem similares, antes que se tome emprestado aquela solução.

6.2 EXPERIÊNCIA AMERICANA SOBRE PROGRAMA DE PROTEÇAO DE POÇOS

A experiência européia inspirou o programa de proteção de poço (Wellhead Protection Program) estabelecido nos Estados Unidos em 1986. O Congresso Americano aprovou então emendas ao Safe Drinking Water Act (SDWA) estabelecendo a criação do Programa de Proteção de Poço (PPP) (Wellhead Protection Program (WHPP)) e do Programa Demonstrativo de Aqüífero como Fonte Única (Sole Source Aquifer (SSADP) Demonstration Program), descritos respectivamente nas seções 1428 e 1427 dessas emendas. Para o SSADP os regulamentos estaduais e federais reservam proteção extra. Tornava-se oficial que todo o esforço e dinheiro empregados para remediar a poluição não eram muitas vezes suficientes para devolver às comunidades a potabilidade da água de poços que houvessem sido atingidos por poluição; a medida mais acertada incluía a proteção dos poços.

Aproximadamente metade dos estados americanos submeteram seus planos dentro do prazo. Uma exceção notável entre a outra metade foi o estado da Califórnia. Neste estado o ambiente geológico é altamente complexo e existem muitas agências que tratam problemas de poluição de água, o que dificultou chegarem a um consenso a respeito do estabelecimento de um Programa de Proteção de Poços. A situação atual indica que alguns estados americanos, como o de Massachusetts, encontram-se bem à frente em termos de definição e instalação de programas de PPP. As cidades de Littleton e Edgartown, esta última de Cape Cod, "exportam" suas experiências para outras comunidades interessadas em perseguirem um programa bem sucedido. Na Tabela 8, estas e algumas outras cidades americanas e países europeus são apresentadas relacionadas a diferentes métodos, empregados na definição de APPs em seus territórios.

MÉTODOS	EXEMPLO DE LOCAIS ONDE FORAM USADOS
RAIO FIXO ARBITRÁRIO	Nebraska Flórida Cape Cod, Massachusetts
RAIO FIXO CALCULADO	Flórida Vermont
FORMAS VARIADAS SIMPLIFICADAS	Sul da Inglaterra
MÉTODOS ANALÍTICOS	Cape Cod, Massachusetts Alemanha Oriental Holanda
MAPEAMENTO HIDROGEOLÓGICO	Vermont Connecticut Cape Cod, Massachusetts
MODELOS NUMÉRICOS DE FLUXO/TRANSPORTE	Sul da Flórida Cape Cod, Massachusetts

Tabela 8 - Exemplos de aplicações de métodos de delineamento de APP e locais onde foram usados (traduzido e modificado de U.S.EPA, 1988)

6.2.1 LEIS AMERICANAS ANTERIORES AOS PPPs

Anterior à criação de PPPs, nos meados da década de 80, num país industrializado como os Estados Unidos, inexistia uma lei que tratasse diretamente da proteção da água de poços que abastecem as cidades.

Entre as leis presentes até então estão o Clean Water Act (CWA) de 1972 para o

estabelecimento pelo U.S.EPA (United States Enviromental Protection Ágency) de métodos de controle e análises de substâncias tóxicas em água de rejeitos. Com a aprovação do Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) em 1976, estabeleceu-se uma legislação para proteger o meio ambiente contra "poluição do solo", pois era mínima se comparada à legislação existente que protege o ar e a água superficial da poluição. O Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act (CERCLA), também conhecido como Superfund, aprovado pelo Congresso Americano em dezembro de 1980, providenciou verba necessária para que se desse início à remediação de aproximadamente 400 áreas nos Estados Unidos, que haviam sido intensamente poluídas por rejeitos perigosos e que foram incluídas na Lista Prioritária Nacional (National Priority List - NPL). Hoje em dia esta lista tem mais de 1200 áreas. Ao todo são mais de 35.063 locais identificados como áreas potencialmente sujeitas, ou já sofrendo poluição por rejeitos perigosos. Até 4 de janeiro de 1992, segundo dados do CERCLIS (banco de dados do CERCLA), já haviam sido completadas avaliações preliminares (Preliminary Assessment) em 32.768 dessas áreas, e investigações de áreas (Site Investigations) em 15.772 destas áreas.

Em 1986, o Presidente Reagan assinou a nova legislação do Superfund, o Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA), estendendo o programa por mais cinco anos, aumentado o fundo de verba para descontaminações e chamando mais uma vez a atenção para os problemas de saúde humana decorrentes de áreas de rejeitos perigosos, entre outras coisas. A nova verba da SARA, para essas áreas que precisam ser descontaminadas é de 8,5 bilhões de dólares para o período 1986-1991. Foram gastos 1,6 bilhões entre 1980 e 1985. A renovação do programa, pelo Presidente Bush, por mais 5 anos demonstra a importância, a complexidade e o alto custo financeiro do assunto. Mas em 1990, o Congresso Americano estendeu a legislação SARA até 1994, sem nenhuma modificação. Centenas de outras áreas são remediadas com a verba largamente financiada pelas indústrias químicas e também pelas indústrias infratoras. As multas são pesadas porque entende-se que deve valer um dever moral de responsabilizar-se e corrigir atos que degradem a qualidade da água subterrânea e superficial, do solo e do ar.

7. EXEMPLOS DE PPPs NOS ESTADOS UNIDOS: PPP EM FLORIDA E NEW JERSEY

7.1 PPP EM FLORIDA (Dade County - Miami)

A informação sobre o exemplo de PPP estabelecido na cidade de Miami e aqui apresentada foi totalmente extraída de Walters (1987). A cidade de Miami situa-se numa subdivisão geográfica (denominada *county*) a sudeste do estado da Flórida, denominada Dade County. A região apresenta muitos lagos e brejos, mas as comunidades ai instaladas enfrentam o desafio de combinar o aumento da demanda de água potável devido ao crescimento populacional com o fato de que este crescimento se dá diretamente sobre o aqüífero freático Biscayne, colocando em risco a qualidade da água subterrânea. O problema de contaminação da água subterrânea por produtos químicos orgânicos sintéticos foi primeiro levantado pelo U.S.EPA nos anos 70, quando analisaram suprimentos de água potável em diversas cidades americanas. A análise da água do Distrito Norte do Dade County, tratada na estação de tratamento de Hialeah, revelou a presença de baixas concentrações de uma variedade enorme de produtos químicos sintéticos.

O Dade County teve então que instituir um programa de proteção da qualidade de sua única fonte de suprimento de água potável, o aqüífero Biscayne.

A primeira providência do Dade County em face do problema de contaminação em Hialeah foi a construção de uma nova bateria regional de poços de suprimento de água numa área rural. Inaugurada em 1983, a nova bateria regional, Northwest Wellfield, opera com 15 poços, produzindo o bombeamento mínimo de 567.809 m^3/d (150 mgd), e máximo de 832.787 m^3/d (220 mgd). A construção da bateria e a canalização da água para a estação de tratamento custou um pouco menos de 40 milhões de dólares. A idéia era utilizar a água de altíssima qualidade do Northwest Wellfield suplementando a água das antigas baterias de poços, que produzem 511.028 m^3 (135 mgd), localizadas nas cidades altamente urbanizadas de Hialeah e de Miami Springs. A presença de produtos químicos sintéticos nas águas das antigas baterias contudo, limitou seus usos a somente suprimento suplementar. O objetivo do programa de proteção é garantir que essa nova bateria de poços não sofra a mesma degradação que as

anteriores.

O aqüífero Biscayne consiste de calcário, arenito e areia. Êle é considerado um dos aqüíferos mais permeáveis do mundo, com valores de transmissividades variando entre 49.680 m^2/d (4 mgd/pé) e 149.040 m^2/d (12 mgd/pé). O Biscayne é um aqüífero freático, e os cones de depressão que aí se desenvolvem são rasos mas bastante extensos. A espessura da camada de solos imaturos sobre o aqüífero varia entre poucos centímetros a poucos metros, formando uma cobertura protetora muito fina. Esse fato torna o aqüífero altamente vulnerável a degradações decorrentes de atividades humanas na superfície. Nos últimos cinco anos a comunidade perdeu duas baterias a norte de Dade, com capacidade conjunta de 246.050 m^3/d (65 mgd), por causa de contaminações com produtos químicos, e outra a sul de Dade tem experimentado níveis elevados de nitratos a partir de produtos químicos agrícolas.

O estudo da proteção da bateria de poços (Wellfield Protection Study) teve início em 1983 e resultou no Plano de Proteção da Bateria de Poços do Noroeste (Northwest Wellfield Protection Plan) em novembro de 1985. Medidas anteriores ao plano, como a lei de Proteção de Bateria de Poços (Wellfield Protection Ordinance) de março de 1981, proporcionaram uma maturação gradativa da melhor abordagem para o controle da degradação da qualidade da água subterrânea em baterias de poços localizadas em áreas urbanas e para a preservação da qualidade da água subterrânea não contaminada de baterias de poços em áreas não urbanizadas. Esta lei de 1981 impôs restrições especiais em terrenos de empreendimentos que se encontram a certas distâncias de todas as baterias de poços de abastecimento de água pública. A lei estabeleceu uma série de áreas reguladoras em torno de cada bateria de poços, formadas por círculos concêntricos, chamadas Zonas de Proteção de Bateria de Poços. O limite de cada zona é baseado em tempos de trânsito, fixando zonas de distância percorrida pela água subterrânea de 10 dias, 30 dias, 100 dias e 210 dias. A zona de 210 dias apóia-se no conceito de que contaminantes fora desta zona não atingiriam o poço sem sofrerem alguma atenuação aceitável, e 210 dias era o período mais longo sem chuvas registrado para aquela região. Outras providências significativas trazidas pela lei de proteção de bateria de poços, são apontadas por Walters (1987):

1. a restrição à densidade de residências nas proximidades dos poços através da imposição de limites quanto à descarga em sistemas de esgotos e quanto à densidade permissível de fossas sépticas;

2. o estabelecimento de padrões de execução mais rigorosos para testes de infiltração, da tubulação para o solo (exfiltration), de esgotos;
3. a limitação de métodos permitidos para disposição de água de precipitação quando próximos a poços;
4. a proibição do uso de áreas novas envolvendo o uso ou manuseio de materiais perigosos.

Ainda sob a vigência da lei de 1981, houve pressão no sentido de abrirem-se mais áreas para expansão industrial. Em julho daquele ano a Comissão do County (Board of County Comissioners) aprovou uma emenda ao Plano Mestre Inclusivo de Empreendimento (Comprehensive Development Master Plan) e classificou 9,7 Km^2 (2400 acres) adicionais de terra como apropriados para rezoneamento industrial, imediatamente fora da zona de 210 dias. Dois anos mais tarde, a pedido da Comissão do County que revisava o Plano Mestre Inclusivo de Empreendimento sob a pressão da comunidade, o Departamento de Planejamento (Planning Department) e o Departamento de Gerenciamento de Recursos Ambientais avaliaram e declararam inadequada a regulamentação original para prevenir a degradação da água de excelente qualidade da Bateria de Poços do Noroeste. Os dois departamentos concordaram em estender os regulamentos de proteção às áreas compreendidas dentro do cone de influência das baterias de poços. A Figura 23 mostra a área de proteção original (aproximadamente 3,2 km (2 milhas) de raio) e a área estendida (6,4 km (4 milhas) de raio).

Iniciou-se então o Estudo de Proteção da Bateria de Poços (Wellfield Protection Study) com membros dos dois departamentos, e comissões de orientação técnica e de diplomacia. A comissão técnica dispunha de pessoal para providenciar e interpretar dados de meio ambiente e de saúde, e também para avaliar tecnologias de controle de poluição e de tratamento de água.

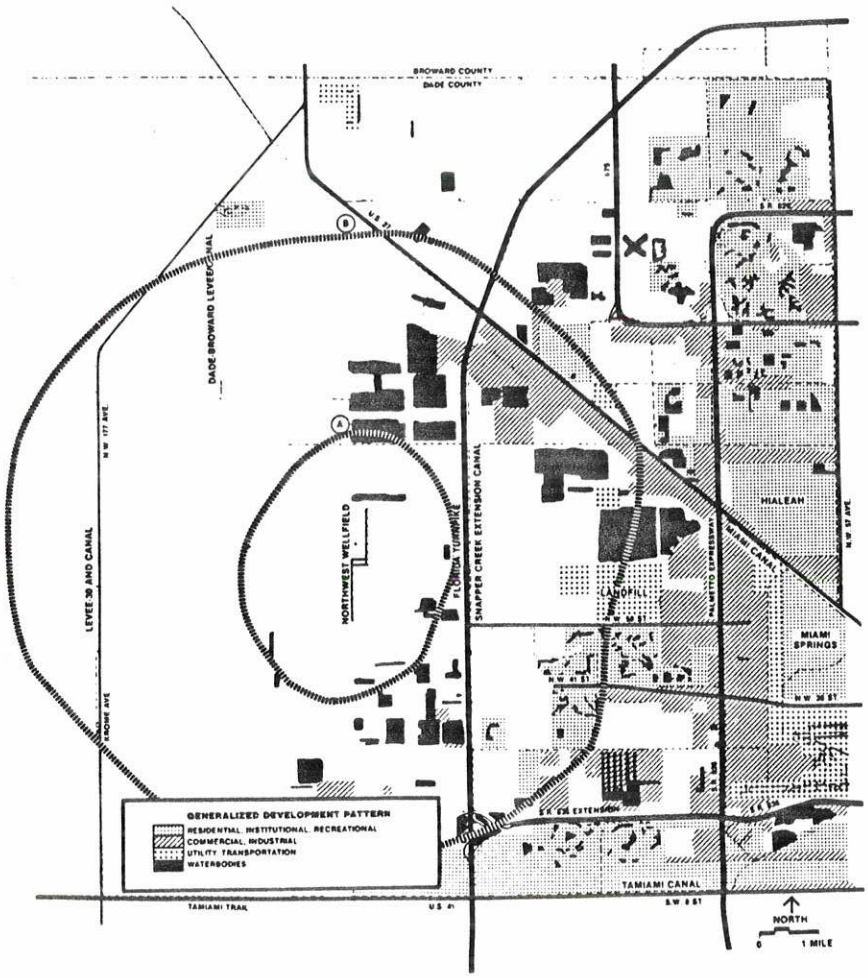


Figura 23 - APP original baseada em (A) TT de 210 dias e cone de influência total (B) estimado pela segundo modelo de fluxo de água subterrânea assumindo um bombeamento de 832.787 m^3/d (220 mgd) da bateria de poços do Northwest e um bombeamento de 283.905 m^3/d (75 mgd) das baterias de poços em Hialeah e Miami Springs, e condições extremas de estiagem (Walters, 1987).

A comissão de diplomacia foi composta por representantes de 27 organizações privadas e públicas afetadas pela regulamentação do gerenciamento da água e do uso da terra. Quando esta comissão requeria informação técnica, membros da comissão técnica ou outros peritos eram consultados. O projeto levou o dobro dos 12 meses originalmente previstos, mas, com exceção de um membro da comissão, todos votaram a favor do plano final.

A comissão técnica atualizou o tipo de programa de computador para o cálculo do rebaixamento do cone de influência da bateria de poços. Originalmente os cálculos foram feitos usando a equação básica de Theis. Foram desenvolvidos três outros modelos para uso em computadores:

1. O Distrito de Gerenciamento de Agua da Flórida do Sul (South Florida Water Management District) desenvolveu o primeiro modelo

2. A firma Camp Dresser and McKee, Inc. desenvolveu o segundo e o terceiro modelo matemático

A delineação da área de proteção em torno da bateria de poços calculada através do terceiro modelo usou como critério para o contorno da zona de proteção a montante da bateria de poços um rebaixamento de 7,6 cm (0,25 pé). A jusante, estabeleceu-se como o critério limitante do contorno do cone de influência o ponto mais alto previsto do lençol freático. O contorno entre os cones de influência das baterias de poços de Hialeah e Miami Springs e o cone de influência da bateria de poços do noroeste foi fixado no divisor de águas que ocorre entre esses cones.

A modelação da área em torno da bateria de poços do noroeste mostrou que as previsões tornaram o estabelecimento de contornos regulatórios uma tarefa complexa, uma vez que o cone de influência abrange um grande aterro sanitário. Se a atual contaminação da água subterrânea persistir, as simulações indicam que em 15 anos a bateria de poços será atingida. Foram propostas duas medidas para prevenir que isso aconteça:

1. Construção de torres de aeração na estação de tratamento de Hialeah para a remoção de VOCs (Volatile Organic Compounds) das águas de Hialeah e Miami Springs, para reativação dessas duas baterias de poços em 1989. O retorno da utilização dessas baterias de poços e

a diminuição do bombeamento no noroeste pretendeu causar uma retração do cone de influência a oeste do aterro sanitário.

2. Construção de um sistema de recarga canalizada do Everglades nas proximidades da bateria de poços do noroeste, o que retrairia o cone de influência ao local do canal, exceto durante períodos de seca. Estima-se que o sistema esteja finalizado entre os anos de 1991 e 1994.

A Figura 24 mostra os contornos do Programa Trifásico de Proteção da Bateria de Poços. A primeira fase compreende a adoção das recomendações do Estudo de Proteção da Bateria de Poços no cone de influência ligeiramente modificado (mais a oeste do aterro sanitário) daquele delineado pelo terceiro modelo matemático. A segunda e a terceira fase correspondem respectivamente à adoção das medidas 1 e 2 descritas acima, tão logo se concluam as construções.

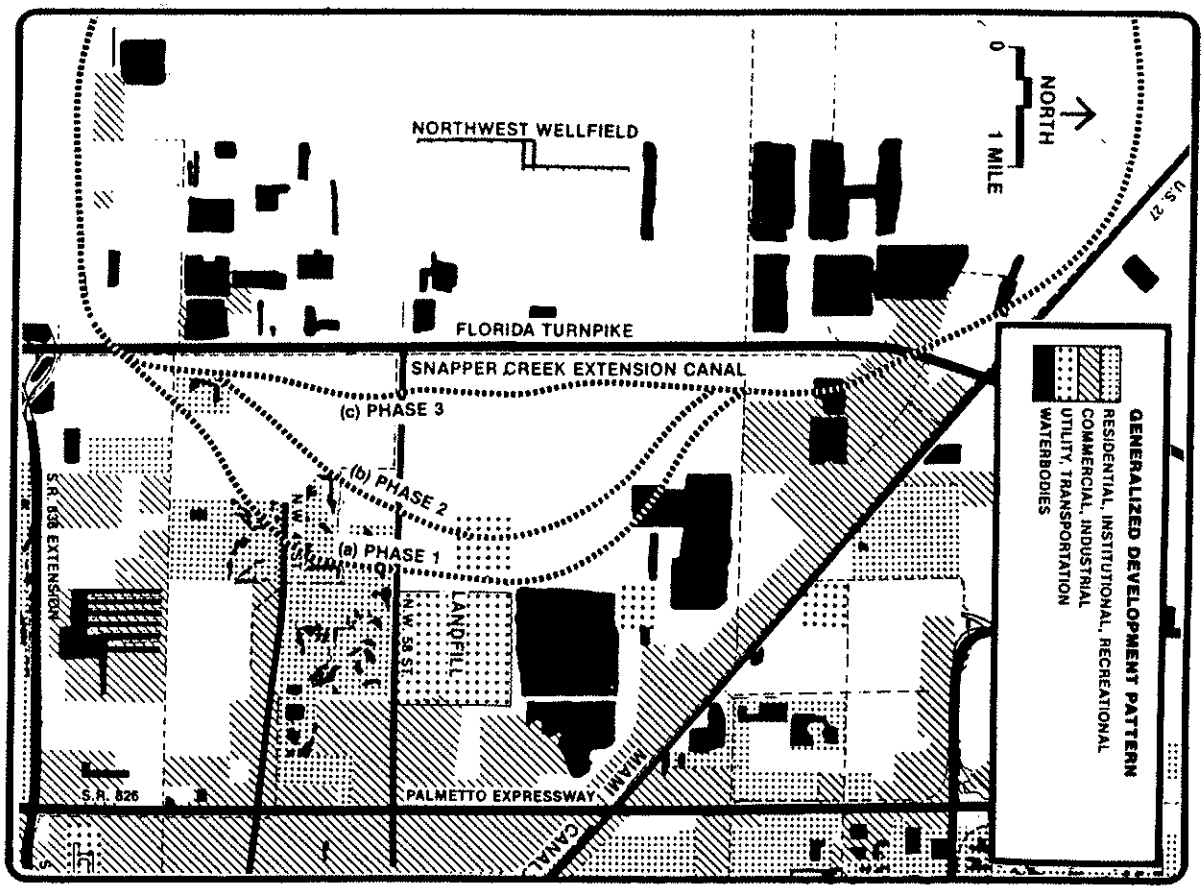


Figura 24 - Contornos de PPP trifásico. (a) O contorno da fase 1 está localizado a uma distância que corresponde à TT de 5 anos a leste do contorno da fase 2, assumindo um bombeamento de 567.809 m^3/d (150 mgd) na bateria de poços de Northwest e 10 mgd nas baterias de Hialeah e de Miami Springs, e condições de extrema estiagem. (b) O contorno da fase 2 está localizado a oeste do aterro, a uma distância que corresponde a TT de 5 anos, baseado no bombeamento de 454.248 m^3/d (120 mgd) na bateria de poços de Northwest e 189.270 m^3/d (50 mgd) nas baterias de poços de Hialeah e Miami Springs, e condições médias de período de chuvas. (c) O contorno da fase 3 está baseado no bombeamento de 832.787 m^3/d (220 mgd) na bateria de poços de Northwest assumindo condições médias de período de chuvas e uma zona adicional de segurança a leste do canal de recarregamento, baseda em 3 anos consecutivos de períodos de estiagem (Walters, 1987).

7.2 PPP EM NEW JERSEY

A informação sobre o PPP em New Jersey aqui apresentada foi, em sua quase totalidade, obtida do Programa de Proteção de Poços estabelecido para aquele estado americano. Em dezembro de 1991 o estado de New Jersey, no nordeste dos Estados Unidos, tornou disponível ao público, depois de discussões e sugestões com a comunidade científica e cidadãos interessados e após aprovação da U.S.EPA, o seu Programa de Proteção de Poços (NJDEPE, 1991). O documento, preparado pelo Departamento de Proteção Ambiental e Energia de New Jersey (New Jersey Department of Environmental Protection and Energy - NJDEPE) inclui regulamentos sobre o local e a operação de fontes potenciais e existentes de descargas significantes de poluentes, e sobre o local e a operação de novos poços. Esta agência estadual foi designada pelo governador do estado de New Jersey, Jim Florio, para preparar o PPP, uma vez que conta com uma equipe de profissionais (hidrogeólogos, modeladores, entre outros) capacitados para o desenvolvimento de programa.

O desenvolvimento do Programa de Proteção de Poços em New Jersey acontece em etapas, discutidas a seguir com base no documento final deste PPP (NJDEPE, 1991).

7.2.1 DEFINIÇÃO DOS POÇOS AFETADOS

Serão incluídos no PPP um total de 2.800 poços de abastecimento público para as comunidades e 5.000 poços de abastecimento público que não servem à comunidades (poços que servem a usuários em escolas e hospitais). Este total de poços atende a 36% da demanda de água potável no estado. As coordenadas desses poços, e dos 250.000 poços domésticos que serão eventualmente incluídos no programa de proteção no final do planejamento, encontram-se cadastrados no sistema de dados denominado Geographic Information System (GIS). A continuação do desenvolvimento do banco de dados espera providenciar coordenadas acuradas através do uso de fotografias aéreas ou do uso do aparelho manual chamado global positioning system (GPS), evitando o erro médio descoberto na localização física dos grandes poços

municipais, da ordem de 122 metros (400 pés), com erros imprevisíveis de até 4,6 quilômetros (15.000 pés) para algumas coordenadas (Schooley, 1989). O GPS é um receptor de coordenadas, medidas através de satélites, com um erro menor do que 30 metros (100 pés). O aparelho, muito popular para a identificação da localização de tanques na guerra do Golfo Pérsico, fornece com acuidade e a um custo razoável a posição do poço, para posterior delineação da APP.

Provavelmente no Brasil existem os mesmos níveis de erro quanto às coordenadas dos poços municipais, e que devem ser corrégidos antes do início da delimitação das APPs.

7.2.2 MÉTODO DE DELINEAÇÁO DAS APPs EM NEW JERSEY

Serão utilizados dois tipos de delineações de APPs: interina e final. A APP interina será delineada com métodos apropriados à área do poço, mas baseando-se em dados regionais do aquífero. A APP final fará uso de dados específicos do aquífero e técnicas mais sofisticadas.

As APPs vão-se basear em dois critérios básicos: tempo de trânsito (TT) médio que a água subterrânea leva até atingir o poço; e os contornos hidrogeológicos que afetam o fluxo tais como falhas, morros e corpos de água superficial.

Foram estabelecidos níveis de proteção em torno do poço, definidos através de limites de critério:

a) O Departamento de Proteção Ambiental e de Energia de New Jersey (NJDEPE) requer a propriedade ou controle de uma área de 17 metros (50 pés) de raio em torno do poço.

b) Nível 1 (Atenuação de Poluentes Microbianos) - TT entre 200 e 360 dias para o contorno a montante do poço, em contraste com o valor de 50 dias de TT proposto pela CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo) para o estabelecimento de zonas circulares de proteção em torno de poços no estado de São Paulo. O valor mínimo deste limite baseia-se na evidência de que bactérias atingiram um poço que se encontrava a 170 dias de TT, e o valor máximo baseado na atenuação de vírus na água subterrânea.

c) Nível 2 (Proibição de Derramamentos Perigosos) - TT entre 2 e 5 anos. A intenção é evitar que materiais perigosos de difícil degradação na água subterrânea sejam derramados em áreas tão próximas do poço que não seja possível uma remediação efetiva.

d) Nível 3 (Resposta a Derramamentos) - um TT de não menos de 10 e não mais de 15 anos. Estudos em sete counties diferentes do estado de New Jersey indicaram que as plumas de poluição existentes são totalmente encerradas em APPs de TT entre 10 e 15 anos. A geologia encontrada em New Jersey compreende areias finas a grossas e rochas fraturadas na porção norte do estado. A finalidade deste nível é garantir o monitoramento de fontes potenciais de poluição para que um derramamento seja detectado rapidamente e haja tempo para uma resposta efetiva. Neste nível é permitido o uso de substâncias perigosas, se houver monitormento e mecanismos de resposta suficientes.

7.2.3 MÉTODO DE DELINEAÇÃO DAS APPs INTERINAS E FINAIS

Os métodos analíticos foram os mais utilizados para a delineação das APPs interinas devido às limitações de dados, custo mais baixo e estimativa relativamente acurada da APP. Os métodos são aplicáveis a quatro categorias de poços: poços públicos de abastecimento de água a comunidades, grandes poços públicos não transientes e não comunitários (escolas, hospitais), outros poços públicos não comunitários e grupo de poços domésticos. O objetivo nesta fase é delinear a APP interina e então incorporar uma área consultiva (advisory area) em torno desta APP, usando o mesmo método mas com duas direções de fluxo de água subterrânea (direções tomadas a 15 graus à direita e à esquerda da direção original). Se dentro dessa área consultiva estiver localizada uma importante fonte de poluição, será prioritária a delineação de uma APP final, para que se determine se a APP realmente inclui essa fonte. Os métodos para cada categoria de poços são:

a)poços públicos de abastecimento de água a comunidades - O modelo analítico de fluxo uniforme (MFU) deve delinear a APP interina para os TTs selecionados para cada um dos

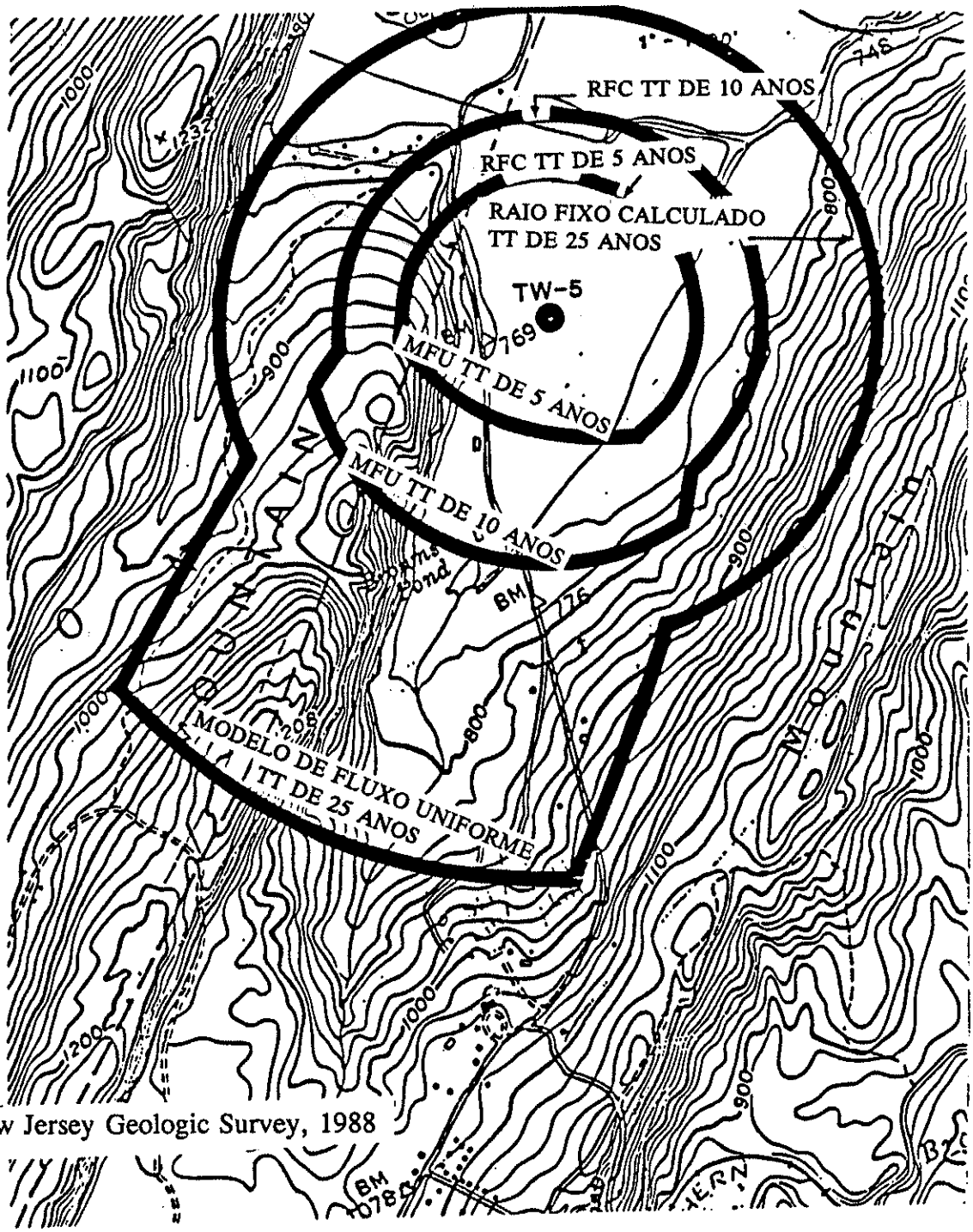
três níveis. Uma segunda APP delineada com o Raio Fixo Calculado (RFC), para os TTs selecionados para os níveis 1 e 2 somente, deve ser superposta à parábola calculada com o MFU (Figura 25). A superposição no método híbrido MFU/RFC tenta evitar que erros no fluxo regional considerado não resultem na exclusão de fontes significantes de poluição dentro da APP. Os contornos de fluxo majoritários da área são então impostos à APP para a delineação da APP interina (Figura 26). Por último, será calculada e adicionada à área consultiva (Figura 27). Esta abordagem é chamada de "buraco de fechadura" ("key hole"), porque a APP delineada apresenta este formato.

b)grandes poços públicos não transientes e não comunitários (escolas, hospitais) - Serão propostos os mesmos métodos dos poços da categoria anterior. Os limites de critério variarão de acordo com a população servida e são importantes porque abastecem regularmente populações de usuários em escolas e hospitais, e bombeam volumes de água suficientes para afetarem o fluxo regional de água subterrânea.

c)poços públicos não comunitários - O método para a delineação da APP é o RFC. Devido à falta de dados sobre o poço (construção e localização), será preparada uma matriz que fornecerá um valor de RFC a partir do intervalo da capacidade de bombeamento e da espessura efetiva da geologia regional.

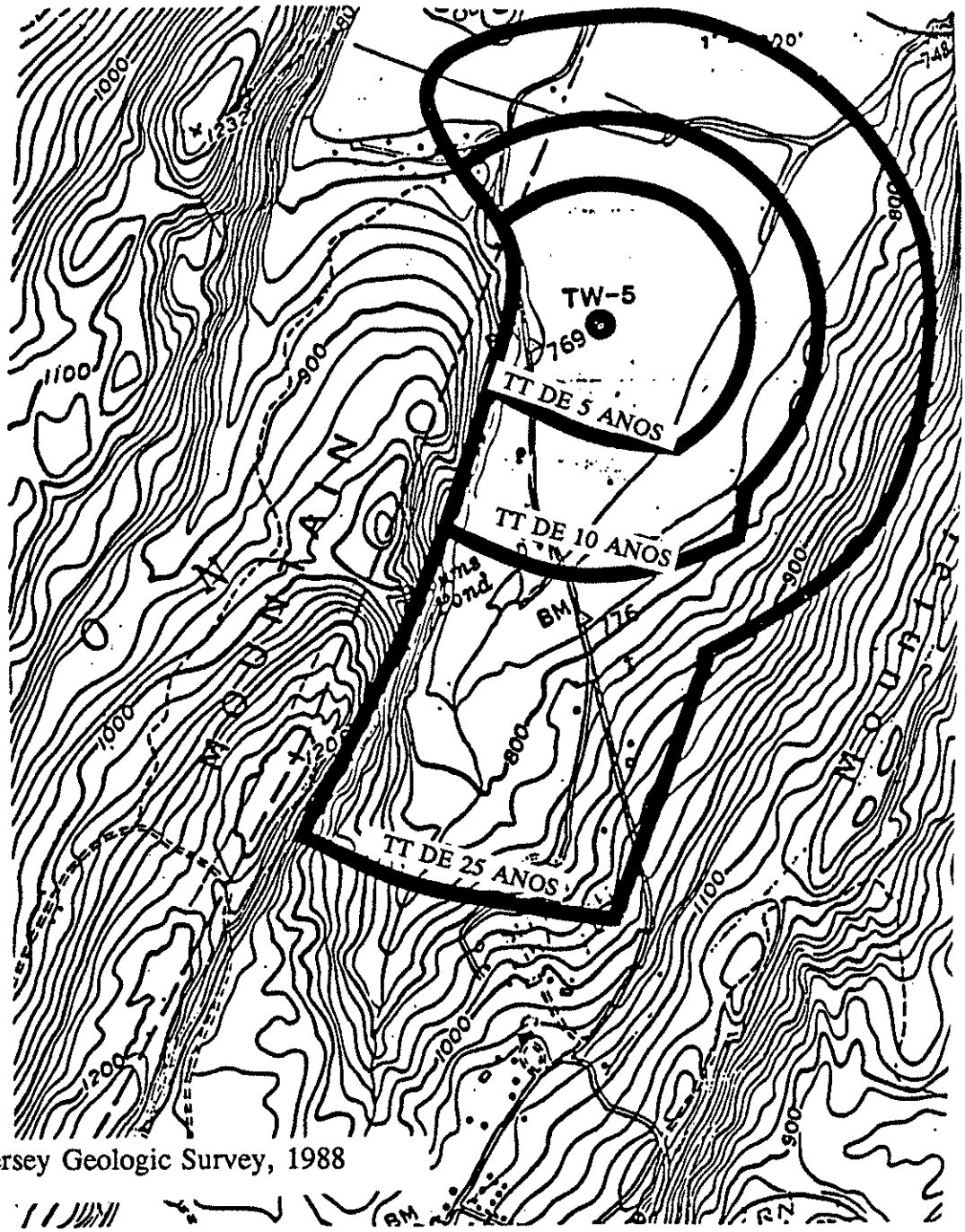
d)grupo de poços domésticos - para poços domésticos agrupados segundo um padrão e uma certa densidade num empreendimento residencial, a APP interina será a área do empreendimento onde situam-se os poços, acrescida de 30 metros (100 pés) em torno desta área, e mais uma área que se extende à montante, a partir do perímetro de 30 metros (100 pés), até o limite do TT para o nível 3 (10 a 15 anos). Os níveis 1 e 2 são então calculados, e os contornos de fluxo incorporados à esta APP interina.

As APPs finais de poços existentes e propostos devem ser delineados utilizando os mesmos métodos das APPs interinas, mas com base em dados específicos sobre o poço e a hidrogeologia local. Para os poços públicos de abastecimento de água de comunidades que sofrem pouca influência de outros poços vizinhos, a APP pode ser calculada através de um



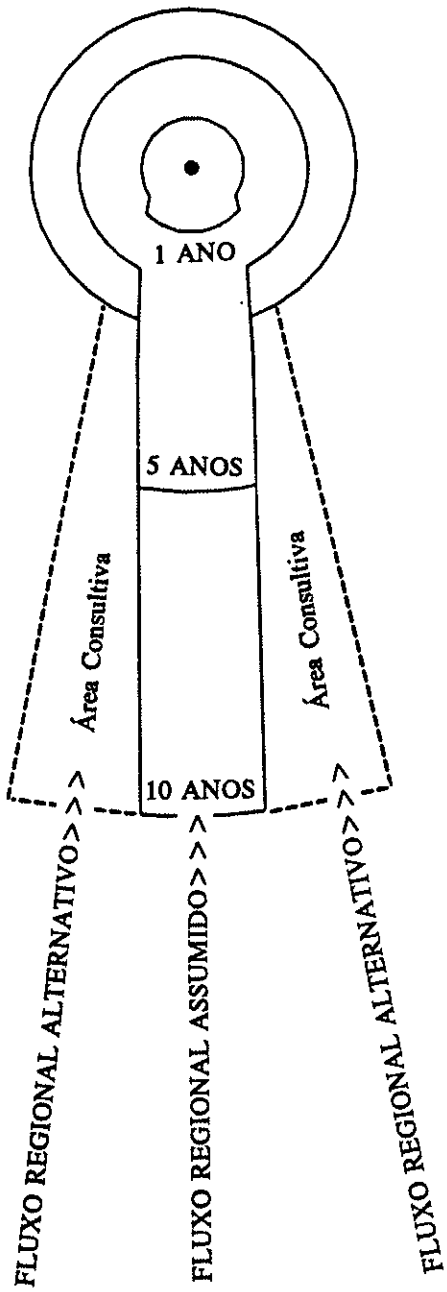
Fonte: New Jersey Geologic Survey, 1988

Figura 25 - APP interina usando um método híbrido: do modelo analítico de fluxo uniforme (MFU) do método analítico e o método de raio fixo calculado (RFC). Exemplo usando poço com TT múltiplos: níveis finais da APP serão calculados de acordo com o PPP de New Jersey (Draft, 1991). Abordagem também denominada "buraco de fechadura" ("key hole").



Fonte: New Jersey Geologic Survey, 1988

Figura 26 - APP interina usando um método híbrido: o modelo analítico de fluxo uniforme (MFU) do método analítico, o método de raio fixo calculdado (FRC) e os principais contornos de fluxo. Exemplo usando poço com TT de 25 anos: níveis finais da APP estarão de acordo com o PPP de New Jersey (Draft, 1991). Abordagem também denominada "buraco de fechadura" ("key hole").



Fonte: Adaptado do New Jersey Geologic Survey, 1990

Figura 27 - APP interina com área consultiva. Exemplo usando poço com TT de 10 anos: níveis finais da APP estarão de acordo com o PPP de New Jersey (NJDEPE, 1991). Abordagem também denominada de "buraco de fechadura" ("key hole").

modelo analítico, o MFU por exemplo, com dados específicos daquele poço. Quando o poço estiver localizado em uma geologia complexa, como em aquíferos cársticos por exemplo, ou sofrer influência significante de poços vizinhos, será exigido o uso de modelos matemáticos numéricos utilizando dados específicos. No caso de poços públicos transientes, que não abastecem comunidades, e cujo potencial de impacto de poluição sobre a saúde humana é pequeno, o método de delineação da APP final usará "formatos simples variados".

7.2.4 MÉTODO DE DELINEAÇÃO DE APP PARA AQÜÍFEROS CONFINADOS EM NEW JERSEY

O método calcula o tempo de trânsito vertical através de uma ou mais camadas confinantes que é igual ou excede o tempo de trânsito escolhido para a APP total (o TT do nível 3). O TT é considerado conservativo porque não inclui o tempo de fluxo através do aquífero até a camada confinante. A APP será a área circular, de 15 metros (50 pés) de raio, em torno de poço, possuída ou controlada pelo dono do poço. Quando o TT através da camada confinante for menor que o TT do nível 3, a APP deve ser delineada usando os mesmos métodos usados para os poços em aquíferos livres. A APP final deve ser delineada com dados específicos, incluindo os efeitos da camada confinante sobre o fluxo da água subterrânea em direção ao poço.

7.2.5 IDENTIFICAÇÃO DE FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇAO

O estado de New Jersey está preparando um inventório completo de áreas de água subterrânea poluída e de fontes de poluição. O PPP em geral reconhece três classes de fontes significantes de poluição:

a)derramamentos ativos ou potenciais regulados pelo NJDEPE

b)derramamentos ativos ou potenciais sujeitos a controles locais

c)poluição sujeitas à autoridades de remediação do NJDEPE

O inventário de fontes de poluição e de APPs delineadas serão armazenados no programa Geographic Information System (GIS). O sistema, que também funciona como banco de dados das coordenadas do poços, armazena qualquer informação distribuída bidimensionalmente em camadas.

7.2.6 APROVAÇÃO DA APP PELO NJDEPE

As APPs interinas só não serão aprovadas pelo NJDEPE caso fique comprovado que a delineação baseou-se em dados impróprios ou inacurados. As APPs finais serão certificadas se o método e os dados para a delineação tiverem sido razoavelmente aplicados. Depois de certificada, uma revisão da APP final somente será considerada pelo NJDEPE se existirem mudanças significativas nos dados (baseadas em novas investigações), ou um método mais acurado for usado para a delineação ou as suposições para a delineação tenham mudado (um poço novo mudando a direção do fluxo da água subterrânea e o gradiente). Isso deve providenciar novas oportunidades para companhias de consultoria que podem questionar a delineação das APPs através do uso de modelos numéricos sofisticados, que podem lidar com a heterogeneidade da geologia.

8. FERRAMENTAS AUXILIARES NA DELINEAÇÃO DE APPs: HIDROGEOLOGIA E MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Pelo menos duas ciências auxiliares serão utilizadas para a definição das zonas que compoem a área a ser protegida, definida através do programa de proteção de poço: a hidrogeologia, e a modelação matemática.

A hidrogeologia deve ser discutida sob o aspecto do comportamento do fluxo da água

subterrânea no aqüífero em que se deseja definir a área de proteção de poço.

8.1 HIDROGEOLOGIA

8.1.1 FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O meio poroso, em que se encontra perfurado o poço municipal a ser protegido, deve ser precisamente descrito dando condições à escolha do critério e do método mais adequados para o delineamento da área de proteção do poço.

A determinação das características hidrodinâmicas desse meio precederia sempre a escolha do critério (ver Tabela 3) e do método (ver Tabela 4) a serem utilizados, a menos que os métodos do raio fixo arbitrário e formatos variáveis simplificados sejam empregados. Isso porque nesses métodos, uma vez que a litologia não é considerada, o formato da área de proteção do poço será sempre o mesmo.

No caso de rochas fraturadas e calcário cárstico, aqüíferos altamente anisotrópicos, requer-se a aplicação de métodos geológicos, geofísicos e de traçadores para o mapeamento hidrogeológico, que determinando divisores de água e contornos de fluxo, possibilitam a delimitação da área a ser protegida em torno do poço. São situações hidrogeológicas mais complexas que envolvem pessoal altamente especializado em mapeamento geológico e geomorfológico (U.S.EPA, 1987b).

Em um aqüífero cristalino o efeito de anisotropia causada pelas fraturas pode ser visto nesse exemplo: quando dois poços distantes apenas 8 metros um do outro não apresentam comunicação hidráulica. Bombeando o primeiro nada acontecerá ao segundo, mas poderá afetar um terceiro a 30 metros de distância. Esses poços que se interagem encontraram a mesma zona de fratura, ou mesma área de influência (Caswell, 1987). Veremos adiante que a área de influência nesses aqüíferos alonga-se segundo a direção preferencial de fraturas, e corresponde à APP se a superfície potenciométrica é plana.

Nos sistemas multiaqüíferos as relações hidrodinâmicas entre as superfícies

potenciométricas determinam o fluxo descendente, sugerindo que a proteção se dê em toda a área de recarga em torno do poço aí perfurado, ou o fluxo ascendente, sendo preciso então proteger-se a zona de recarga do aqüífero confinado, por vezes não imediatamente em torno do poço.

Mais um exemplo do controle da hidrogeologia na delineação da área de proteção de poço ocorre nos aqüíferos não confinados e isotrópicos. A inclinação da superfície potenciométrica nesses aqüíferos determina totalmente a forma da zona que contribui água para o poço.

Convém também citar outros fatores hidrogeológicos que afetam o formato da área de proteção do poço: a presença de lentes geológicas, não homogeneidade quanto à transmissividade, lagoas e rios, entre outros.

8.2 MODELAÇÃO MATEMÁTICA

8.2.1 MODELOS ANALÍTICOS E NUMÉRICOS EM PCs PARA A DELINEAÇÃO DE APPs

Os modelos matemáticos representam um modelo conceitual - no caso as propriedades hidrogeológicas do aqüífero, o poço que ao bombear cria uma ZI e uma ZC, as condições de contorno e as condições iniciais da superfície potenciométrica. Tudo isto é matematicamente descrito usando equações diferenciais parciais de fluxo. A solução para essas equações pode ser analítica ou numérica.- e solucionam as equações que descrevem o comportamento do fluxo da água subterrânea e do transporte de contaminantes.

Os modelos matemáticos analítico e numérico são considerados num PPP para:

. delineação da área de proteção de poço

. simulação do comportamento do fluxo da água subterrânea, e de diferentes fatores e situações hidrogeológicas que afetem a forma e o tamanho da área de proteção de poço

Sob condições heterogêneas, uma delineação acurada da APP vai requerer um modelo numérico, o único entre os modelos capaz de tratar estas condições. Os modelos numéricos são assim, entre os métodos listados na Tabela 4, os que melhor definem a APP, tendo por base critérios (ver Tabela 3) como rebaixamento, contornos de fluxo e tempo de trânsito.Todo o esforço deve ser feito para que a APP delineada represente o mais fielmente possível a forma, tamanho e orientação reais de campo. Se a delineação da APP for convincente, a interdição ou a liberação da instalação dentro dessa área de uma atividade potencialmente poluente será aceita com menos resistência ou sem contestação.

Tanto os modelos numéricos como os analíticos, encontram-se hoje disponíveis em linguagem de computador (programas). Atualmente existem muitos modelos empregados para a definição da APP, quando se trata de problemas bidimensionais, e somente alguns tridimensionais. O International Ground-Water Modeling Center, atualmente em Golden, Colorado, revisou para o Office of Ground-Water Protection 64 modelos - 51 numéricos e 13 analíticos (U.S.EPA, 1988b). O estudo foi encomendado para fazer parte de informação técnica posta à disposição das comunidades interessadas em elaborar um PPP. Alguns destes modelos, e outros que surgiram após esta data, podem ser usados como métodos analíticos e numéricos para mapear critério previamente escolhido, num procedimento de duas etapas (EPA, 1988):

1. um modelo de fluxo gera um campo de carga hidráulica e possivelmente vetores de velocidade (calculados com base na equação de Darcy).
2. um modelo de caminhamento de partículas ou um modelo de transporte delinea a APP com base nas distribuições de cargas hidráulicas [H(x,y)], condutividade hidráulica [$K_x(x,y)$, $K_y(x,y)$] e porosidade efetiva [$n_{ef}(x,y)$].

Dos aspectos sumarizados no relatório desta revisão, a confiabilidade do modelo deve merecer especial atenção na hora da escolha. Desse modo evita-se que os resultados sejam questionados. Sobre a forma e o tamanho da APP calculada, por exemplo, devem pairar o mínimo de ou nenhuma dúvida, para que a interdição da instalação ou do funcionamento dentro desta APP, de uma atividade potencialmente poluente - um posto de gasolina, uma plantação que utilize pesticida, um cemitério, um parque industrial, entre outras -, seja aceita sem contestação.

Escolhido o modelo matemático numérico, divide-se (discretiza-se) o modelo conceitual

em malha de blocos ou em malha de células poligonais (em geral triângulos), que correspondem ao métodos de diferenças finitas e de elementos finitos, respectivamente.

Primeiro é solucionada a equação de fluxo bidimensional, sob estado estacionário (Cleary, 1991):

$$\frac{\partial}{\partial X}\left[T_{xx}\frac{\partial H}{\partial X}\right] + \frac{\partial}{\partial Y}\left[T_{yy}\frac{\partial H}{\partial Y}\right] + \sum_{i=1}^{N} Q_i\,\delta\,(X - X_i)\,\delta\,(Y - Y_i) = -\frac{K'}{b'}(H_o - H) \quad (2)$$

Em cada nó central da malha ou no nó do cruzamento da malha, é gerado um valor de carga hidráulica que servirá para calcular a distribuição de velocidades através da lei de Darcy. Num segundo passo essas velocidades são utilizadas para "seguir partículas" ("particle track") e determinar as direções que as partículas de água seguem.

Podem ser usados dois modelos para cada etapa, ou um só que reúna a equação de fluxo e o caminhamento de partículas (particle tracking).

A definição da APP acontece quando soluciona-se a equação de fluxo (2) para o sistema que encerra um poço ou uma bateria de poços bombeando, e uma zona de captura é delineada através da técnica de caminhamento de partículas (particle tracking). Na técnica de caminhamento de partículas uma ou mais partículas caminhando com a velocidade da água (se retardamento for considerado, a partícula mover-se-á com uma velocidade menor que a água) são "seguidas" (forward tracking) e suas posições, ao final de um intervalo determinado de tempo, podem ser conhecidas. Se essas posições, no caso em torno de um poço, forem unidas através de uma linha, a área por ela delimitada corresponderá à zona de captura. Os modelos matemáticos que usam o caminhamento de partículas podem também "seguir em sentido contrário" (reverse tracking) para prever a posição de onde partiu uma partícula, cuja posição atual é conhecida. Essa técnica é geralmente usada para poços bombeando, quando partículas são liberadas do poço e caminham em sentido contrário ao que a água seguiu para chegar até o poço.

A Figura 28 ilustra quatro APPs delineadas por modelos matemáticos de fluxo associados a modelos de caminhamento de particulas (Anderson and Woessner, 1992).

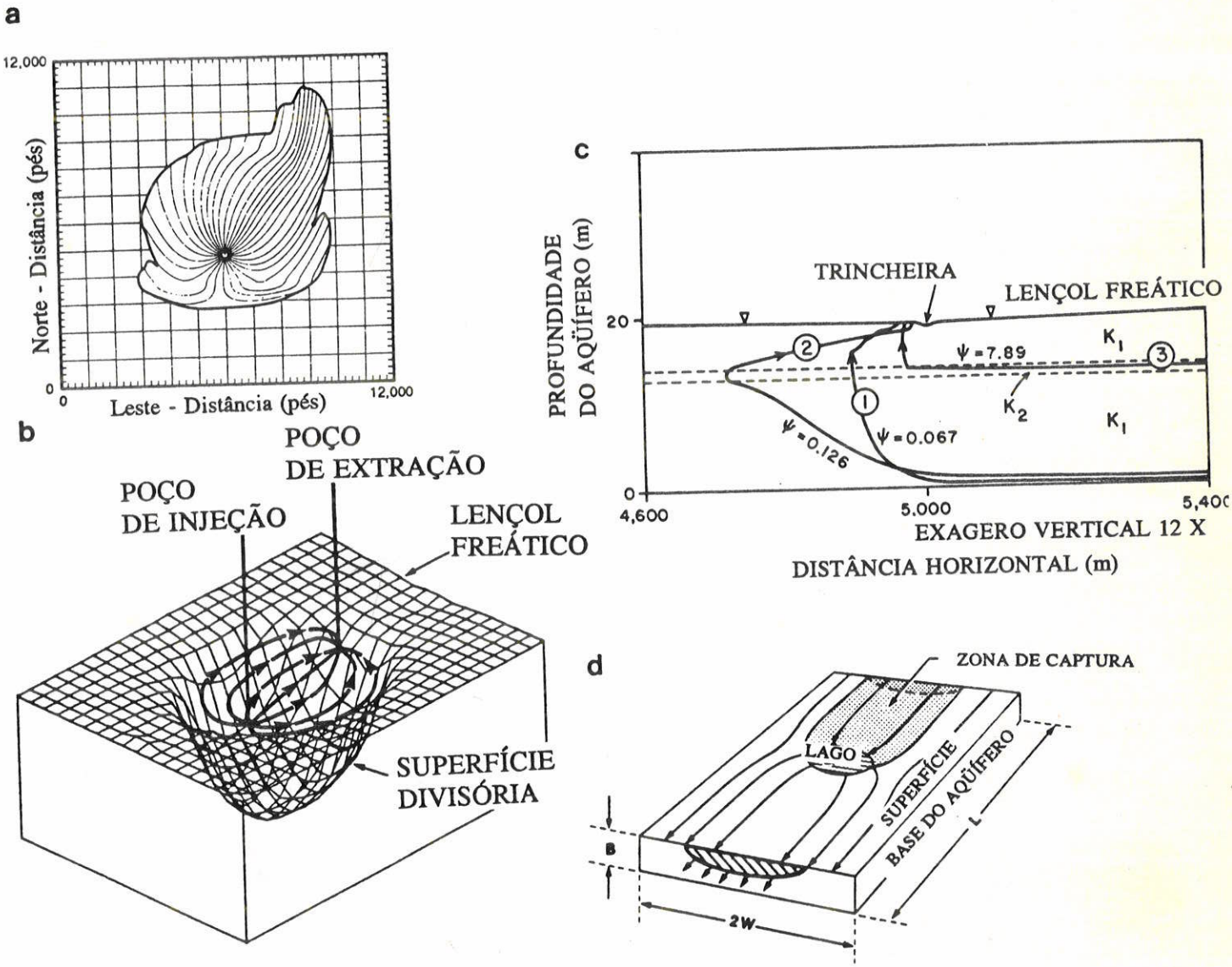


Figura 28 - (a) Zona de captura de 20 anos (aqüífero heterogêneo) calculada através da técnica de caminhamento reverso (reverse pathline) (Shafer, 1987)

(b) Zona de captura para um sistema de injeção-extração (Zheng, 1989)

(c) Três zonas de captura delineadas através da divisão das linhas de fluxo (indicadas pelos números circulados) em torno de um canal de irrigação, para a porção de um aqüífero arenoso no centro de Wisconsin (Zheng et al., 1988b). As linhas de fluxo foram calculadas através da modificação dos dados de entrada do modelo MODFLOW, para produzir funções de fluxo. Ψ é a linha de fluxo dividida, em m^2/d. As três zonas de captura possuem as seguintes características:
(1) $K_1 = K_2$; (2) $K_1/K_2 = 100$; (3) $K_2/K_1 = 100$
Nos três casos a condutividade horizontal é 20 vezes maior do que a vertical.

(d) Zona de captura de um lago (Townley and Davidson, 1988)
(Anderson and Woessner, 1992)

8.2.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA

Os modelos matemáticos analíticos fornecem soluções matemáticas exatas e apresentam a severa restrição de só tratarem aqüíferos homogêneos, ou seja, variações espaciais no valor da condutividade hidráulica, espessura saturada, não podem ser consideradas. Estes modelos podem, no entanto, tratar meios isotrópicos ou anisotrópicos. Os cálculos podem até ser feitos em calculadoras de mão, porque trata-se de equações mais simples, em geral algébricas, que ao modelarem condições idealizadas do aqüífero, exigem em alguns casos pequeno número de dados.

Os métodos analíticos envolvendo somente um critério de cada vez são brevemente descritos e a equação respectiva mais comumente usada é apresentada abaixo:

. métodos analíticos de rebaixamento - a delineação da APP é baseada num valor específico limite do critério rebaixamento

- equação de Theis

. métodos analíticos de tempo de trânsito - a delineação da APP é baseada no tempo de trânsito requerido para que um contaminante atinja o poço bombeando

- equação volumétrica de fluxo

. método analítico de zona de contribuição - a delineação da APP é baseada em cálculos dos limites do contorno da ZC (o ponto de estagnação a jusante do poço e a largura da zona a montante que recarrega o poço)

- equação de fluxo uniforme (como ilustrado na Figura 16)

8.2.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA

A EPA (1987b) recomenda fortemente o uso do método de modelação numérica porque ele descreve o sistema hidrogeológico mais de perto. Tanto para situações simples como complexas, esses modelos podem delinear as APPs com mais acuidade. É preciso lembrar no entanto que, muitas vezes um modelo mais simples, tal como o de raio fixo arbitrário, seja indicado em estágios iniciais de delineação de APP, ou quando não houverem condições de preparo técnico ou financeiro da municipalidade.

Na solução numérica os resultados são aproximados mas as equações podem levar em conta as heterogeneidades do aqüífero, recarga e evapotranspiração não uniforme. Estes modelos matemáticos numéricos, ao descreverem com mais fidelidade a verdadeira geologia heterogênea do aqüífero, são mais poderosos e de uso mais recomendado para a delineação da APP. Podem, por exemplo, modelar praticamente todos os tipos de sistemas hidrogeológicos mais complexos, como aqüíferos não homogêneos e anisotrópicos (na realidade, são esses os tipos de aqüíferos encontrados na natureza).

Algumas das técnicas da solução numérica incluem os métodos de diferenças finitas, elementos finitos e elemento de contorno integral. Nos primeiros dois métodos (os mais utilizados) o aquífero é repartido (discretizado) em um conjunto de malha de blocos ou de elementos, respectivamente.

Ao processar um maior número de dados, solucionando simultaneamente centenas ou milhares de equações, os modelos numéricos requerem o uso de computadores.

Os modelos numéricos podem simular sistemas de fluxo de água subterrânea de estado estacionário ou não estacionário (transiente). Neste último, as condições do sistema variam com o tempo (o rebaixamento variando com o bombeamento de um ou mais poços, por exemplo).

8.2.4 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Condições iniciais e condições de contorno representam informações adicionais, não

contidas nas equações de fluxo e de transporte, necessárias para a obtenção de uma solução única para estas equações. Estas condições devem ser escolhidas de modo que reflitam o mais realisticamente possível as condições encontradas no campo, porque cada conjunto de condições iniciais e de contorno fornece uma solução específica para a distribuição de carga hidráulica e/ou de concentração. De acordo com Anderson and Woessner (1992), as condições de contorno influenciam tremendamente o padrão de fluxo nas simulações de estado estacionário, e nas simulações de estado transiente as soluções são influenciadas quando os efeitos de um estresse (por exemplo, poço bombeando) atinge um contorno onde condições de contorno tenham sido determinadas.

Condições iniciais são valores da variável dependente (carga hidráulica ou concentração) que indicam o estado inicial destas variáveis no momento em a simulação começa, em geral quando t = 0.

$$H = f(x,y,z,0)$$

$$C = f(x,y,z,0)$$

onde x,y,z representam todos os pontos no interior da área simulada, e f é uma função conhecida.

Condições de contorno são informações sobre como o fluxo e o transporte através do meio simulado se comportam ao longo dos contornos do aqüífero. São fornecidos valores para a variável dependente (carga hidráulica ou concentração) ou para a derivada da variável dependente (fluxo da água subterrânea ou de massa contaminante) nos contornos da área em estudo. As condições de contorno podem ser de três tipos:

1º Tipo - também chamada de condição de carga especificada, ou ainda de Dirichlet.

Para carga hidráulica: valores são especificados ao longo de um contorno. Por exemplo,

$$H = f(y,z,t), \qquad \text{para } X = 0$$

Exemplos típicos são corpos de água superficial, como lagos, rios. A representação de um rio, utilizando-se a condição do 1º tipo, deve levar em consideração o gradiente do seu leito, e a carga hidráulica deve variar de acordo (cada nó da malha deve ter um valor que descreva aquele gradiente). Para a representação de lagos e açudes, os nós da malha que os representam têm um valor constante de carga hidráulica.

Para transporte de massa: uma concentração é especificada ao longo de um contorno. Por exemplo,

$$C = f(y,z,t), \qquad \text{para } X = 0$$

Alguns exemplos de condições de contorno do primeiro tipo usadas para adicionar contaminantes a um sistema unidimensional são listados na Tabela 9:

Concentração Constante	Concentração constante	$C(0,t) = C_o$
Adição do tipo pulsante, com concentrações constantes	Concentração específica	$C(0,t) = \begin{cases} C_o, & 0 < t \leq t_o \\ 0, & t > t_o \end{cases}$
Decaimento exponencial com fonte de concentração → 0	Concentração constante	$C(0,t) = C_o e^{-\alpha t}$
Decaimento exponencial com fonte de concentração → C_a	Concentração constante	$C(0,t) = C_a + C_b e^{-\alpha t}$

C_o, C_a, C_b = concentrações constantes variadas

α = constante de decaimento

t_o = tempo em que a concentração muda devido à adição pulsante.

Tabela 9 - Exemplos de algumas condições de contorno do primeiro tipo que são usadas para adicionar contaminantes a um sistema unidimensional (traduzido e modificado de Domenico and Schwartz, 1990)

Quando a carga ou a concentração especificada é constante, a condição é também chamada de carga ou concentração constante. Neste caso, qualquer linha ao longo da qual a carga é constante tem que ser uma eqüipotencial (Domenico and Schwartz, 1990) (Figura 29). A carga especificada no contorno pode também variar linearmente, e neste caso trata-se de uma linha de fluxo, criando uma condição de fluxo constante e igual a zero (Figura 29).

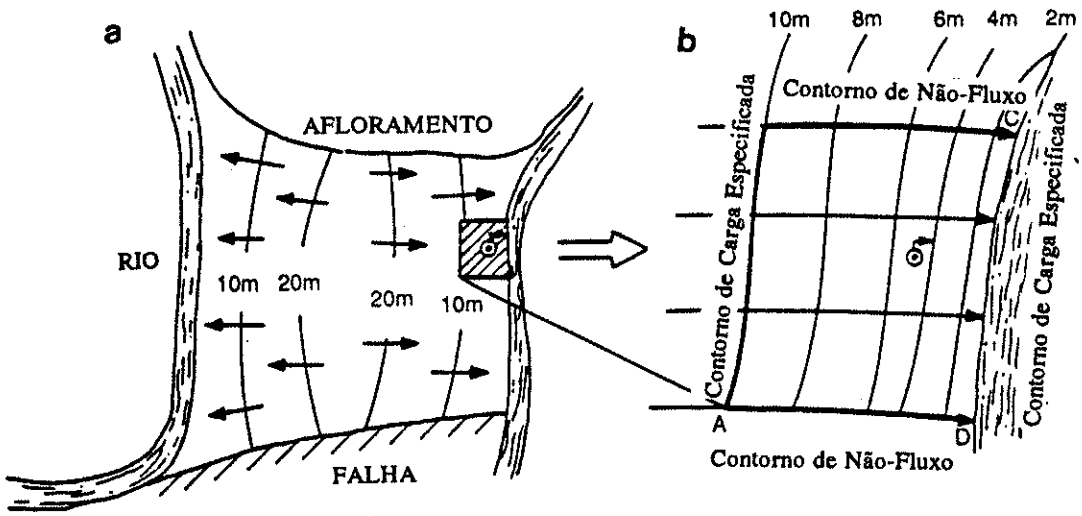


Figura 29 - Mapa potenciométrico de (a) um problema regional, mostrando contornos físicos que incluem dois rios, uma falha impermeável e um afloramento de rocha cristalina; e (b) um problema local mostrando três contornos hidráulicos introduzidos para descrever o fluxo no contorno com a área regional, representados por três condições de contorno especificadas que incluem equipotenciais e linhas de fluxo (modificado de Anderson and Woessner, 1992).

2º Tipo - também chamada de condição de fluxo específico de carga ou de concentração, ou ainda de Neumann.

Para fluxo: a derivada da carga hidráulica (fluxo de água subterrânea) através de um

contorno é especificada. O fluxo é normal (perpendicular) ao contorno.

$$- K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} = f(y,z,t) \ , \quad \text{para } x = 0$$

Se o fluxo da carga hidráulica é zero, a condição de contorno é chamada de não-fluxo. Isto ocorre nos divisores de água subterrânea e nos contornos impermeáveis. Nos modelos de diferenças finitas a condição de contorno de fluxo especificado é simulada através do uso de poços de injeção e de bombeamento para injetar ou extrair água a uma taxa específica (Anderson and Woessner, 1992). O modelo Flowpath (Franz and Guiguer), de diferenças finitas utiliza recarga areal ou drenança (Figura 30) para definir a condição de fluxo através de contorno.

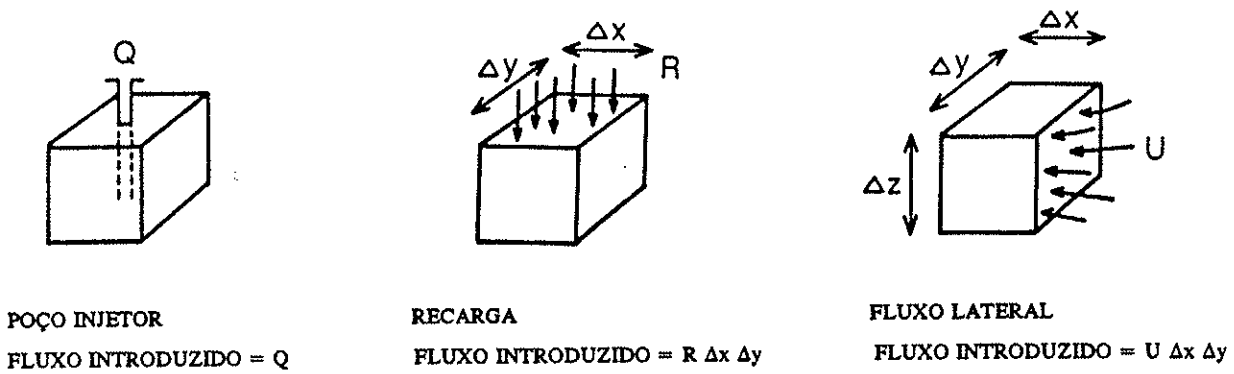


Figura 30 - Representação de fluxos: volumes de água são introduzidos ou extraídos dos blocos utilizando-se poços (Q), recarga areal (R Δx Δy) ou drenança (U Δx Δy) (traduzido e modificado de Anderson and Woessner, 1992)

Para transporte de massa: a derivada da concentração (fluxo de massa) através de um contorno é especificada.

$$- D_{xx}^{*} \frac{\partial C}{\partial x} = f(y,z,t) \ , \quad \text{para } x = 0$$

sendo D_{xx}^{*} o coeficiente de difusão molecular para o meio poroso.

O fluxo de massa normalmente depende da difusão molecular (Cleary, 1991), quando advecção não está envolvida.

3º Tipo: também chamada de semi-permeável, dependente de carga hidráulica ou de concentração. É também chamada Cauchy ou mista, porque combina os tipos Dirichlet e Neumann.

Para fluxo: o fluxo de água subterrânea através de um contorno depende do valor da diferença entre as duas cargas hidráulicas aí especificadas:

$$- K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{K'}{b'} (H_o - H)$$

onde:

K_{zz} = condutividade hidráulica no aqüífero

$\frac{\partial H}{\partial z}$ = gradiente na direção z

K' = condutividade hidráulica da camada semi-permeável

b' = espessura da camada semi-permeável

K'/b' = coeficiente de drenança, definido por Hantush (1964).

H_o = valor da carga hidráulica dentro do corpo de água

A expressão do lado esquerdo da igualdade representa a condição de contorno do 2º tipo, e a do lado direito, a condição de contorno do 1º tipo.

Esta condição de contorno é utilizada para simular situações de drenança através de uma camada semi-permeável entre dois aqüíferos; ou a drenança entre um rio, um lago ou um reservatório e um aqüífero, através do leito colmatado deste rio, lago ou reservatório. O valor da drenança através da camada semi-permeável é diretamente proporcional à diferença entre as

cargas hidráulicas existentes no rio, lago ou reservatório, e a carga hidráulica existente no aqüífero.

Este tipo de condição de contorno permite descrever a dinâmica do fluxo entre dois corpos de água (superficial/subterrânea, rio/aqüífero, ou subterrânea/subterrânea, aqüífero/aqüífero), quando a relação potenciométrica entre os corpos muda, mudando o sentido do fluxo da água através da camada semi-permeável. A Figura 31 ilustra o caso de poço bombeando em aqüífero confinado, em que o sentido ascendente do fluxo da água subterrânea torna-se descendente quando a superfície potenciométrica do aqüífero confinado é rebaixada pelo bombeamento. A área superficial de fluxo descendente deve ser estabelecida como a APP, protegendo o poço das substâncias que entrando esta área cheguem eventualmente ao aqüífero confinado.

No caso de rios, para um mesmo coeficiente de drenança caracterizando o seu leito, o fluxo será do aqüífero para o rio quando este for efluente, e neste caso $H_o > H$, ou o fluxo acontecerá do rio para o aqüífero quando tratar-se de rio influente, e $H_o < H$. Se a superfície potenciométrica entre os dois corpos de água for a mesma, $H_o = H$, a condição de contorno se reduz à condição de contorno do 2° tipo. Para o caso de poços bombeando próximo a rios, e beneficiando-se de recarga induzida, deve-se dar atenção especial à qualidade da água do rio.

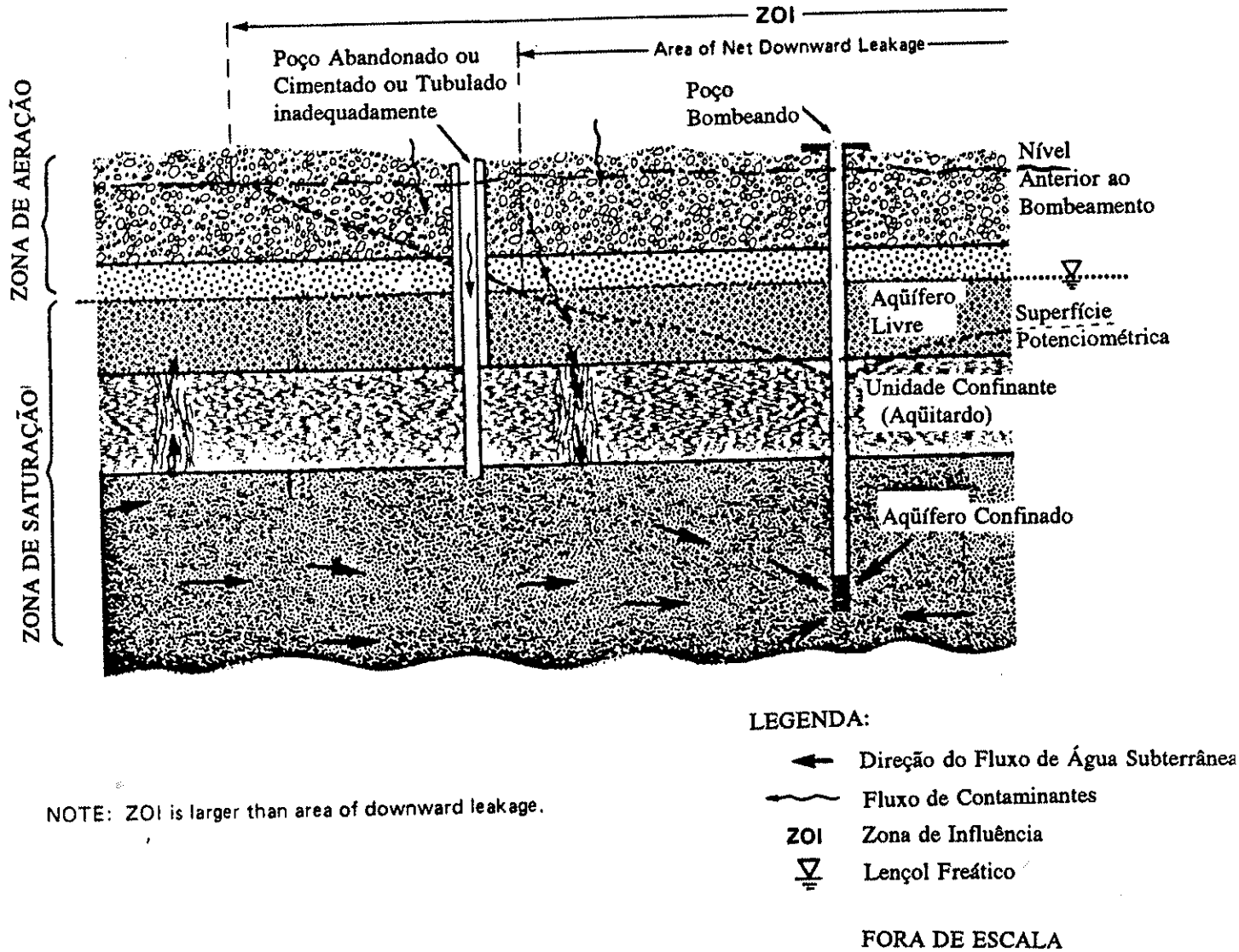


Figura 31 - Mudança na relação das superfícies potenciométricas faz o fluxo ascendente tornar-se descendente, determinando a APP (U.S.EPA, 1988)

Para transporte: o fluxo de massa que atravessa o contorno depende da dispersão (contanto que a maior causa da dispersão, a advecção, exista) e da advecção.

$$- D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + V_x C = V_x C_o \qquad \text{para } x = 0$$

onde:

C = concentração da fonte dentro do contorno

C_o = concentração da fonte fora do contorno

D_{xx} = coeficiente de dispersão

Este tipo de condição de contorno é também chamado de Robin, Cauchy ou misto. Como a maioria dos problemas de poluição de água subterrânea envolve transporte advectivo e dispersivo, esta é a mais acurada descrição do fluxo de massa que atravessa um contorno (Cleary, 1991).

8.2.5 ESTADOS ESTACIONÁRIO E TRANSIENTE

Os métodos numéricos e os analíticos podem simular problemas de estado estacionário ou transiente; este último requer também a discretização do tempo.

Um estudo realizado por Franz et al. (1989) concluiu que longos estados transientes são refletidos no formato e tamanho da APP, enquanto estados transientes mais curtos são desprezíveis. Apesar disso, os modelos matemáticos mais usados na delineação de APPs, tais como FLOWPATH (Thomas e Guiguer, 1990), GWPATH (Schafer, 1987b) e WHPA (Blandford & Huyakorn, 1990) somente simulam condições de estado estacionário. Uma versão transiente do modelo FLOWPATH (Franz and Guiguer, 1990) está sendo preparada. O modelo analítico de fluxo, QUICKFLOW (Rumbaugh, 1991) simula estados estacionários e transientes, e permite a investigação do estado transiente sobre a APP (ver Figuras 6 e 7). Nos primeiros momentos do bombeamento do poço a simulação para o estado transiente permite ver a expansão da APP (ZT de 1 ano) (Figura 32(a), (b) e (c)). Observe que as cargas hidráulicas desenvolvem-se muito rapidamente. Isso explica porque em estudos de modelação de contaminação trata-se as equações de fluxo para estado estacionário, mas simula-se transporte de contaminantes para estado transiente.

(a)

(b)

(c)

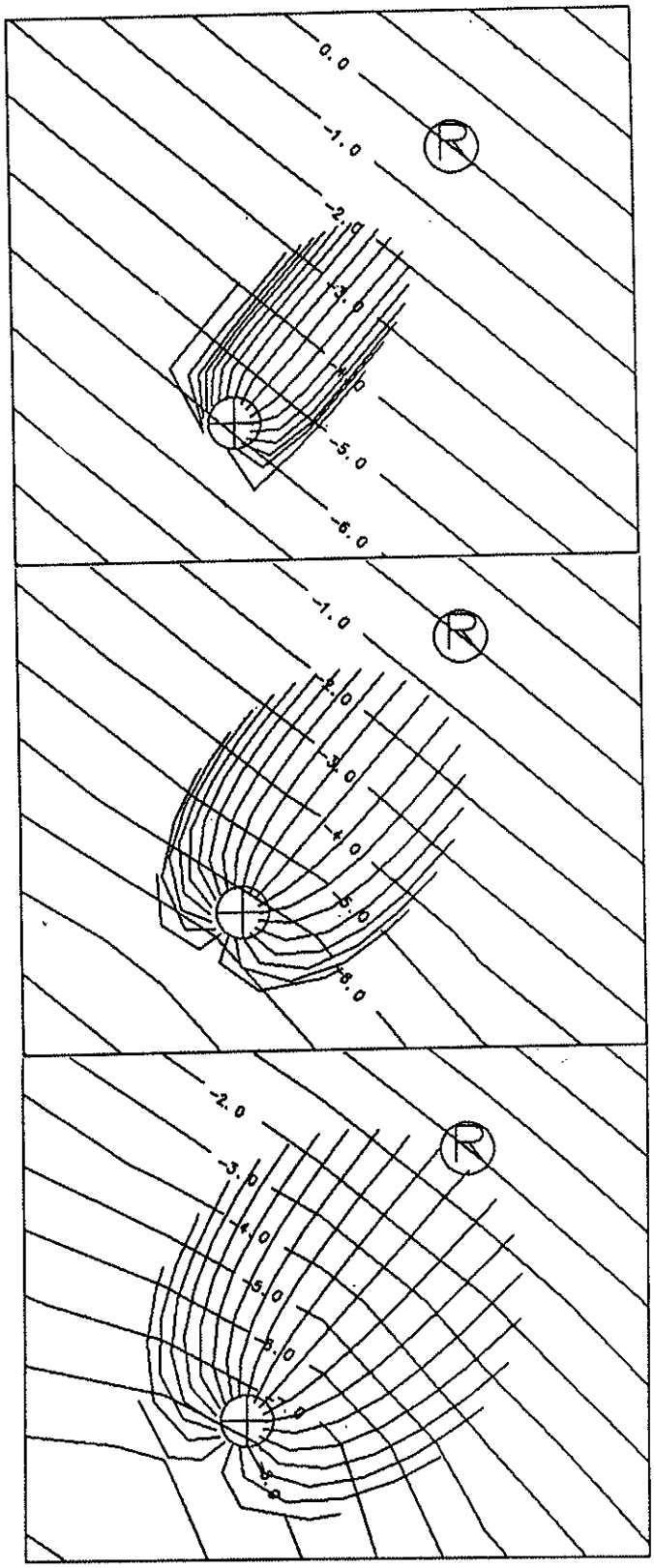


Figura 32 - Expansão da APP (ZT de 1 ano) após o início do bombeamento: 1,44 minutos (a); 14,4 minutos (b); e 144 minutos (c).

9. INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS E ELEMENTOS HIDROGEOLÓGICOS SOBRE A FORMA, TAMANHO E ORIENTAÇÃO DE APPs

Os modelos matemáticos em microcomputadores usados na investigação dos efeitos dos principais parâmetros e elementos hidrogeológicos sobre a forma, tamanho e orientação das APPs são os seguintes:

FLOWPATH (Franz and Guiguer, 1990) - modelo matemático numérico bidimensional de fluxo. A técnica de caminhamento de partículas (particle tracking), que permite a delineação de APPs, incorpora transporte advectivo, termo definido por Anderson and Woessner (1992), e transporte retardado. Trata anisotropia. Utiliza o método de diferenças finitas, permitindo a discretização da área em malha irregular ($\Delta X \neq \Delta Y$) e diferentemente adensada (mais pontos de informação próximo aos poços, para melhor descrever a curvatura da superfície potenciométrica). Os limites de contorno podem ter qualquer formato. As condições de contorno para fluxo podem ser do 1º ou 2º tipo (ver seção 8.2.4). Calcula equipotenciais, rebaixamento, e delinea APPs, superpostos a mapas da área que podem ser importados de programas do tipo Autocad. Foi considerado pelo British Geological Survey, em 1992, o melhor modelo numérico bidimensional de fluxo do mundo para delineação de APPs, escolhido entre cinco outros modelos mundialmente conhecidos nesta categoria.

QUICKFLOW (Rumbaugh, 1991) - modelo matemático analítico bidimensional de fluxo e, através da técnica de caminhamento de partículas (particle tracking) delinear a APP e "seguir" na direção do fluxo ou contrário a este (forward ou reverse "tracking", respectivamente), o caminho tomado por uma fonte de poluição. Incorpora o transporte advectivo, termo definido por Anderson and Woessner (1992). Não trata anisotropia. Mapas da área em estudo, criados em programas do tipo Autocad, podem ser importados para que equipotenciais, rebaixamentos e APPs calculadas sejam aí superpostas. A solução analítica inclui poços e lagoas. As condições

de contorno podem ser do 1º e 2º.

MOC (Konikow and Bredehoeft, 1978) - modelo bidimensional numérico de fluxo e de transporte. As letras MOC são as iniciais de Method of Characteristics (método de características, que é uma técnica de caminhamento de partículas), a técnica utilizada para a solução da equação de transporte. Inclui além de transporte advectivo, transporte dispersivo e retardado, e reações que envolvem decaimento. As condições de contorno para fluxo e para transporte de massa podem ser do 1º ou 2º tipo. O modelo MOC determina que as colunas e as linhas de células que envolvem a área a ser modelada sejam consideradas como do 2º tipo (não fluxo).

9.1 EFEITOS DE GRADIENTE REGIONAL

Uma situação hidrogeológica que ocorre na natureza e que é comum de ser encontrada é o gradiente da superfície potenciométrica ser diferente de zero, tornando esta superfície inclinada e promovendo o movimento da água subterrânea sob condições naturais. O efeito do aumento de gradiente sobre a APP de um poço pode ser esperado quando se observa a equação do modelo analítico de fluxo uniforme (3), que governa o tamanho e a forma da APP (ver também Figura 16):

$$-\frac{Y}{X} = \tan\left(\frac{2\pi Kbi}{Q} Y\right) \qquad (3)$$

A partir desta equação observa-se que as distâncias do poço até o ponto de estagnação a jusante, X_L, e a distância do poço até os limites de contorno, Y_L, equações (4) e (5) respectivamente, são inversamente proporcionais ao gradiente (assumindo K, b e Q são constantes) e à transmissividade (assumindo que Q e i são constantes):

$$X_L = -\frac{Q}{2\pi Kbi} \quad (4) \qquad\qquad Y_L = \pm\frac{Q}{2Kbi} \quad (5)$$

É esperado, então, que quanto maior o gradiente i, menores os valores de X_L e Y_L, e mais alongadas as APPs calculadas.

Uma equação similar para determinar o ponto de estagnação e a largura da região de onde um poço bombea sua água tem sido usada desde o final do século passado (King and Slichter, 1899). Com base nesta equação foram calculadas e manualmente desenhadas linhas de fluxo regionais e zonas de contribuição de poços. A abordagem, no entanto, não era a proteção do poço (Cleary and Cleary, 1990).

Tomemos o caso em que o gradiente regional (i_o) é nulo. Quando um poço está bombeando em aqüífero isotrópico de superfície potenciométrica completamente horizontal, o cone de depressão que se forma é completamente circular. A situação é difícil de ser encontrada na natureza, mas não impossível. Utilizando o modelo numérico FLOWPATH (Franz & Guiguer, 1990), foram feitas simulações com um poço bombeando em aqüífero homogêneo e isotrópico ($K_x = K_y = 10$ m/d $= 1{,}16 \times 10^{-2}$ cm/s). Somente os gradientes (comumente com o símbolo "i" ou $\Delta H/\Delta X$) foram mudados em cada uma das duas situações simuladas. Os resultados obtidos em cada uma das situações são os seguintes:

<u>1a. situação</u>	<u>Resultado da simulação</u>
$i_o = 0{,}000006$	a zona de captura de 100 anos é virtualmente circular (Figura 33)
<u>2a. situação</u>	a zona de captura de 100 anos alonga-se na direção do fluxo
$i = 100i_o$	regional (Figura 34)

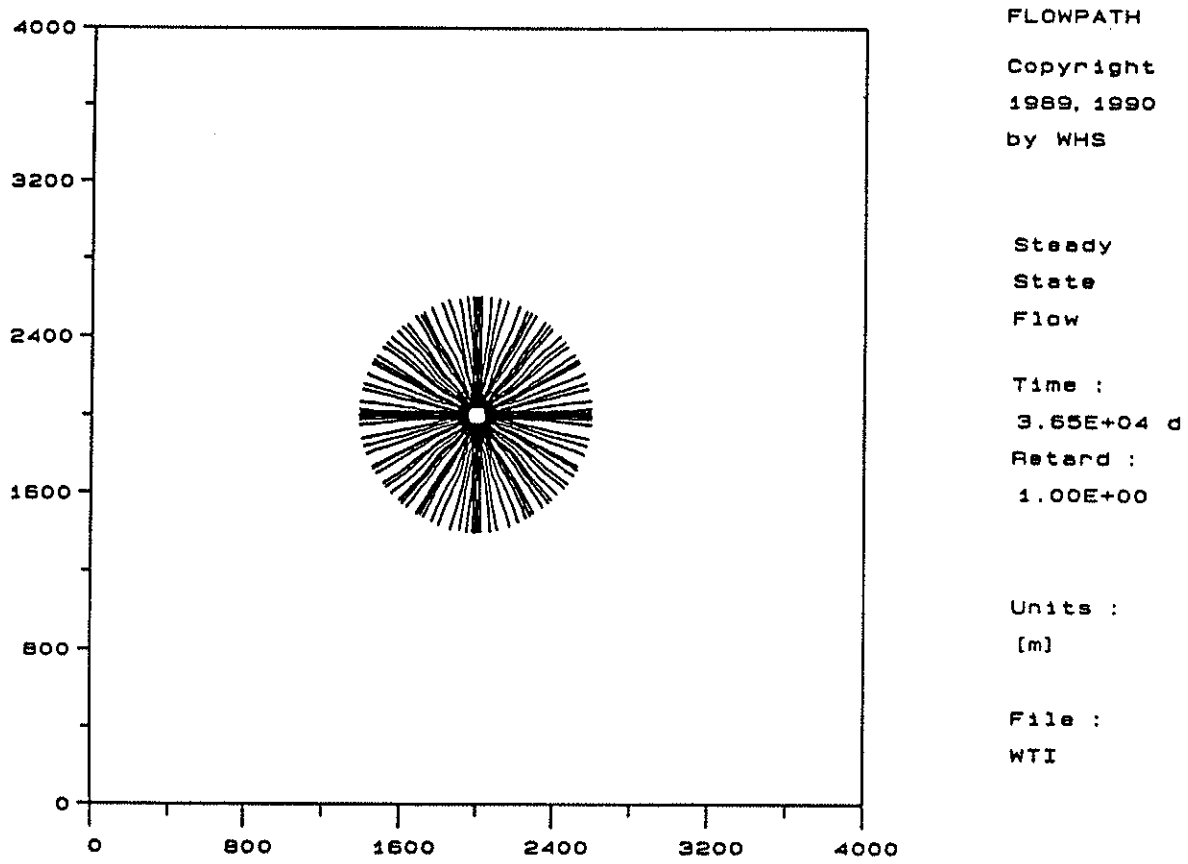


Figura 33 - APP quando i_o = 0,000006 (Cleary and Cleary, 1990)

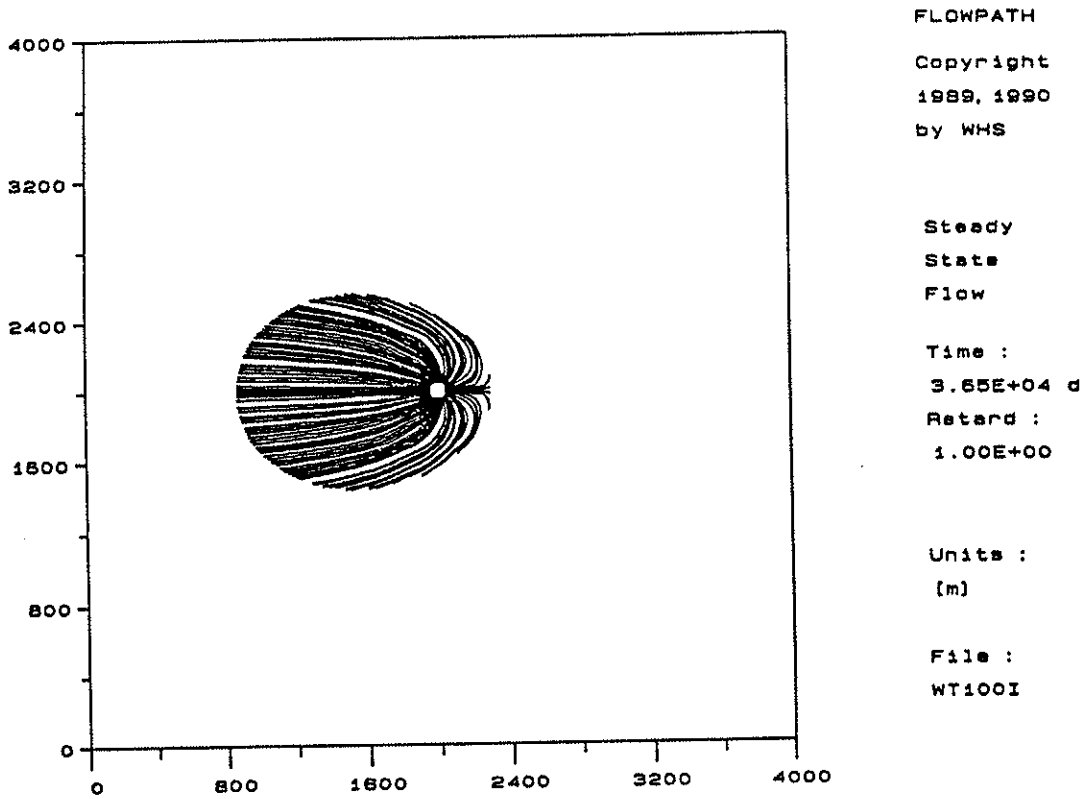


Figura 34 - APP quando i = $100i_o$ (Cleary and Cleary, 1990)

9.2 EFEITO DE TRANSMISSIVIDADE

O efeito sobre a APP do aumento da transmissividade T em cem vezes, todos os outros parâmetros mantidos constantes e iguais aos do exemplo anterior (9.1), é idêntico ao aumento do gradiente em cem vezes. O tamanho e a forma da APP delineada neste caso (Figura 35) são os mesmos da Figura 34 porque ambos os termos (i e T) são inversamente proporcionais à distância do poço até o ponto de estagnação da APP, X_L, e à distância que representa a largura da APP, Y_L.

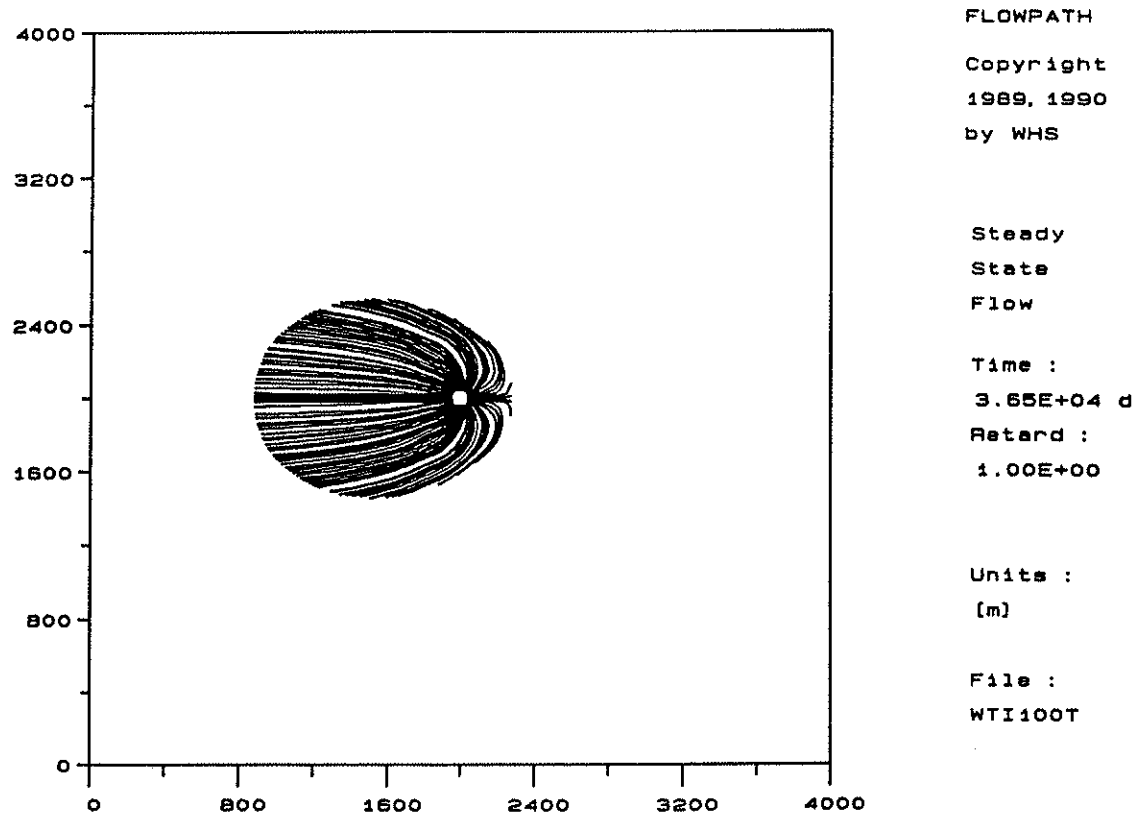


Figura 35 - APP quando T = 100 T_o e i = 0,00006 (Cleary and Cleary, 1990)

9.3 EFEITOS DE ANISOTROPIA (CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA)

A Figura 36 (Cleary, 1989), mostra uma região entre dois rios que apresenta linhas equipotenciais perfeitamente eqüidistantes e paralelas. Há duas direções de fluxo: uma isotrópica, em que a água toma a direção perpendicular (como a maioria dos hidrogeológos traçaria) às linhas equipotenciais, fazendo um ângulo de 65° com o eixo dos x; e uma anisotrópica, em que as linhas de fluxo se desenvolvem formando um ângulo de 23,2° com o eixo do X.

A discretização em malha de diferenças finitas (técnica empregada para dividir a região que se deseja simular com modelo numérico), é mostrado na Figura 37. Observe que com esta discretização o ângulo de direção isotrópica em vez de ser de 65° como na Figura 36, é de 45°. Há um poço residencial localizado entre os dois rios. A taxa de bombeamento deste poço é tão pequena que não afeta as linhas equipotenciais. O rio A apresenta uma carga hidráulica média constante de 100 metros e o rio B de 99 metros. As linhas equipotenciais são perfeitamente paralelas e equidistantes. Se a geologia fosse isotrópica, o fluxo de água subterrânea seria perpendicular às linhas equipotenciais, partindo de potencial hidráulico mais elevado (100m) para mais baixo (99m). A geologia porém é anisotrópica ($K_x = 5\ K_y$) e a direção de fluxo real é a indicada. Duas simulações investigam o comportamento da APP sob condições isotrópica e sob anisotrópica.

A primeira simulação considera o aqüífero como isotrópico e o fluxo toma a direção esperada (Figura 38 (a)). Essa Figura mostra também que o formato da APP aproxima-se do círculo (não é totalmente circular porque existe um gradiente de 0,000001). Observe também que a APP atinge a fonte de contaminação quando anisotropia é considerada. Como demonstrado em Cleary (1989), o ângulo anisotrópico em relação ao eixo do x pode ser calculado segundo a fórmula:

$$\theta_{aniso} = \text{ARCTAN}\ (K_r\ \text{TAN}\theta_{iso})$$

Neste caso, θ_{aniso} é igual a 10,77°.

O resultado da simulação seguinte mostra que depois de 500 dias de bombeamento a zona de captura se desenvolve na direção anisotrópica (Figura 38(b)), formando um ângulo de 10,77°

com o eixo X do sistema físico (a relação entre as condutividades hidráulicas é $K_x = 5\ K_y$).

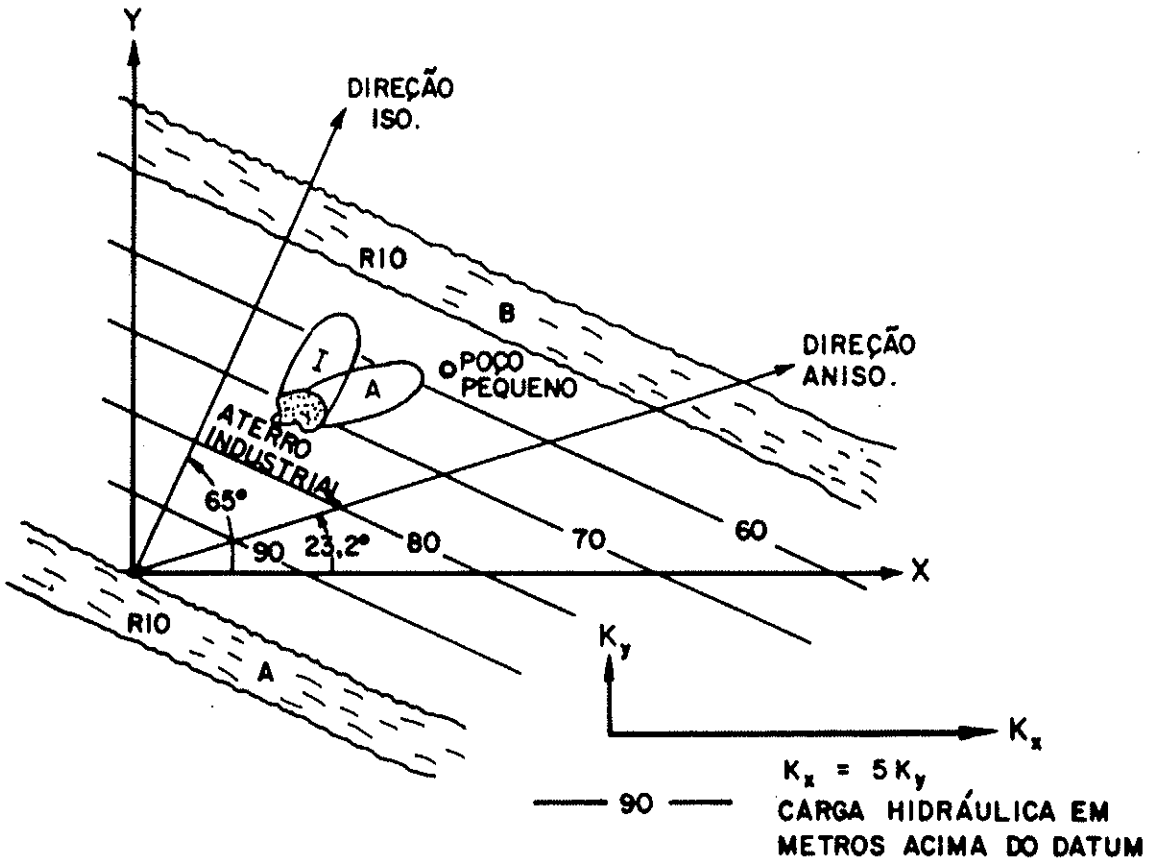


Figura 36 - Modelo conceitual: poço bombeando entre dois rios. Linhas equipotenciais paralelas e eqüidistantes. (Cleary, 1989)

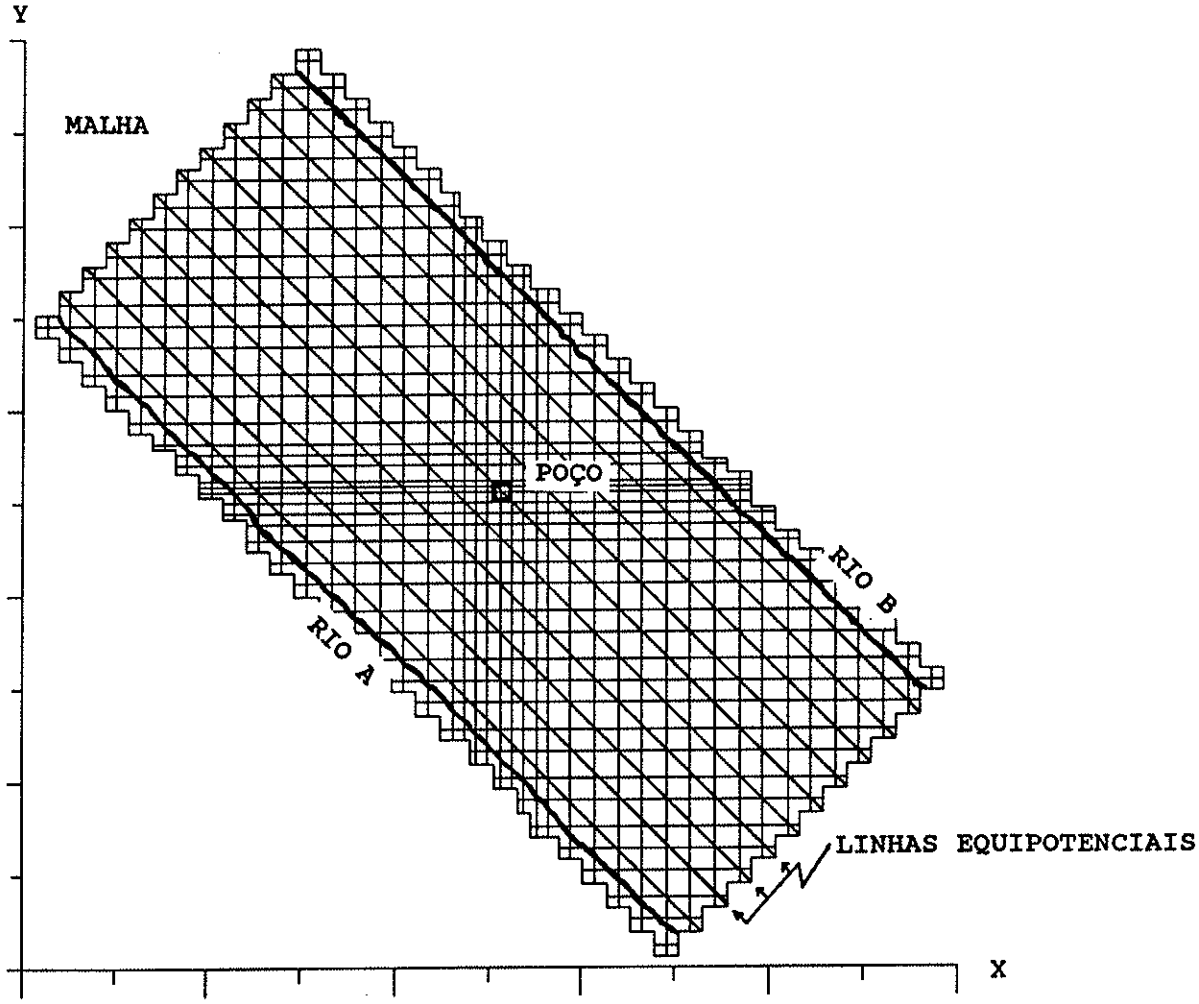


Figura 37 - Discretização (malha de diferenças finitas) do modelo conceitual (traduzido de Cleary and Cleary, 1990)

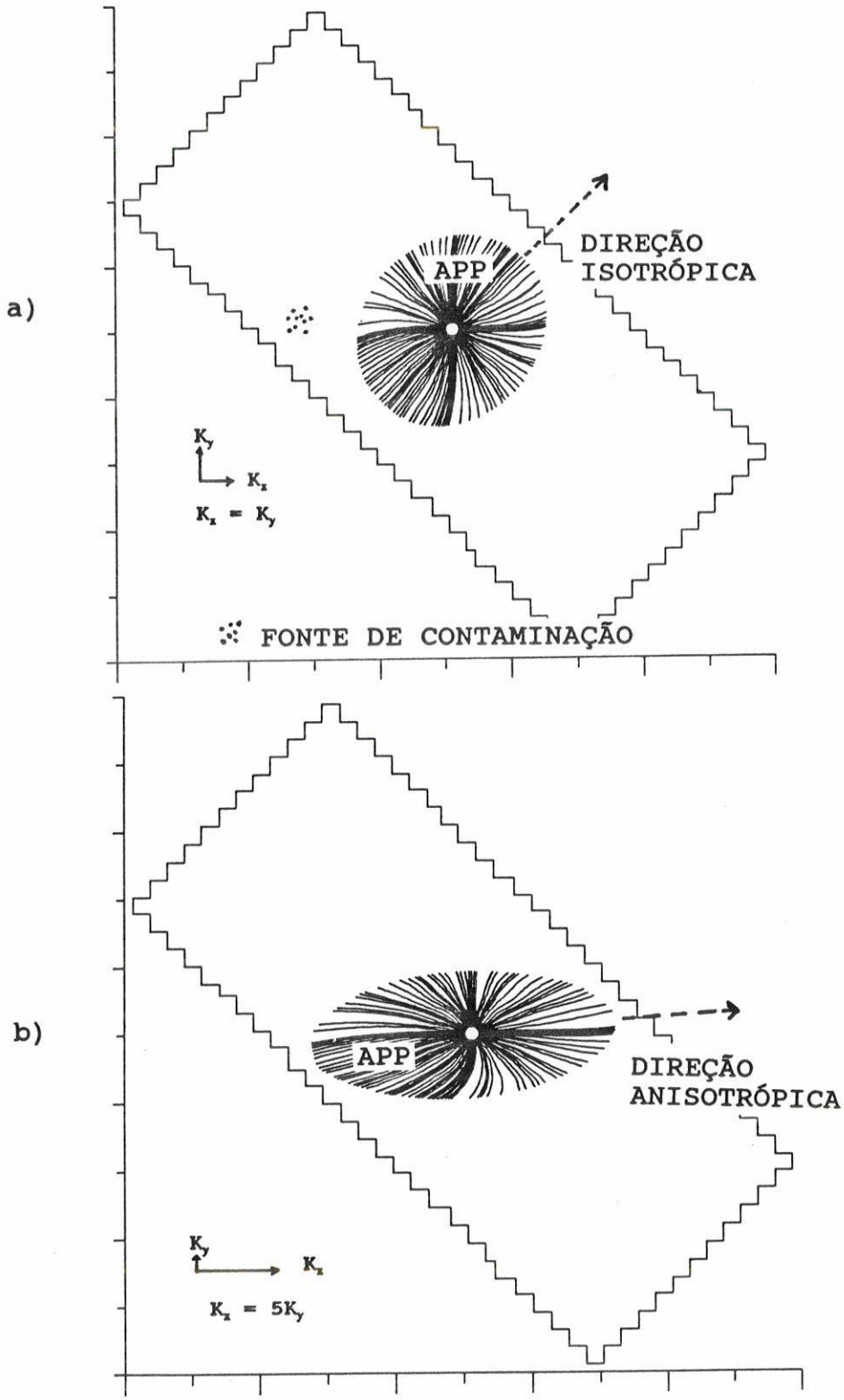


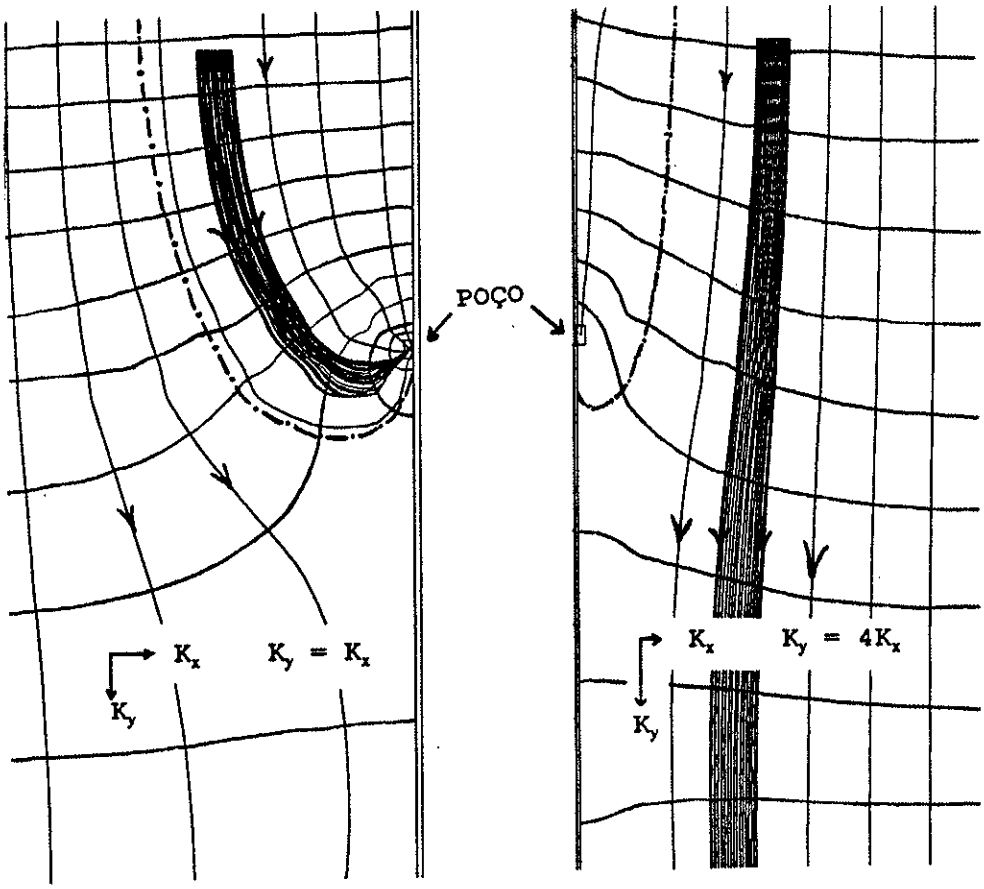
Figura 38 - Desenvolvimento de APP nas direções (a) isotrópica e (b) anisotrópica (traduzido de Cleary and Cleary, 1990)

T 1241

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - USP
Biblioteca

O modelo FLOWPATH (Franz and Guiguer, 1990) reproduz uma figura, originalmente feita por M. Bucks (1977) (como em Cleary, 1992), para mostrar a importância de medidas de campo acuradas da condutividade hidráulica.

O resultado da simulação (Figura 39) mostra os efeitos da anisotropia sobre a APP calculada, ausentes na figura original, e também sobre o caminho seguido pela contaminação quando há uma variação (pode ser um erro de medida de campo!) da relação K_y/K_x de apenas um fator de quatro. A fonte de contaminação, localizada a uma mesma distância do poço nas Figuras 39 (a) e (b), é incluída na APP do meio isotrópico e atinge o poço, contaminando-o. No meio anisotrópico, a fonte de contaminação segue caminho a jusante do poço porque a existência de uma direção preferencial de fluxo (direção y) muda o campo de fluxo e por conseguinte a forma da APP delineada passa a ser mais estreita e não inclui a fonte de contaminação.



(a) ISOTRÓPICO (b) ANISOTRÓPICO

Legenda:

- ⊓ Poço
- ↘ Linhas de fluxo regional
- - - APP
- ▬ Fonte de Contaminação
- ▥ Caminho seguido pela contaminação (técnica de "seguimento" ("forward tracking") de partículas

Figura 39 - APP e caminho seguido pela contaminação sob condições (a) isotrópicas e (b) anisotrópicas (traduzido de Cleary and Cleary, 1990)

9.4 EFEITO DE RECARGA INDUZIDA DE RIO

Comumente, uma cidade desenvolvida em torno de um rio aproveita este elemento hidrogeológico para induzir suas águas até o poço municipal, situado às suas margens. A recarga induzida do rio garante um abastecimento de água à cidade menos sujeito às oscilações sazonais.

Foi utilizado o modelo matemático da U.S.EPA (Blandford and Huyakorn, 1989) para a delineação das APPs de 5 anos de dois poços (Figura 40) bombeando 1000 m^3/dia em aqüífero homogêneo e isotrópico, sob estado estacionário. O rio está localizado no contorno inferior da área simulada. As linhas de fluxo regionais (aquelas com setas) indicam o caminho que a água subterrânea segue dentro da área simulada.

O efeito que esta situação exerce sobre a APP calculada pode ser observado pelos resultados obtidos da simulação (Figura 40). O poço 1, localizado a 200 metros do rio, captura água tanto do aqüífero como do rio, como mostrado pelas linhas de fluxo que compõem a APP de cinco anos. O poço 2, mais distante do rio (500 metros), retira toda a água bombeada somente do aqüífero. No caso do poço 1 a qualidade da água do rio também deve ser observada e protegida, já que contribui para o total da água extraída e nem sempre o tempo de trânsito entre o rio e o poço, e, principalmente, a diluição na APP (pela água que não é induzida do rio), garantem suficiente redução das concentrações dos contaminantes presentes na água do rio.

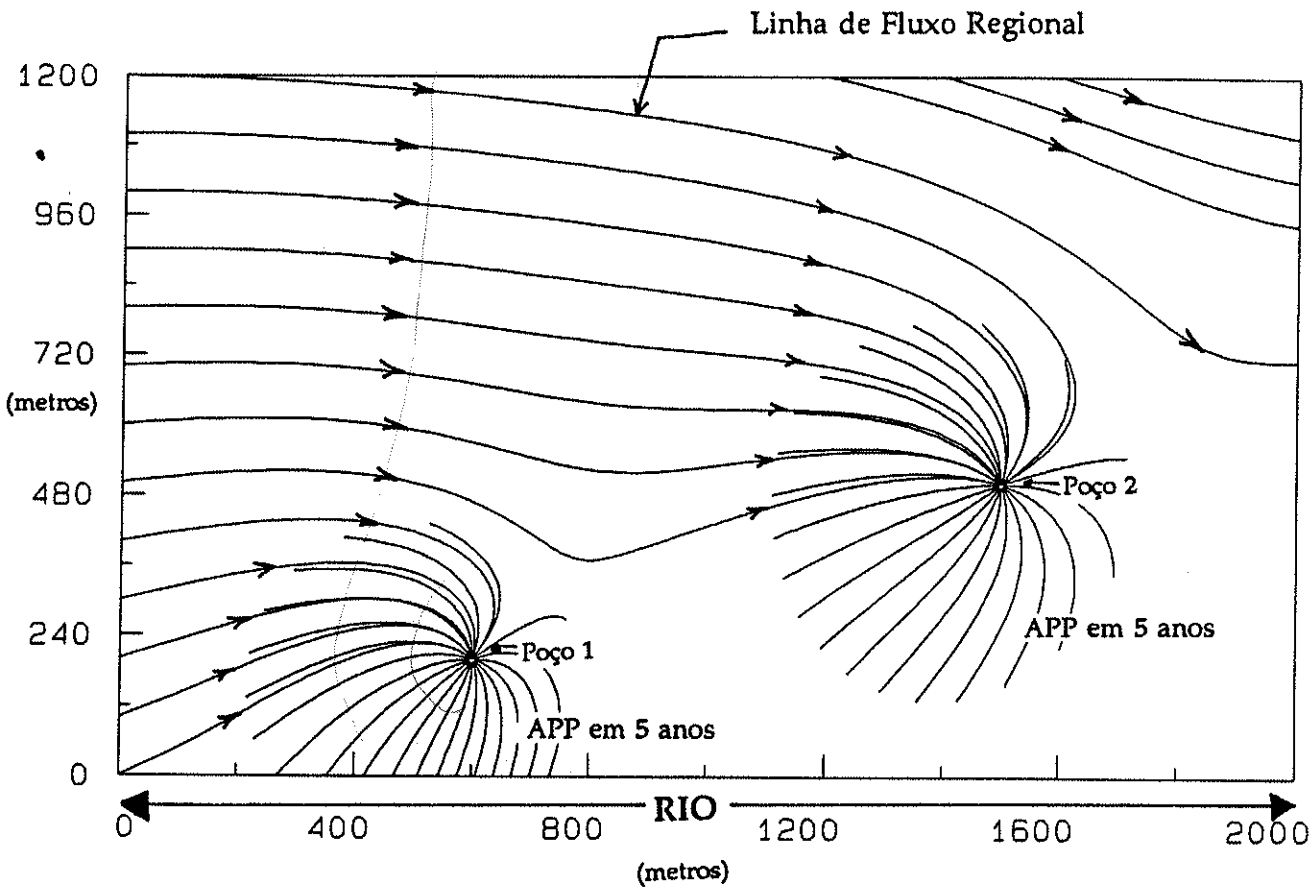


Figura 40 - Dois poços bombeando próximo a um rio, com poço 1 recebendo recarga induzida do rio.

9.5 EFEITO DE ZONA DE FALHAMENTO

Uma zona de falha ocorre ao longo da direção NE-SW, no centro de uma área onde deseja-se delinear a APP do poço aí bombeando. As condições heterogêneas (Figura 41), criadas

pela presença da zona de falha, exigem o uso de um modelo numérico. Foi escolhido para este caso o modelo matemático de fluxo, com técnica de caminhamento de partículas (particle tracking) disponível para a delineação de APPs, linhas de fluxo regional e "seguimento" ("forward tracking") de contaminação, FLOWPATH (Franz and Guiguer, 1990). A surpreendente forma irregular da APP resultante (Figura 42) só pode ser estimada quando os importantes efeitos de geologia heterogênea são levados em consideração. A simulação permite também indicar quais as fontes de contaminação em torno do poço que são incluídas na APP (FC1 e FC3) e ameaçam o poço.

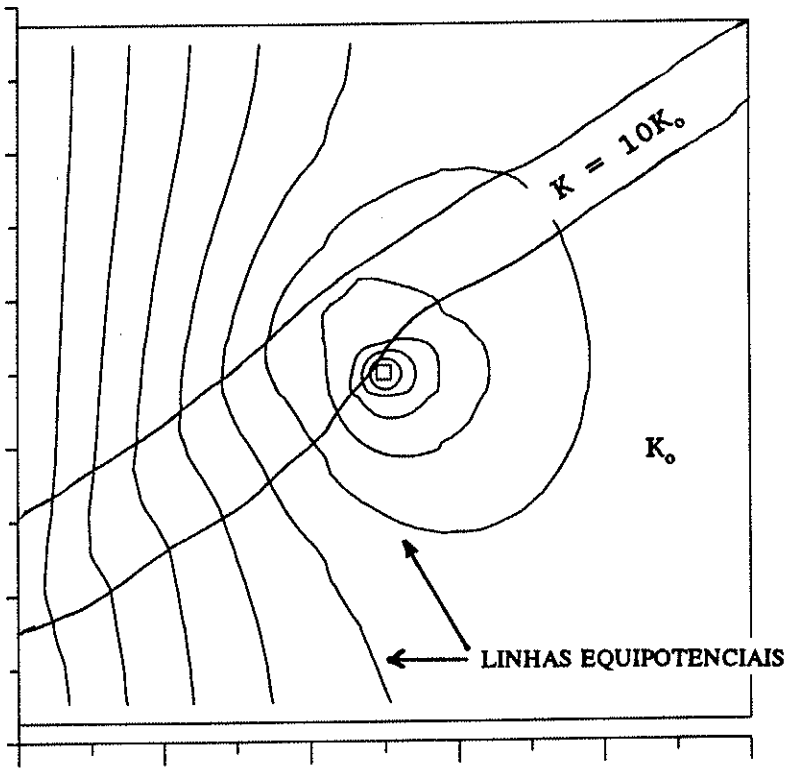


Figura 41 - Zona de falhamento cria uma área de heterogeneidade geológica (Cleary and Cleary, 1990). Associada ao bombeamento do poço, a heterogeneidade promove a deformação das linhas equipotenciais.

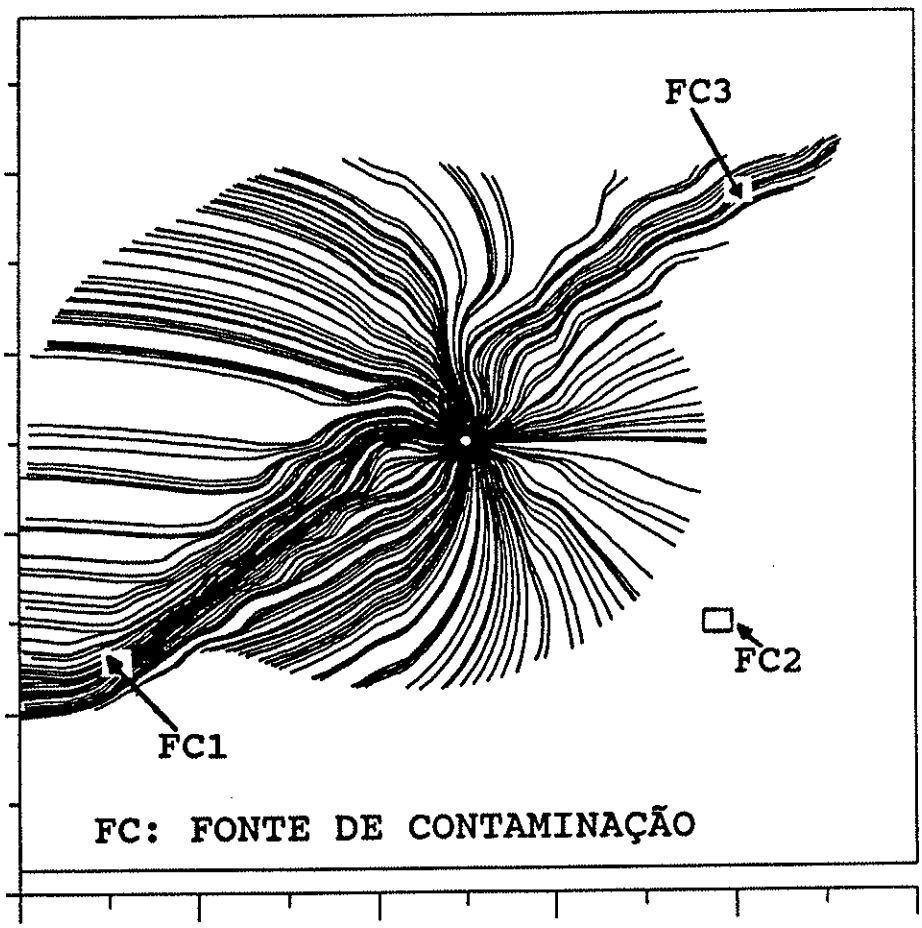


Figura 42 - Surpreendente forma irregular da APP devido ao efeito de um falhamento (traduzido de Cleary and Cleary, 1990)

9.6 EFEITO DE POROSIDADE EFETIVA

Como sugerido pelas emendas ao SDWA, de 1986, cada estado procura desenvolver o seu PPP, visando à proteção de seus poços municipais. O estado da Flórida sugere em seu PPP que as APPs sejam delineadas levando em consideração o valor da porosidade efetiva. Este parâmetro é o que apresenta o maior grau de incerteza, porque é o mais difícil de ser medido no campo (Roadcap and Bair, 1990). A distribuição da porosidade efetiva numa área pode ser bastante heterogênea, dificultando a defesa da APP caso somente um valor seja escolhido para representar a área, como é o caso quando o método de delineação de APP escolhido não é o numérico de fluxo e de transporte.

A simulação realizada através do modelo QUICKFLOW (Rumbaugh, 1991), permitiu investigar os efeitos na APP da utilização de um valor de porosidade efetiva duas vezes maior que outra. Sabe-se de antemão que o tamanho da APP está relacionada à porosidade efetiva através da equação (8), deduzida a partir da substituição da equação da velocidade real da água subterrânea (6) e na equação da distância percorrida pela água subterrânea durante um determinado tempo t (7):

$$V_{real} = \frac{K}{n_{ef}} i \qquad (6) \qquad\qquad X = Vt \qquad (7)$$

$$X = \frac{K}{n_{ef}} it \qquad (8)$$

Pode-se concluir que quanto menor o valor da porosidade efetiva usada para os cálculos, maior será a velocidade da água subterrânea desenvolvida no meio poroso e maior a APP delineada, porque n_{ef} é inversamente proporcional à distância percorrida pela água. A dificuldade em determinar-se a porosidade efetiva de um terreno é que a medida envolve excluir os poros

em que a água encontra-se imóvel. No estado de Wisconsin a litologia de till glacial apresenta porosidade de 20%, mas a porosidade efetiva que deve ser empregada para os cálculos de APP é de apenas 4%. Isto significa que a APP calculada é 5 vezes maior do que se a porosidade deste material altamente poroso fosse ser considerada.

A Figura 43 mostra as equipotenciais desenvolvidas após o bombeamento do poço que se deseja proteger. Note os dois círculos na região NE da área, representando lagoas. A Figura 44 mostra a APP delineada quando a porosidade efetiva é de 0,4; compare-a à APP mostrada na Figura 45, quando a porosidade efetiva é de 0,2. Como esperado, a APP da segunda simulação é maior porque a porosidade é a metade.

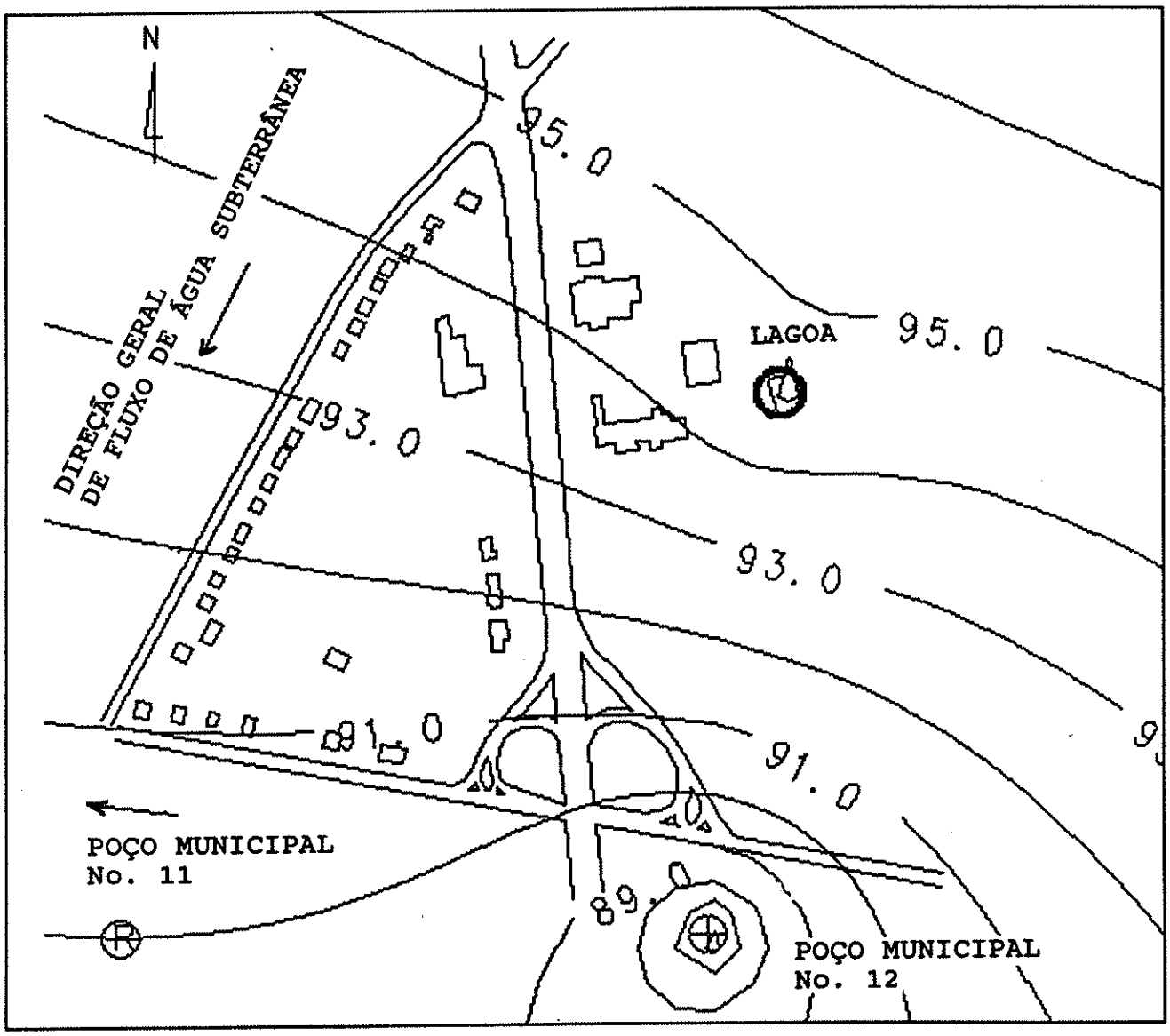


Figura 43 - Equipotenciais desenvolvidas pelo poço municipal no.12.

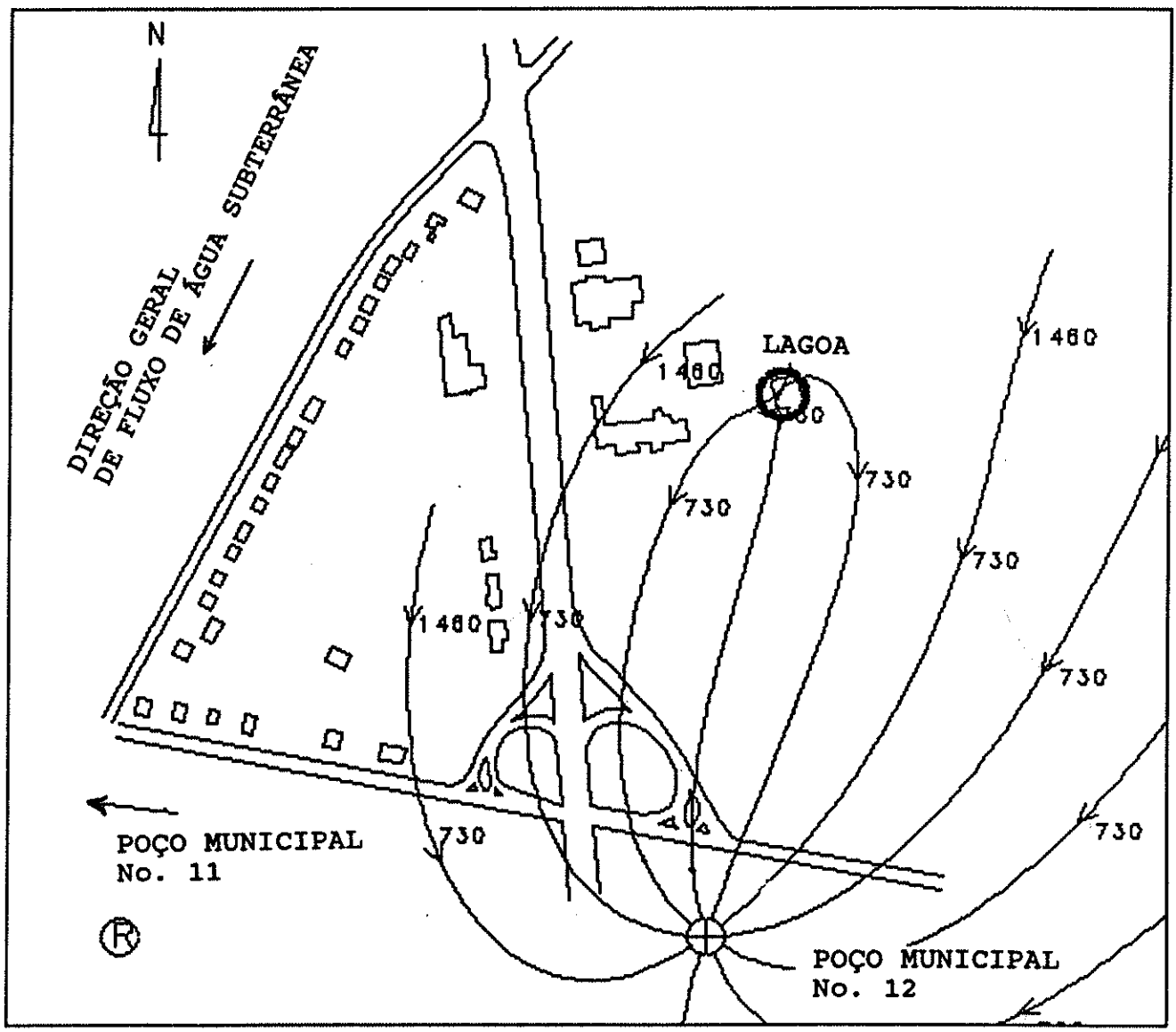


Figura 44 - APP de 5 anos quando n_{ef} = 0,4. O intervalo entre as setas é de 2 anos.

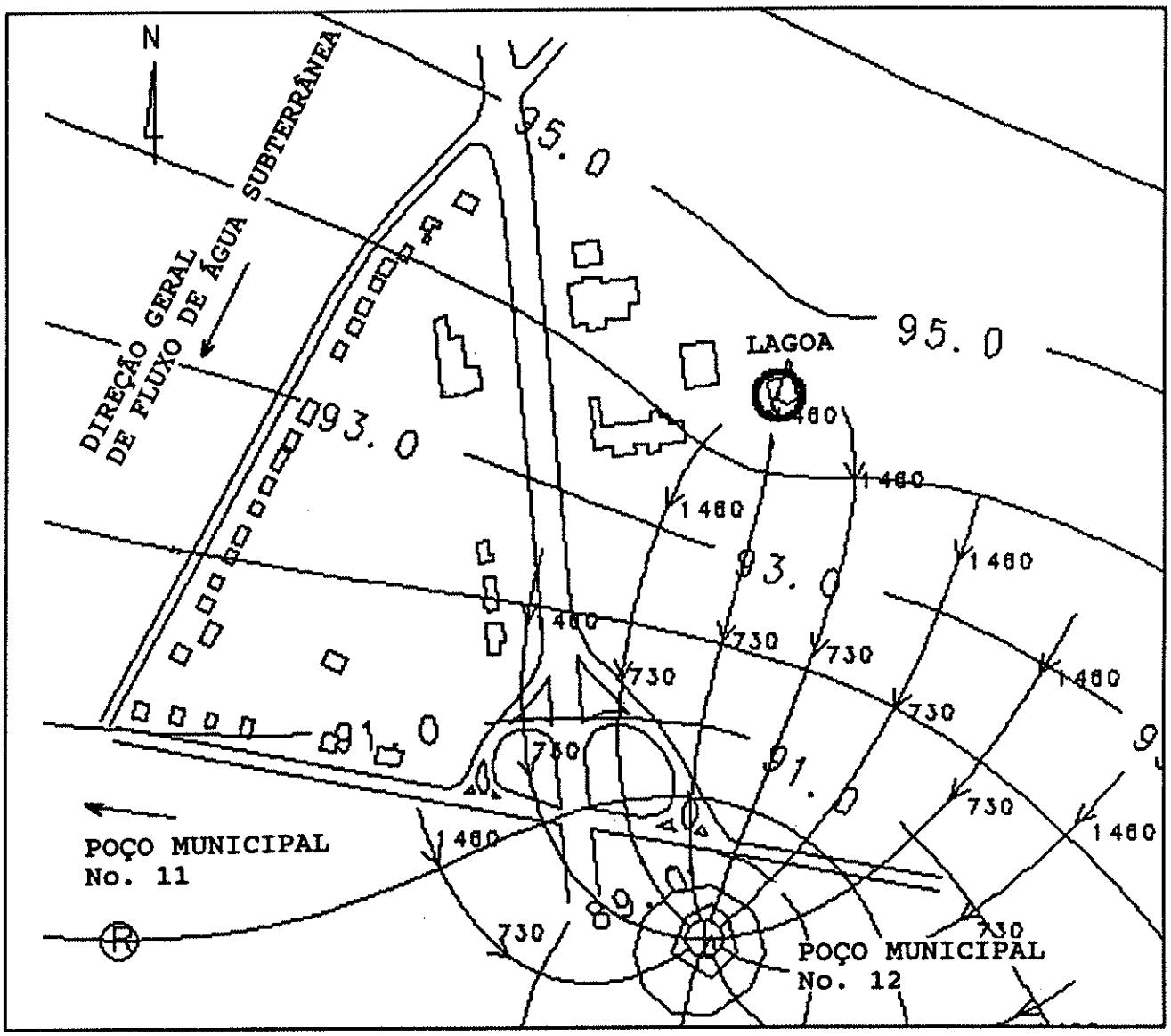


Figura 45 - APP de 5 anos quando a n_{ef} = 0,2. O intervalo entre as setas é de 2 anos.

PARTE II - INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DE HETEROGENEIDADE GEOLÓGICAS, E DE PROCESSOS ATENUANTES DE TRANSPORTE NO TEMPO E NOS ESQUEMAS DE REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS

10. REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS

Ocorrida a poluição, a escolha de um plano de ação remediadora deverá levar em conta as características do poluente, do aqüífero, da fauna e da flora, do uso das terras vizinhas e do clima da área em questão (ver Tabela 10 para mais detalhes).

RESÍDUO	SUBSUPERFÍCIE
Quantidade	Permeabilidade
Composição	Profundidade até a água subterrânea
Concentração	Profundidade até o embasamento
Toxicidade	Direção e taxa do fluxo da água subterrânea
Biodegradabilidade	Pontos de descarga ou recarga da água subterrânea
Persistência	
Combustão	RECEPTORES
Reatividade	Populações dentro e fora da área em questão
Corrosividade	Vida animal
Radioatividade	Habitates críticos
Infectabilidade	Áreas de brejo
Solubilidade	
Volatilidade	USO DAS ÁREAS ADJACENTES
Densidade	Fontes de resíduos a montante
Tratabilidade	Usos da superfície e da água subterrânea a jusante
	Usos residenciais, industriais e comerciais
SUPERFÍCIE	
Área e profundidade da fonte	CLIMA
Limites de propriedade	Temperatura
Tipo de solo e permeabilidade	Precipitação
Topografia	Velocidades preferenciais de vento
Vegetação	
Águas de superfície adjacentes	

Tabela 10 - Características da área a ser protegida que afetam um projeto remediador (traduzido de U.S.EPA, 1985)

Se a fonte de poluição for tratada in situ, as tecnologias mais usadas são: escavação/incineração, capeamento e muros de barreiras, extração a vácuo de gases na zona não saturada, e bio-remediação.

Se a água subterrânea for tratada in situ a tecnologia mais utilizada no momento é: bombeamento e tratamento. O tratamento para águas subterrâneas poluídas por compostos orgânicos voláteis consiste de torres de aeração, relativamente baratas de serem construídas e

operadas, e sistemas um pouco mais caros de carvão ativado. Tratando-se de compostos orgânicos não voláteis as opções de tratamento são: tratamento biológico, adsorção por carbono ativado e oxidação por luz ultravioleta associada à peróxido de hidrogênio (Giggy & Swett, 1989).

De acordo com Domenico e Schwartz (1990), o U.S. Office of Technology Assessment (OTA, 1984) sugere quatro alternativas principais para a correção de um problema de contaminação:

(1) contenção dos contaminantes no próprio local - a contenção pode ser feita através de:

- paredes impermeáveis (slurry walls)
- paredes subterrâneas de aço (sheet pile)
- paredes de injeção de mistura de cimento, bentonita, silicato ou lignocromo (grounting)
- geomembranas
- coberturas selantes (surface seals)
- drenagem superficial (surface drainage)
- controle hidrodinâmico (hydrodynamic control)

(2) remoção dos contaminantes do solo

- bombeamento
- sistemas de intercepção
- ventilação do solo
- excavação

(3) tratamento dos contaminantes in situ

- degradação biológica
- degradação química

(4) atenuação do possível perigo através de controles institucionais - ações alternativas de gerenciamento

- limita ou interrompe o uso do aquífero
- desenvolver ponto alternativo de suprimento de água
- comprar água de suprimento alternativo
- remover a fonte de contaminação
- monitorar
- notificar a população sobre a contaminação
- aceitar o aumento de risco

10.1 REMEDIAÇÃO POR BOMBEAMENTO

Uma das técnicas mais utilizadas na remoção da contaminação do aqüífero utiliza poços bombeando ou drenos. O esquema de remediação, denominado bombeamento e tratamento (pump and treat), envolve um ou mais poços de extração, combinados ou não a poços de injeção. O volume de água subterrânea retirado pelo bombeamento é tratado e reinjetado no aqüífero ou despejado em corpos de água superficiais (lagoas ou rios). A reinjeção da água tratada a montante do ponto de extração apresenta a vantagem de aumentar o gradiente do local e conseqüentemente a velocidade com que a água subterrânea pode ser extraída, além de "lavar" contaminantes que possam estar na zona vadosa (Mercer, Skipp and Giffin, 1989).

O esquema de remediação conta ainda com poços de monitoramento, para acompanhamento do efeito do esquema na concentração da pluma de contaminantes. Podem ainda ser combinadas técnicas de contenção, para limitar o volume de água a ser bombeada, e de tratamento in situ para redução do tempo de remediação e aumento da eficácia do esquema.

Os objetivos do esquema de bombeamento e tratamento são:

(1) controle hidrodinâmico da pluma de contaminação

(2) remediação da qualidade da água subterrânea

Vários tipos de áreas adequam-se a aplicações de esquemas de bombeamento e tratamento, incluindo casos que envolvem vazamento de tanques de gasolina, diesel e alcool, nos postos revendedores destes produtos.

No estado da Flórida, cerca de dois terços das 10.000 áreas poluídas por hidrocarbonetos de petróleo operam esquemas de remediação deste tipo. Através do Department of Environmental Regulation (DER), os proprietários destas áreas beneficiaram-se do programa Early Detection Incentive (EDI), nos dois anos em que o cadastramento funcionou (1986 a 1988). O State Underground Petroleum Environmental Response Act (SUPER Act) de 1986 criou o Inland Protection Trust Fund para pagar pela remediação das áreas cadastradas, ou

reembolsar os custos da remediação pagos pelo proprietário. Em 1989 foi criado o seguro chamado Petroleum Liability Insurance and Restoration Program (PLIRP), cobrindo em até 1.000.000 de dólares os custos de remediação. A lei mais recente, de 1990, criou o Abandon Tank Restoration Program (ATRP), e conta até o momento com cerca de 2000 aplicações para reembolso dos custos de remediação de suas áreas. O estado procura através das leis e programas incentivar os proprietários e operadores de locais que lidam com hidrocarbonetos de petróleo a serem responsáveis pelo custo da remediação.

O custo médio de um programa de remediação por bombeamento e tratamento para um posto revendedor de gasolina varia entre 1.000 a 6.000 dólares por mês, para operação e manutenção, com custos iniciais para o projeto e para equipamentos que podem custar tanto quanto 140.000 dólares (exemplo de um posto de gasolina na Califórnia ((American Petroleum Institute, 1990)). Os altos custos envolvidos no programa exigem que determine-se o tempo de remediação. O American Petroleum Institute (1991) desenvolveu um modelo estatístico para avaliar dados iniciais de concentração, como os dados mostrados na curva da Figura 46, obtidos no campo. Estes dados são típicos de milhares de esquemas de remediação nos Estados Unidos. A grande maioria destes casos se comportam como a Figura 46, com um declínio em concentração nos primeiros meses seguido por um período longo onde a concentração assintoticamente se aproxima de um valor constante que não necessariamente é zero. Esta faixa de chamada de período de condição assintótica. Quando iniciar-se estes longos períodos, o esquema de remediação deve ser reavaliado, e técnicas alternativas para o bombeamento e tratamento devem ser discutidos. O relatório adverte, porém, que mesmo nos casos em que o sistema não mostrar-se efetivo quanto à remediação do aqüífero, o bombeamento pode continuar sendo necessário para a contenção da pluma.

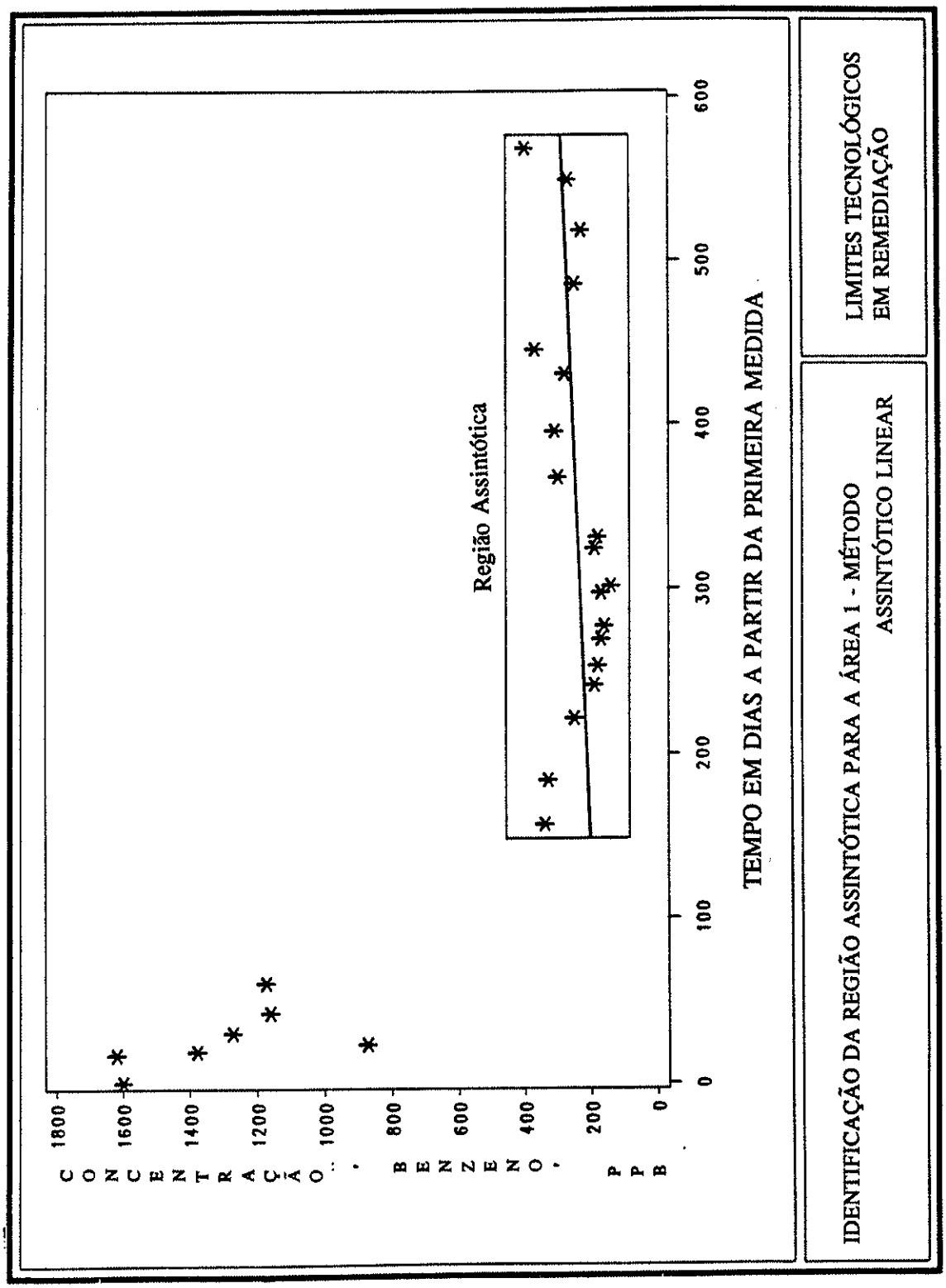


Figura 46 - Curva de chegada de benzeno, utilizando dados de campo, mostrando a região de condição assintótica (American Petroleum Institute, 1991).

10.1 FONTES ANTROPOGÊNICAS POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO DE POÇOS

Os PPPs têm por finalidade, além da delimitação das APPs, regular o controle de fontes de poluição aí instaladas que possam ameaçar essas áreas. Uma das primeiras providências para o sucesso de um PPP refere-se ao inventário das fontes de poluição. A Tabela 11 (Cleary & Cleary, 1988) exemplifica o cadastro das fontes potenciais de poluição encontradas na cidade de Novo Horizonte (cidade do interior do estado de São Paulo), elaborado com a permissão da Prefeitura desta cidade, a partir da lista de contribuintes de ICM.

A etapa seguinte providencia a classificação dessas fontes de acordo com, por exemplo, as categorias listadas na Tabela 12. E, por fim, devem ser estabelecidos e incluídos no Programa e Proteção de Poços, os regulamentos controladores e fiscalizadores à essas fontes de poluição.

TIPOS DE EMPRESAS	QUANTIDADE APROXIMADA EM NOVO HORIZONTE (SP)	MATERIAL POLUENTE PROVAVELMENTE UTILIZADO	LOCAL POLUÍDO
Oficinas mecânicas, consertos de veículos e funilarias	17	óleo, graxa, solventes, tintas, pó, ferrugem	o próprio - derramamentos (*) o lixão - vasilhames descartados (*)
Revelação de fotos	3	reveladores, fixadores	idem (*)
Açougues	16	água de limpeza do local (sangue, restos de carne)	local - escoamento da água de limpeza
Postos de gasolina, lavagem e lubrificação	4	gasolina, alcool, óleo, diesel, graxas, solventes, detergentes	o próprio - águas de escoamento (**) lixão - lixo com detritos coletado do local (**)
Comércio de produtos agrícolas	8	adubos, fertilizantes, agrotóxicos	o próprio - spray sobre culturas lixão - idem (*)
Tipografia, gráfica	2	solventes, tintas para impressão	idem (*)
Indústria de alcool e aguardente de cana de açúcar	6	produto final - vinhoto	o próprio - áreas de sacrifício
Venda de gás liquefeito	2	CO_2, C_4H_{10}	o próprio - poluição do ar quando há escapamento de gás
Marmoaria	1	pó de mármore, ácido	idem (*)
Usina de compostagem	1	compostagem do material recolhido na cidade e peneirado no lixão	o próprio - poluição do ar por emanação de gases lixão - lixiviação por infiltração de água de chuva
Indústria de pesca	1	ácidos, água de limpeza do material e local	idem (**)
Laboratórios de análises	1	solventes, ácidos, remédios, material infectado, vírus, bactérias, coliformes	o lixão - idem (*)
Oficina de consertos de calçados	1	colas de sapateiro	idem (*)
Comércio de cimento	1	pó de cimento	o próprio - poluição do ar pelo pó de cimento
Lavanderia	1	solventes, ácidos, detergentes	idem (*)
Borracharia	4	cola, borracha	idem (*)
Dedetizador autônomo	1	compostos químicos	idem (*)
Cemitério	1	bactérias, vírus	o próprio - lixiviação por infiltração de água de chuva

Tabela 11 - Inventário das empresas de Novo Horizonte - SP e material poluente provavelmente associado às suas atividades (Cleary e Cleary, 1988b)

CATEGORIA I - Fontes projetadas para descarregar substâncias

Percolação subterrânea (p.e., tanques sépticos e fossas)
Poços de Injeção
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não perigosos
- Não Resíduo

Aplicação no solo
- Água residual (p.e., irrigação por spray)
- Subproduto de água residual (p.e., lama)
- Resíduo Perigoso
- Resíduo não Perigoso

CATEGORIA II - Fontes projetadas para armazenar, e/ou dispor de substâncias; descarregamento através de drenanças não planejadas.

Aterros
- Resíduos Perigosos Industriais
- Resíduos não-Perigosos Industriais
- Aterro Municipal

Lixões, incluindo disposição ilegal
Disposição de Resíduos Residenciais (local)
Lagoas Superficiais
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não Perigosos

Rejeito de Resíduos
Pilhas de Resíduos
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não Perigosos

Pilhas de Não Resíduos
Cemitérios
Sepultamento de Animais
Tanques de armazenamento acima da superfície
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não Perigosos
- Não Resíduos

Tanques de armazenamento subterrâneos
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não Perigosos
- Não Resíduos

Depósitos
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não Perigosos
- Não Resíduos

Áreas Abertas de Incineração
Áreas de Explosão
Áreas de disposição de material radioativo

CATEGORIA III - Fontes projetadas para reter substâncias durante transporte ou transmissão

Tubulação
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não Perigosos
- Não Resíduos

Transporte de Materiais e Operações de Transferência
- Resíduos Perigosos
- Resíduos não Perigosos
- Não Resíduos

CATEGORIA IV - Fontes liberando substâncias como uma conseqüência de outras atividades planejadas

Práticas de Irrigação
Aplicações de Pesticida
Aplicações de Fertilizantes
Operações envolvendo animais em estábulos
Aplicações de sal para descongelamento de gelo
Escoamento Urbano
Percolação de Poluentes Atmosféricos
Mineração e Lixiviação de Minas
- Mineração de superfície
- Mineração de subsuperfície

CATEGORIA V - Fontes que providenciam conduto ou induzem descarga através de padrões alterados de fluxo

Poços de Extração
- Poços de Óleo (e gás)
- Poços geotermais e de recuperação de calor
- Poços de Suprimento de Água

Outros Poços (Não Resíduos)
- Poços de Monitoramento
- Poços de exploração

Excavação de Construção

CATEGORIA VI - Fontes de ocorrência naturais em que a descarga é criada ou exacerbada pela atividade humana

Interações de Água Subterrânea-Superficial
Percolação Natural
Intrusão de Água Salgada/Água Salobra (ou intrusão de outra água natural de baixa qualidade)

Tabela 12 - Classificação de fontes de contaminação de água subterrânea (traduzido e modificado de Daggett, 1989)

De acordo com o guia de delineação de APPs (U.S.EPA, 1987b) o mapeamento das fontes de poluição identificadas dentro da área de proteção de poço tem duas finalidades:

. ***garantir que a distância da fonte até o poço permita que o tempo de trânsito garanta uma atenuação geoquímica (biodegradação, absorção entre outros) dentro de um valor limite para a sua presença.***

. ***em caso de contaminação permitir que a fonte poluidora seja identificada tanto pelo tipo de contaminante como pelo caminho percorrido.***

A natureza dos contaminantes, as características do solo onde se dá o fluxo de água subterrânea e outros fatores determinam o grau de contaminação provável da água ao sair do poço. É importante conhecê-los bem, pois a partir dessa informação a comunidade pode decidir sobre o tipo de regulamento controlador e fiscalizador a ser imposto às fontes de poluição.

Fontes de contaminação de água subterrânea podem variar desde tanques com vazamentos, lagoas industriais, aterros, e derramamentos até fontes menos óbvias, como químicos no solo, dissolvendo apartir de porções de fases líquidas não aquosas (nonaqueous phase liquids - NAPLs), ou químicos sendo liberados do solo (Mercer et al., 1990).

Os contaminantes estão classificados em diferentes grupos: radioativos, térmicos, compostos e elementos químicos inorgânicos e orgânicos, bactérias e vírus. A persistência, a mobilidade e a toxicidade desses contaminantes dentro da zona de captura do poço a ser protegido determinam o perigo que impõem à qualidade da água servida à comunidade.

A delineação da ÁPP tem o objetivo de proteger os poços ou campos de poços de três categorias gerais de ameaças (EPA, 1988):

. introdução direta de contaminantes nas imediações da área de poço

. contaminantes microbianos (especialmente bactéria e vírus que podem estar presentes mesmo depois de tratamento feito no poço)

. contaminantes químicos (químicos tóxicos que são persistentes e podem percorrer longas distâncias antes de serem adsorvidos pelo meio da subsuperfície, transformados em

químicos menos nocivos, diluídos para concentrações não nocivas ou atenuados de alguma outra maneira para concentrações não nocivas)

10.2 MODELAÇÃO MATEMÁTICA NA REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS

Hoje em dia, praticamente qualquer esquema de remediação é primeiramente testado através do uso de modelos matemáticos em computadores. Os resultados dessas simulações podem mostrar o impacto, a longo prazo, do esquema sobre o aqüífero; e podem evitar que esquemas inadequados sejam executados, causando prejuízo financeiro e algumas vezes comprometendo mais ainda o aqüífero poluído. A importância, tipos e alcance dos modelos matemáticos são discutidos na seção 6.2.

O modelo numérico bidimensional de transporte de fluxo, MOC, tem sido também extensivamente empregado na simulação de esquemas de remediação (El-Kadi, 1988; Ferreira, 1988), quando pode-se simular diferentes locais e taxas de bombeamento antes de optar-se pelo esquema definitivo.

Para os casos que envolvem problemas em três dimensões e deseja-se simular esquemas de remediação através de um modelo de transporte, é sugerido o uso em que associam-se dois modelos: o modelo de fluxo do USGS, Modflow (McDonald & Harbaugh, 1988) para a geração de um campo de velocidades e o modelo bidimensional de transporte do USGS, MOC (Konikow & Bredehoeft,1978) para a fase de delineação. Segundo Findikakis e Findikaki, 1989, para os casos em que a transmissividade for constante e as substâncias poluentes não influenciarem a densidade da água, é preferível usar essa abordagem híbrida (dois modelos), ao invés de usar um modelo tridimensional de fluxo e transporte, porque o tempo de processamento é de 15 a 20 vezes menor. Para essa comparação, os autores usaram o modelo HST3D (também do USGS) versus a associação Modflow-MOC.

10.3 EXEMPLO COMPARATIVO DE APPs E DE VOLUME PARA DESCONTAMINAÇÃO CALCULADOS POR MODELOS NUMÉRICO E ANALÍTICO TRIDIMENSIONAIS

Larson et al (1987) mostraram estudo comparativo entre o volume de descontaminação e a APP calculada por modelo analítico e por modelo numérico tridimensional, testando esquema de descontaminação. O modelo numérico 3D pode levar em consideração fluxo vertical, poço parcialmente penetrante, condutividade hidráulica na direção Z e recarga, fatores presentes nesse exemplo, fazendo com que a APP calculada (Figura 47) aproxime-se mais da realidade do que aquele calculado pelo modelo analítico bidimensional. O volume contido que se desejava calcular para esse esquema de descontaminação, por conseguinte, também aproxima-se mais da realidade.

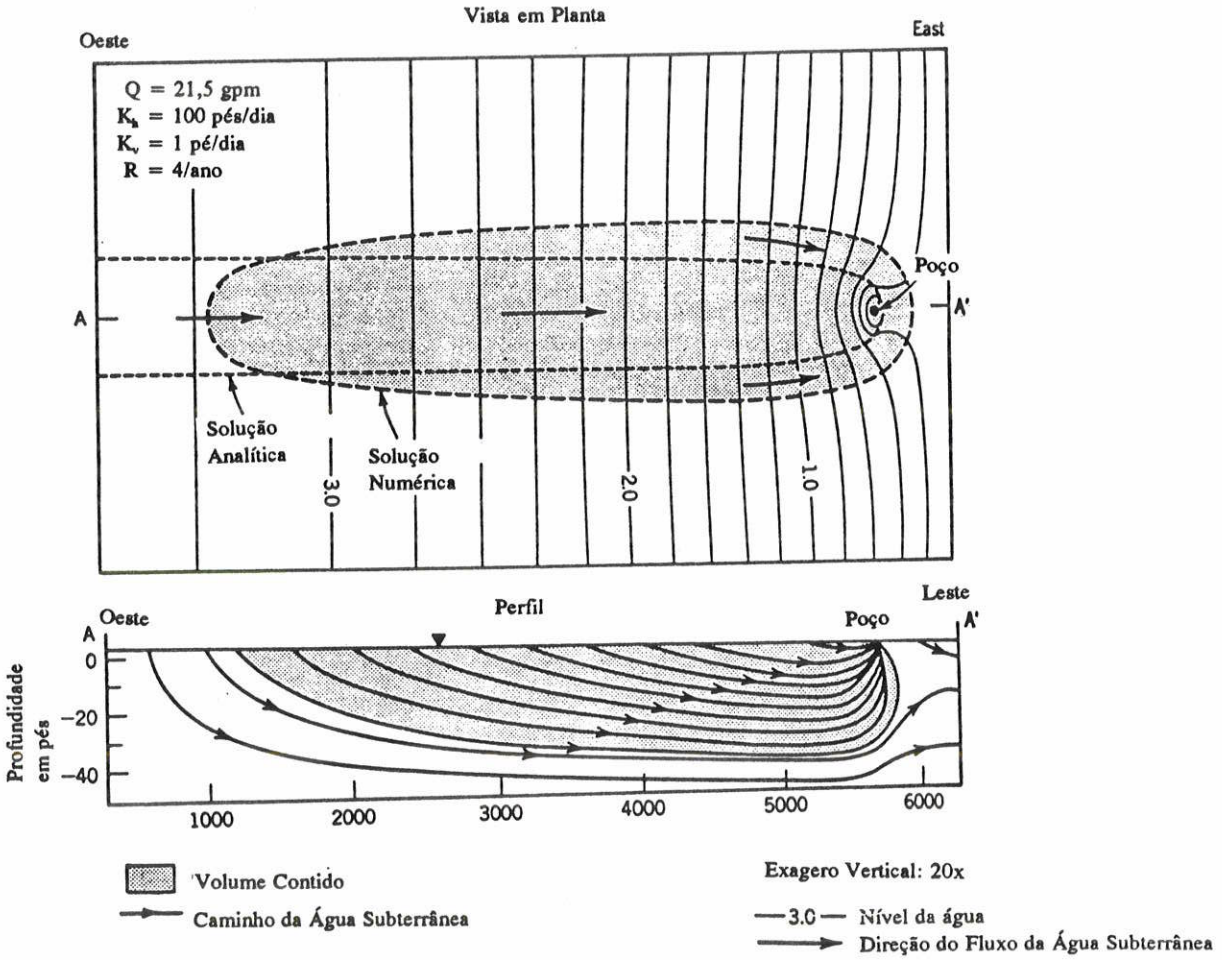


Figura 47 - Zona de Captura utilizando um modelo de fluxo tridimensional (Larson et al., 1987, como reproduzido em Domenico and Schwartz, 1990)

11. INVESTIGAÇÃO ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS EM MICROCOMPUTADORES DOS EFEITOS DE HETEROGENEIDADES GEOLÓGICAS E DE PROCESSOS ATENUANTES DE TRANSPORTE NO TEMPO E NOS ESQUEMAS DE REMEDIAÇÃO DE AQÜÍFEROS CONTAMINADOS

11.1 ÁREA A SER REMEDIADA - MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO

Um esquema de remediação é simulado para uma área que contém uma pluma de contaminação. Assumindo-se que o contaminante pode sofrer dispersão e retardamento, simulações investigam os efeitos destes processos atenuantes de transporte no tempo de remediação, cada um destes processos agindo isoladamente.

As condições de contorno e a malha de diferenças finitas utilizada para a discretização da área em questão são mostradas na Figura 48. Para qualquer simulação o modelo MOC especifica automaticamente os blocos que circundam a área a ser simulada como contornos do 2º tipo, com o fluxo igual a zero (ver seção 8.2.4). Todos os dados de entrada precisam estar em unidades inglesas.

A pluma é representada por concentrações iniciais de valor igual a 1000 ppb. Em MOC, porém, a unidade para as concentrações pode ser g/l, μg/l, ppb, ppm, ou qualquer outra. As concentrações obtidas no final das simulações foram importadas pelo programa de planilha de dados QUATTRO PRO, que apresenta os resultados em forma de curvas de chegada (breakthrough curves). Os gráficos produzidos por este programa mostram a variação da concentração normalizada (concentração final simulada, dividida pela concentração inicial) à medida que prossegue o bombeamento (Figuras 51 (a) e (b), 52, 53, 55, 58 e 61).

O modelo físico a ser simulado envolve um poço bombeando entre dois rios, situados a montante e a jusante da área, separados por uma distância de 1800 pés (548,64 metros).

Para representar este modelo físico, os blocos onde os rios ocorrem são especificados como contornos do 1º tipo, com a carga constante (ver seção 8.2.4).

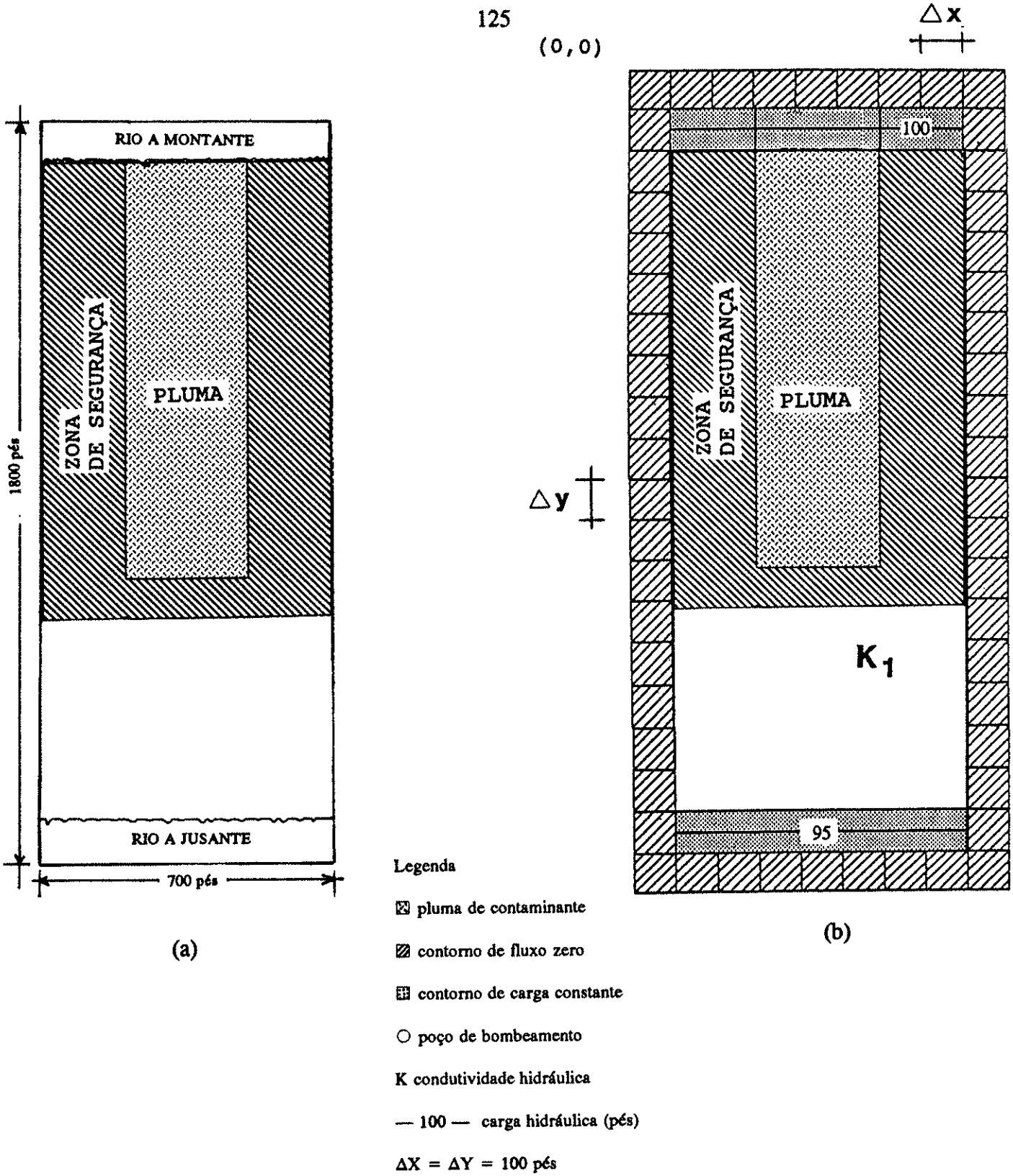


Figura 48 - Modelo físico (a) e malha de diferenças finitas e condições de contorno (b) para a simulação de esquema de remediação por bombeamento e tratamento, utilizando o modelo numérico MOC.

Informações complementares sobre o aqüífero são listadas na Tabela 13. Os valores para α_L e a razão α_T/α_L, são baseados nos resultados do experimento multi-milionário do USGS para determinar dispersividades em aqüíferos sedimentares (Garabedian et al., 1991).

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Condutividade Hidráulica	K_1	$3,28084 \times 10^{-3}$ 10^{-1}	pés/s cm/s
Porosidade Efetiva	n_{ef}	0,25	–
Espessura saturada	b	100 30,48	pés metros
dispersividade longitudinal	α_L	3 0,9144	pés metros
razão entre dispersividade transversal/ dispersividade longitudinal	α_T/α_L	0,02	–
Concentração Inicial	C_o	1000	ppb

Tabela 13 - Valores de parâmetros utilizados na simulação que assume-se o aqüífero homogêneo e isotrópico

11.1.1 GRADIENTE REGIONAL NATURAL

O gradiente regional natural (i) da área é dado por:

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta X} = \frac{(H_2 - H_1)}{(X_2 - X_1)} = \frac{100 - 95}{(1800 - 0)} = 2,7777778 \times 10^{-3}$$

11.1.2 VELOCIDADE REAL

A velocidade real (seapage velocity) com que a água flui no aqüífero é igual à velocidade de Darcy dividida pela porosidade efetiva:

$$V_{Darcy} = Ki = 3{,}28084 \times 10^{-3} \times \frac{5}{1800}$$

$$\mathbf{V_{Darcy} = 9{,}1134444 \times 10^{-6}\ pés/s = 0{,}24\ m/d}$$

$$V_{real} = \frac{V_{Darcy}}{n_{ef}} = \frac{9{,}1134444 \times 10^{-6}}{0{,}25}$$

$$\mathbf{V_{real} = 3{,}6453778 \times 10^{-5}\ pés/s = 0{,}96\ m/dia}$$

11.1.3 TAXA DE BOMBEAMENTO DE POÇO ÚNICO

Quando assume-se que o bombeamento do esquema de remediação se dá em aqüífero homogêneo e isotrópico, e é realizado por um único poço, as equações do Modelo Uniforme de Fluxo (ver seção 5.1.4 e Figura 16) podem ser usadas para a obtenção da taxa de bombeamento deste poço:

$$Y_L = \pm \frac{Q}{2Kbi} \qquad \text{(divisor a montante)}$$

$$Q = Y_L\, 2Kbi = Y_L\, 2Ti$$

Definindo-se uma zona de segurança de 200 pés (60,96 metros) em cada lado da pluma de contaminação (a metade desta largura, Y_L, de 150 pés (45,72 m) para garantir, mesmo que haja um erro na locação da pluma, que esta pluma seja capturada pela zona de captura criada por aquela taxa de bombeamento, tem-se:

$$Y_L = 150 + 200 = 350 \text{ pés } (106{,}68 \text{ m})$$

$$Q = 350 \times 2 \times 0{,}328084 \times 5/1800$$

$$\mathbf{Q = 0{,}6379411 \text{ pés}^3/\text{s} = 412312{,}2 \text{ gpd (galões por dia)} = 1560{,}771 \text{ m}^3/\text{d}}$$

Javandel e Tsang (1986) desenvolveram, para aqüífero homogêneo e isotrópico, uma abordagem analítica para a escolha apropriada de localização de poços e distância entre os mesmos em esquemas de remediação. Através da superposição da pluma de contaminação sobre curvas-tipo de zonas de captura, a taxa de bombeamento ideal para a remediação desta pluma é calculada. Se o rebaixamento causado por esta taxa de bombeamento for maior do que a espessura saturada disponível, dois poços, ao invés de um, devem ser utilizados. Um máximo de quatro poços, alinhados perpendicularmente à direção de fluxo.

O menos limitante dos métodos para o projeto de esquemas de remediação combina simulação do fluxo da água subterrânea através de modelos numéricos com otimização matemática. A associação do modelo GWPATH a um programa matemático de otimização (Varljen e Shafer, 1992) permite o cálculo da taxa de bombeamento para uma bateria de poços, de forma a minimizar o risco de contaminação das zonas de captura que se desenvolvem numa área em que existem fontes potenciais de contaminação. A abordagem é interessante porque em geral as municipalidades têm suas APPs delineadas quando aterros sanitários, cemitérios, parques industriais e outras fontes potenciais de contaminação já se encontram instaladas.

11.1.4 LOCALIZAÇÃO DO POÇO

Define-se agora o ponto de estagnação através da equação do Modelo Analítico de Fluxo Uniforme, para então localizar-se o poço:

$$X_L = - \frac{Q}{2\pi Kbi} \qquad \text{(ponto de estagnação)}$$

$$X_L = \frac{0{,}6379411}{2 \times 3{,}14 \times 0{,}328084 \times 5/1800} =$$

$$\mathbf{X_L = 111{,}46497 \text{ pés} = 33{,}97453 \text{ metros}}$$

O poço foi locado a 50 pés (15,24 metros) do contorno da pluma. Supondo-se a existência de uma zona de segurança de 100 pés em torno da pluma, o poço encontra-se a 150 pés (45,72 metros) do limite desta zona.

11.1.5 TEMPO DE REMEDIAÇÃO CONSIDERANDO-SE SOMENTE TRANSPORTE ADVECTIVO

Por quanto tempo será necessário bombear, utilizando a taxa de bombeamento calculada, para retirar um volume de poros de água subterrânea contaminada do aqüífero homogêneo e isotrópico (Figura 49)?

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$t = \frac{V}{Q}$$

V = volume de água contaminada contido no espaço poroso efetivo do aqüífero homogêneo e isotrópico

V = ΔX x nº de blocos na direção X x ΔY x nº de blocos na direção Y x espessura do aqüífero x porosidade efetiva

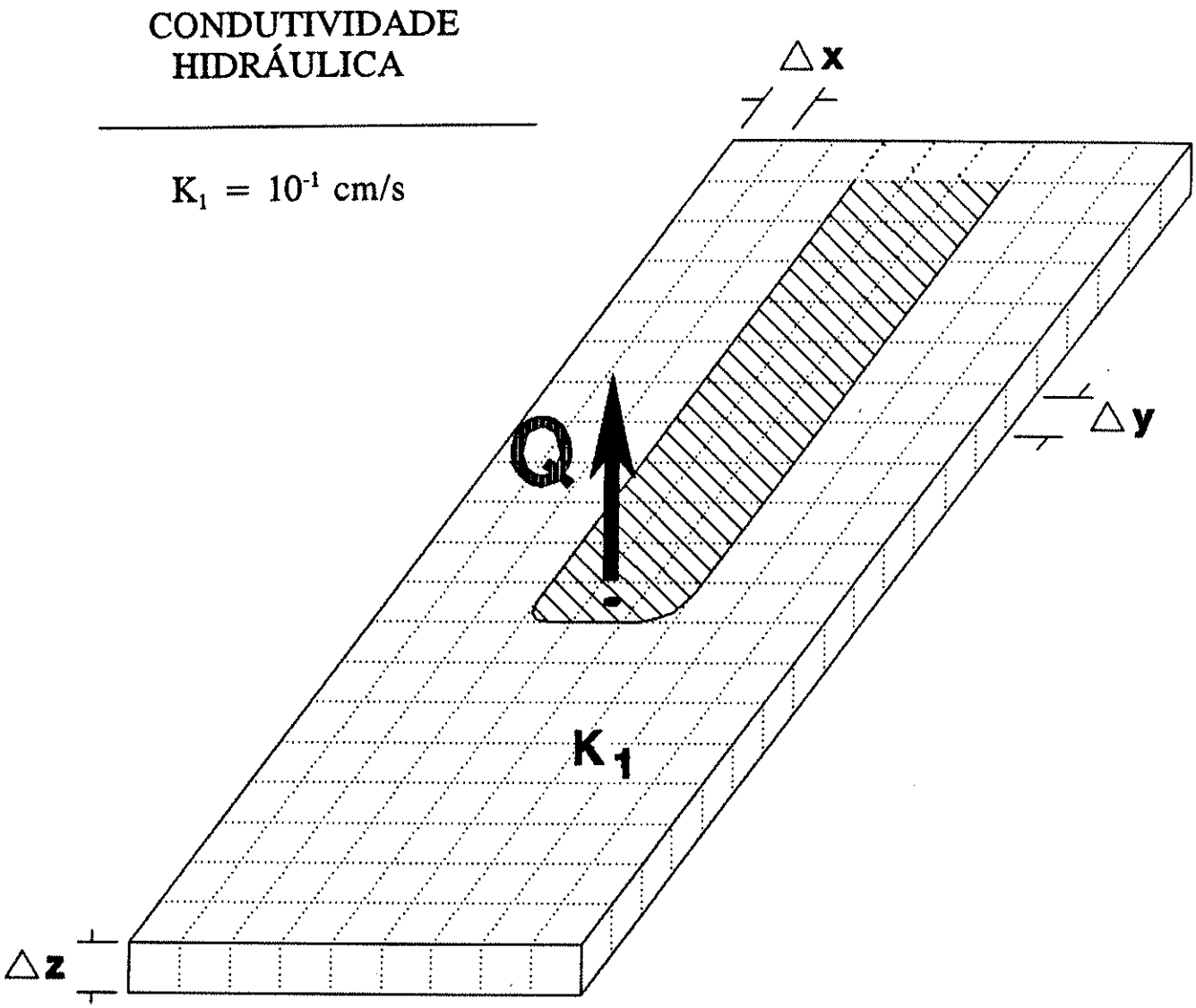
V = 100 x 12 x 100 x 7 x 100 x 0,25

V = 21.000.000 pés^3 = 594653,8 m^3

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{21.000.000}{0,6379411}$$

t = 1,0438356 anos

Este cálculo assume que o aqüífero é um bloco de dimensões bem definidas, e as condições de contorno, que podem acelerar o processo de remediação, não são levados em conta. Sob estas pressuposições, este é o menor tempo possível para a execução do esquema de remediação porque somente o transporte advectivo, aquele em que os contaminantes apresentam a mesma velocidade da água subterrânea, é considerado. Quando qualquer um de todos os outros processos que diminuem a velocidade dos contaminantes, em relação à da água subterrânea, é considerado, o tempo de remediação é afetado e só pode ser maior do que o calculado. Alguns destes outros processos envolvem dispersão, difusão relacionada a contaminantes presos em água imóvel, adsorção. A heterogeneidade do aqüífero é também um processo, no caso físico, que afeta o tempo de remediação.



$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 100$ pés

Figura 49 - Bloco diagrama do aqüífero homogêneo e isotrópico

11.2 ZONA DE CONTRIBUIÇÃO CRIADA PELO POÇO DE REMEDIAÇÃO - EFEITO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO SOBRE A ZONA DE CONTRIBUIÇÃO

O poço de remediação cria a zona de contribuição mostrada na Figura 50 (a). É interessante notar que a zona de contribuição delineada pelo modelo FLOWPATH (Franz and Guiguer, 1990) tem uma largura total de 420 pés (182,88 m). Para o cálculo da taxa de bombeamento do poço, porém, foi calculada pelo Modelo Analítico de Fluxo Uniforme, assume-se que a largura da pluma a ser remediada pelo poço é de 700 pés (213,36 m). Este valor total inclui a largura de 300 pés (91,44 m) da pluma, somada a uma zona de segurança de 200 pés (60,96 m) em cada lado da pluma. Na extremidade jusante da pluma esta zona tem somente 100 pés (30,48) de largura. O estreitamento da zona de contribuição deve-se ao fato do MFU só funcionar nas condições ideais para o qual foi desenvolvido: aqüífero homogêneo, isotrópico e infinito. Para este caso, a proximidade do poço até o contorno do 1º tipo (carga constante), representando um rio a montante, permite que a infiltração induzida deste rio supra a taxa de recarga do poço, sem que seja necessário o alargamento da zona de contribuição até os 700 pés (213,36 m). Como a condição de contorno a montante garante uma que uma carga hidráulica seja mantida constante, o efeito da infiltração induzida é permanente, e não muda com o passar do tempo. A influência da condição de contorno sobre a largura da zona de contribuição pode ser mostrada quando simula-se o mesmo problema, com exceção da distância entre os rios, aumentada para 5400 pés (1645,92 m), e da largura da área simulada, que passa de 700 pés (213,36 m) para 1900 pés (579,12 m). A zona de contribuição, longe o suficiente da influência do contorno de carga constante, passa a exibir a largura de 700 pés (213,36 m), assumida para os cálculos da taxa de bombeamento do poço (Figura 50 (b)).

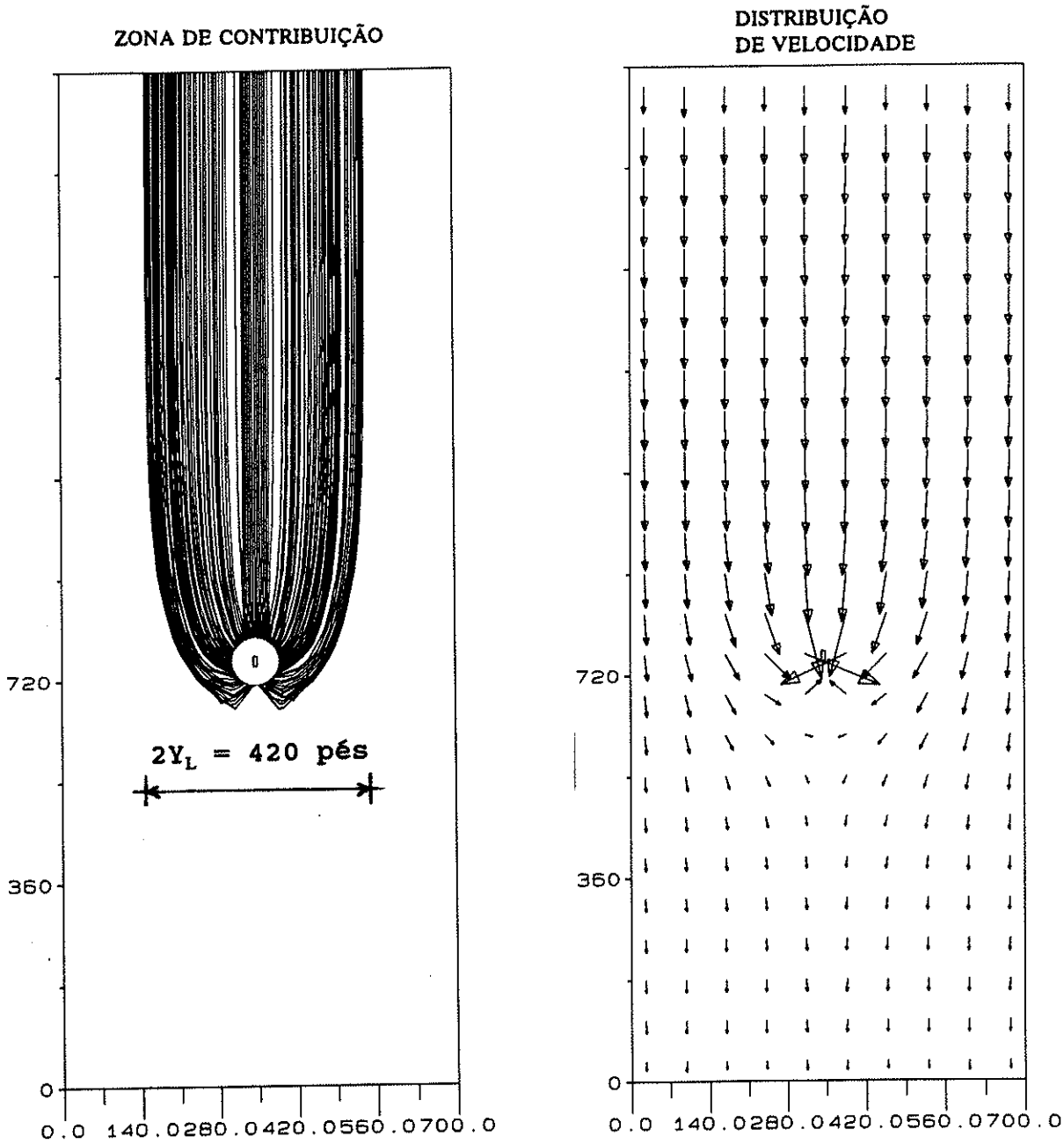


Figura 50 (a) - ZC (largura de 420 pés (182,88 m)) desenvolvida em aqüífero homogêneo por poço de esquema de remediação para pluma de benzeno. Vetores de velocidade mostram a direção do fluxo da água subterrânea. O tamanho de cada vetor é uma função do valor da velocidade (o forte gradiente em do poço faz as velocidades aumentarem).

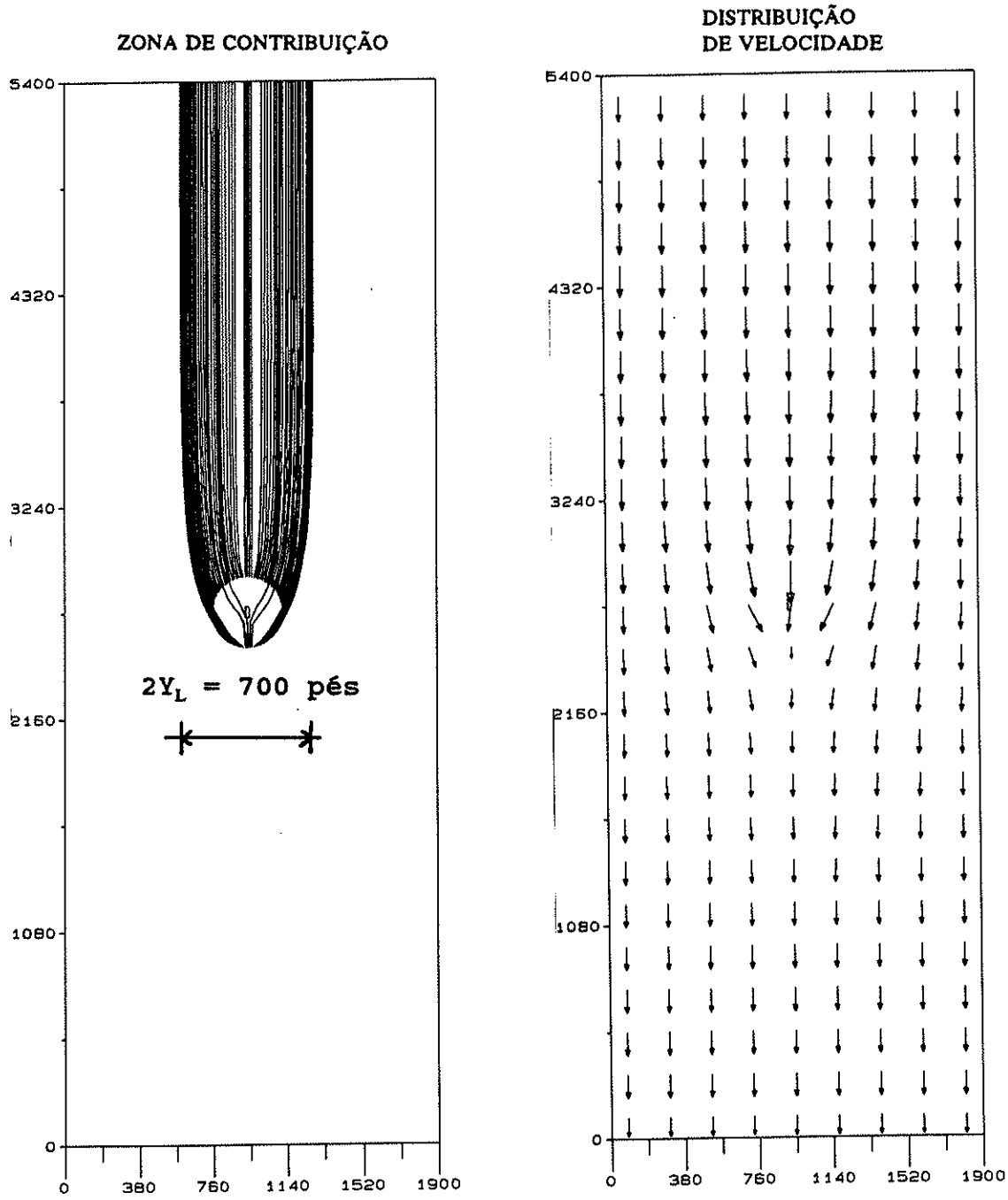


Figura 50 (b) - Zona de contribuição desenvolvida longe da influência do contorno de carga hidráulica constante a montante. A largura da ZC é de 700 pés (213,36 m), como assumida para os cálculos de Q (taxa de bombeamento).

11.3 EFEITO DE DISPERSIVIDADE

Não existe uma fórmula para o cálculo direto do tempo de remediação que é aumentado pela presença do processo de dispersão. Para fluxo uni-direcional, os coeficientes de dispersão longitudinal e transversal são calculados a partir das dispersividades respectivas e da velocidade real resultante, da seguinte maneira (Cleary, 1991):

D_T = dispersão transversal (na direção perpendicular à V_{real})

$D_T = \alpha_T V_{real}$

$D_T = 3 \times 0{,}02 \times 3{,}6453778 \times 10^{-5}$ ($\alpha_T/\alpha_L = 0{,}02$; ver Tabela 13)

$\mathbf{D_T = 0{,}2187226 \times 10^{-5}}$ **pés²/s = 0,0175564 m/d**

D_L =dispersão longitudinal (na direção de V_{real})

$D_L = \alpha_L V_{real}$

$D_L = 3 \times 3{,}6453778 \times 10^{-5}$

$\mathbf{D_L = 1{,}0936133 \times 10^{-4}}$ **pés²/s = 0,877824 m/d**

O efeito da dispersão sobre o tempo de remediação pode, no entanto, ser obtido através da simulação usando modelo numérico ou analítico de transporte de massa advectivo-dispersivo. Os resultados obtidos com o modelo numérico MOC mostram que o tempo de remediação calculado quando a dispersividade é zero, t igual a 1,0438356 anos, aumenta para 1,6 anos (Figura 51 (a)) quando uma dispersividade longitudinal pequena de 3 pés (0,9144 metros) é considerada. O tempo de remediação para que a concentração seja levada a zero ultrapassa os

dois anos de bombeamento, quando a dispersividade longitudinal é 90 pés (27,432 metros), ou seja, trinta vezes maior do que na simulação anterior. Observe na Figura 51 (a) que a espessura da curva obscura as pequenas concentrações, dando a impressão de que a concentração chega a zero por volta do tempo 1,4 anos. A Figura 51 (b) é uma ampliação desta área do gráfico, mostrando que o tempo para as concentrações atingirem zero é maior do que 2 anos. Para as próximas simulações, vai-se manter o valor de dispersividade longitudinal e a razão entre a dispersividade transversal e longitudinal mostradas na Tabela 14. Pretende-se com isto manter os baixos efeitos da dispersividade sobre o tempo de rebaixamento, de modo que o efeito do processo em investigação seja melhor evidenciado.

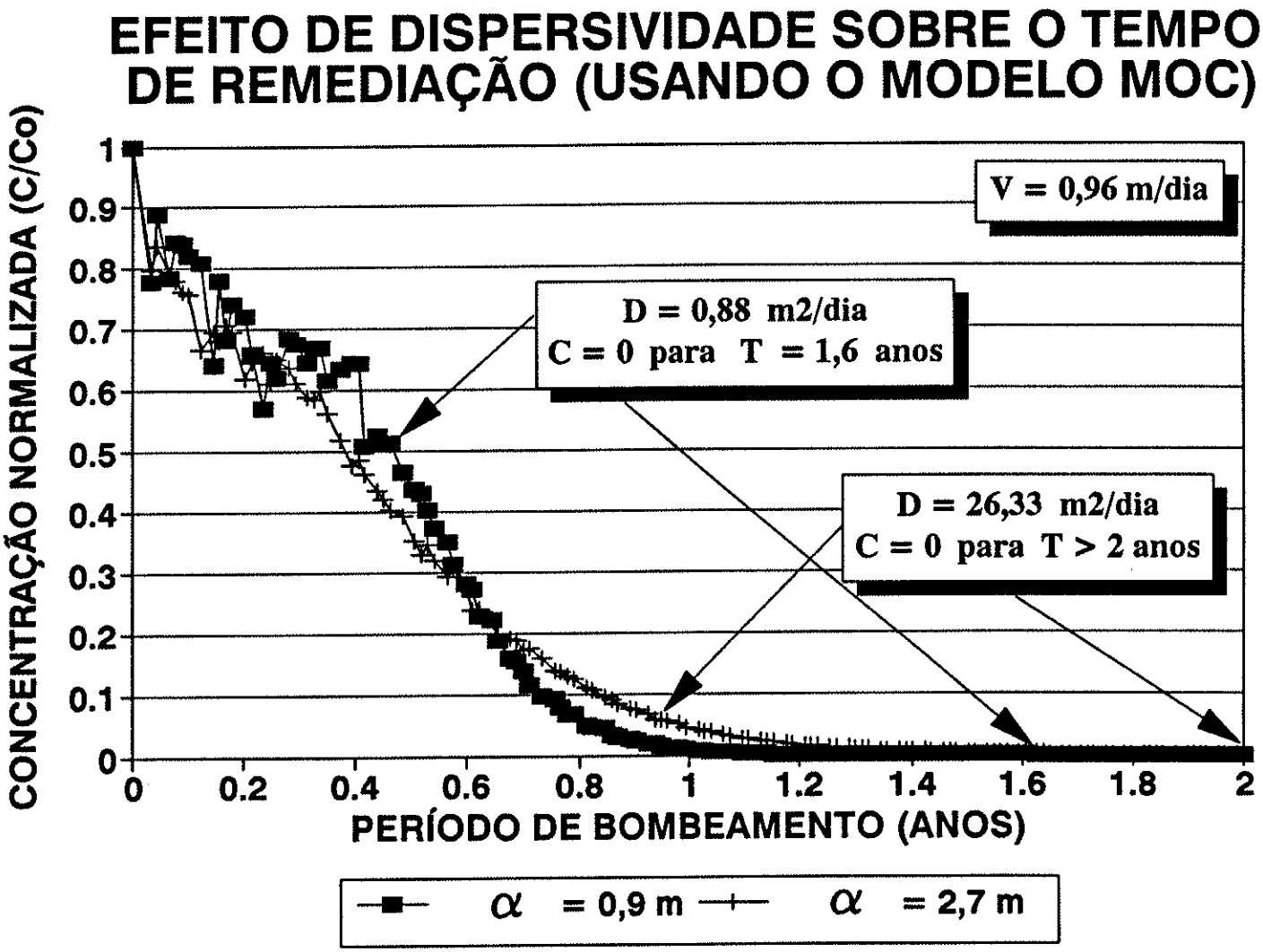


Figura 51 (a) - Efeito de dispersividade sobre o tempo de remediação

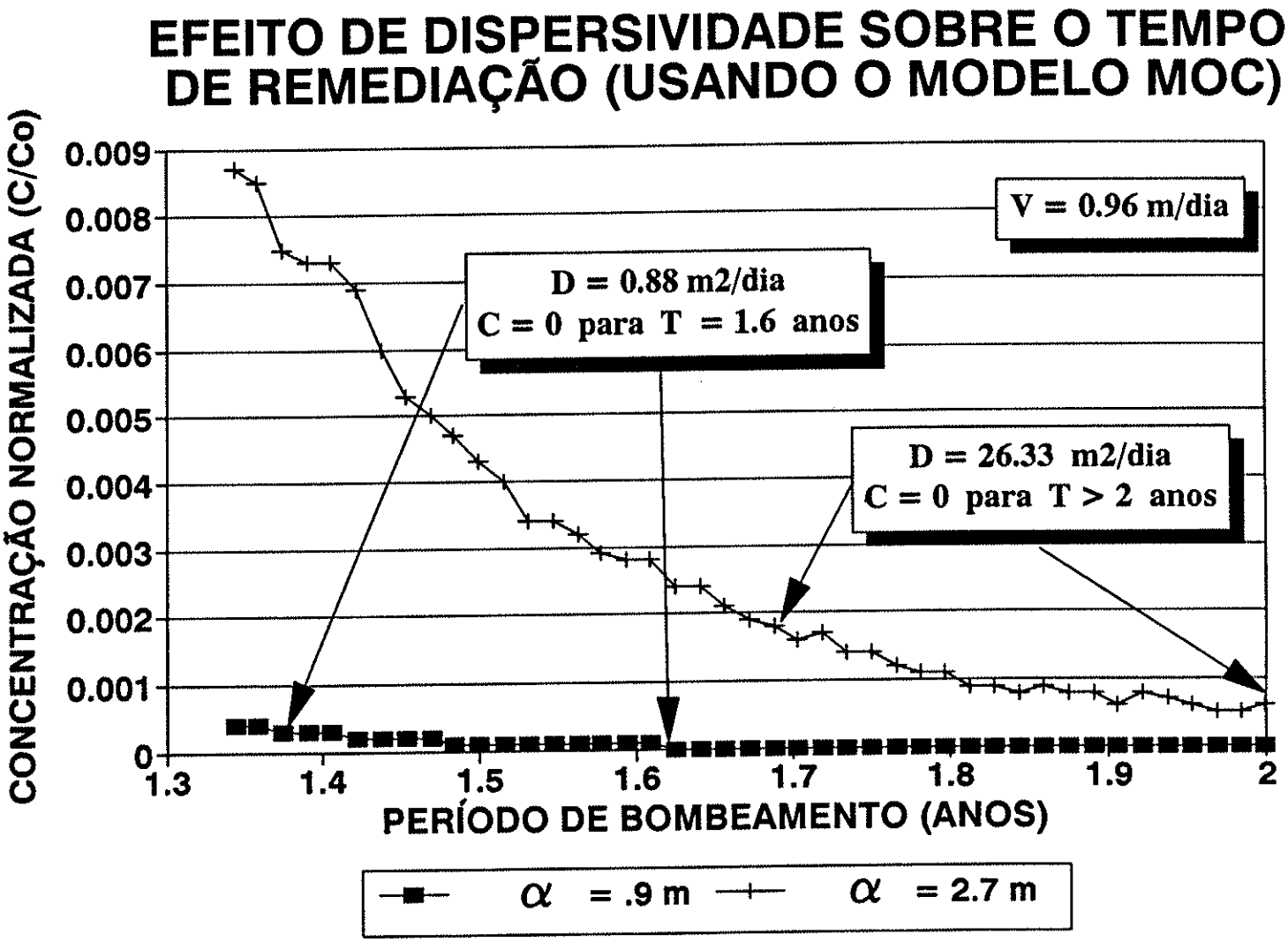


Figura 51 (b) - Ampliação de parte do gráfico da Figura 51 (a), mostrando que a concentração zero só é atingida após mais de 2 anos de bombeamento.

11.4 EFEITO DE RETARDAMENTO

Calculado o tempo de remediação, a expectativa é de que neste período de tempo um volume de poros de água contaminada seja bombeada do solo e que toda a contaminação seja retirada. Tratando-se de uma pluma de, por exemplo, 1,1,1-Tricloroetano (1,1,1-TCA), no entanto, ocorre adsorção nos grãos do meio permeável, e a velocidade deste contaminante torna-se menor do que a da água subterrânea. Por causa da menor velocidade desenvolvida, diz-se que o contaminante sofre retardamento. O tempo para remover este contaminante é uma função direta deste retardamento e pode ser calculado conhecendo-se o coeficiente de retardamento (R_f) deste contaminante. O R_f é uma função do coeficiente de distribuição do contaminante, e da densidade grossa e seca e porosidade efetiva do meio permeável.

$$R_f = 1 + \frac{K_d \rho_b}{n_{ef}}$$

Se:

$$\rho_b = 1{,}55 \text{ g/cm}^3$$

$$K_d = 0{,}1612903 \text{ ml/g}$$

$$n_{ef} = 0{,}25$$

Então:

$$R_f = 2$$

A Tabela 14 lista outros valores, obtidos em estudos de campo, de R_f para alguns contaminantes.

O tempo de remediação será então de R_f vezes mais do que o tempo para remediar um

Localização da Área Tipo de Teste (referência)[a]	Coeficientes de Retardamento determinados para os Contaminantes Listados Contaminante	R_f	Conteúdo de Carbono Orgânico de Sólidos (referência)
Palo Alto, Califórnia Gradiente forçado (1)			nr[c]
	Clorofórmio	2,5-3,8	
	Bromofórmio	6,0	
	1,1,1-Tricloroetano	12,0	
	Clorobenzeno	33,0	
R. Aare, Suíça Infiltração de rio (2)			nr
	Tetracloroeteno	5,0	
Gloucester, Ontario Gradiente forçado (3,4)			0,1-0,35% (4,5)
	1,4-Dioxano	1,4	
	Tetrahidrofurano	2,2	
	Dietil Éter	3,0	
Interpretação de pluma (4,5)			
	1,4-Dioxano	1,6	
	Tetrahidrofurano	2,2	
	Dietil Éter	3,3	
	1,2 Diclorobenzeno	7,6	
	Benzeno	8,8	
	Tetracloreto de Carbono	23,0	
Borden, Ontario Gradiente natural (6,7)			0,02% (6,11)
	Bromofórmio	1,9-2,7	
	Tetracloreto de Carbono	1,8-2,5	
	Tetracloroeteno	2,7-5,9	
	1,2 Diclorobenzeno	3,9-9,0	
	Hexacloroetano	5,0-7,9	
Estação Naval de Ar Moffet, Califórnia Gradiente forçado (8)			0,11% (8)
	Ticloroeteno	6,9	
	1,1,1-Tricloroetano	1,4-2,0	
Base da Força Aérea Otis, Massachusetts Interpretação de pluma (9)			0,01-0,75% (9)
	Tricloroeteno	1,0	
	Tetracloroeteno	1,0	
	Diclorobenzeno	1,0-1,1	
	DTBB[b]	2,4-2,6	
	P-Nonilfenol	1,1-3,3	
Arsenal da montanha Rocky, Colorado Gradiente forçado (10)			0,005% (12)
	Tricloroeteno	1-2	
	1,1,1-Tricloroetano	1-2	

[a] Referências: (1) Roberts et al., 1982; (2) Schwarzenbach et al., 1982; (3) Whiffin and Bahr, 1985; (4) Patterson et al., 1985; (5) Jackson et al., 1985; (6) Mackay et al., 1986a; (7) Roberts et al., 1986; (8) Semprini et al., 1987; (9) Barber et al. 1988; (10) Mackay et al., 1988b; (11) Bali et al., 1989; (12) Mackay et al., resultados não publicados.
[b] DTBB é o 2,6-di-tert-butil-p-benzoquinone.
[c] nr: não reportado.

Tabela 14 - Estudos de campo que produziram estimativas confiáveis de coeficiente de retardamento (R_f) para contaminantes orgânicos em aqüíferos arenosos/de cascalho (Mackay, 1990)

contaminante que não adsorve ou decai:

$$t_{Rf} = R_f \times t$$

$$t_{Rf} = 2 \times 1{,}0438356 = 2{,}0876712 \text{ anos}$$

A simulação realizada com o modelo MOC considera os valores acima calculados e o aqüífero como homogêneo (Figura 49). Embora o valor da dispersividade utilizado para esta simulação seja pequeno, α = 3 pés, o seu efeito sobre o tempo de remediação pode ser verificado quando somente aos 2,6 anos consegue-se que a concentração atinja o valor zero (Figura 52).

O tempo de remediação é dramaticamente aumentado quando tratar-se de pluma de clorobenzeno. O valor de R_f selecionado para o clorobenzeno é de 33 (baseado em estudo listado na Tabela 14). O tempo esperado para remediar o aqüífero homogêneo e isotrópico, não levando-se em conta os efeitos de dispersão encontrados:

$$t_{Rf} = R_f \times t$$

$$t_{Rf} = 33 \times 1{,}0438356$$

$$t_{Rf} = 34{,}446575 \text{ anos}$$

Novamente, o tempo gasto para o término da remediação é um pouco maior, por causa da influência da dispersividade de 3 pés (0,9144 metros). Também observe que devido ao esquema numérico usado em MOC (fenômeno encontrado em métodos de caminhamento de partículas, em que estas partículas não se distribuem com suficiente resolução no campo de fluxo (Kinzelbach, 1987)), as concentrações podem oscilar à medida que aproximam-se dos valores

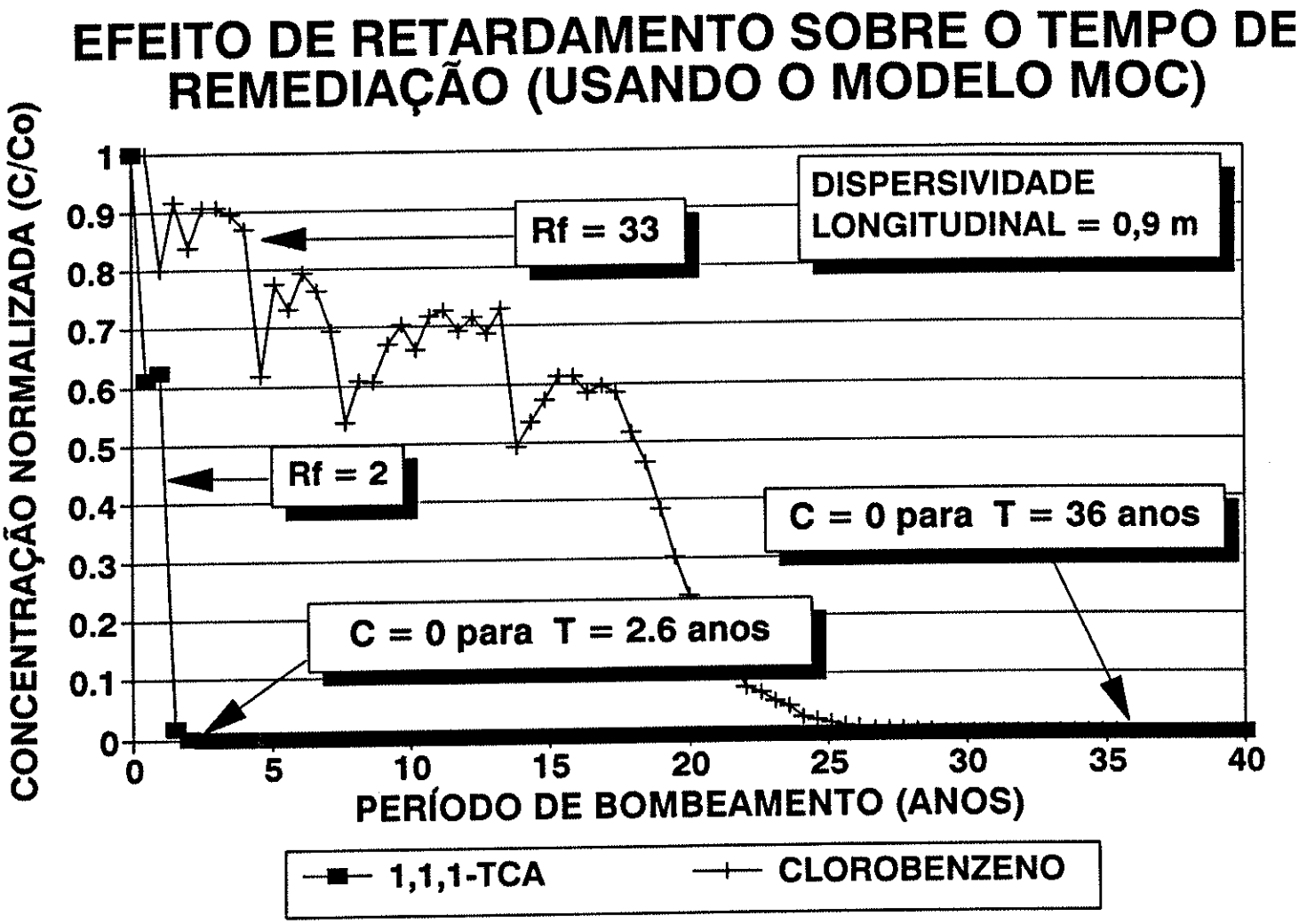


Figura 52 - Efeito de retardamento e de dispersividade sobre o tempo de remediação de pluma de 1,1,1-TCA e de clorobenzeno

Tratando-se de pluma de benzeno, que apresenta R_f de 8,8 (ver Tabela 14), o tempo de remediação esperado é de 9,157533 anos, se somente processos advectivos são considerados. A Figura 53 mostra os resultados da simulação, e o efeito da dispersividade aumentando o tempo de remediação para 9,7 anos.

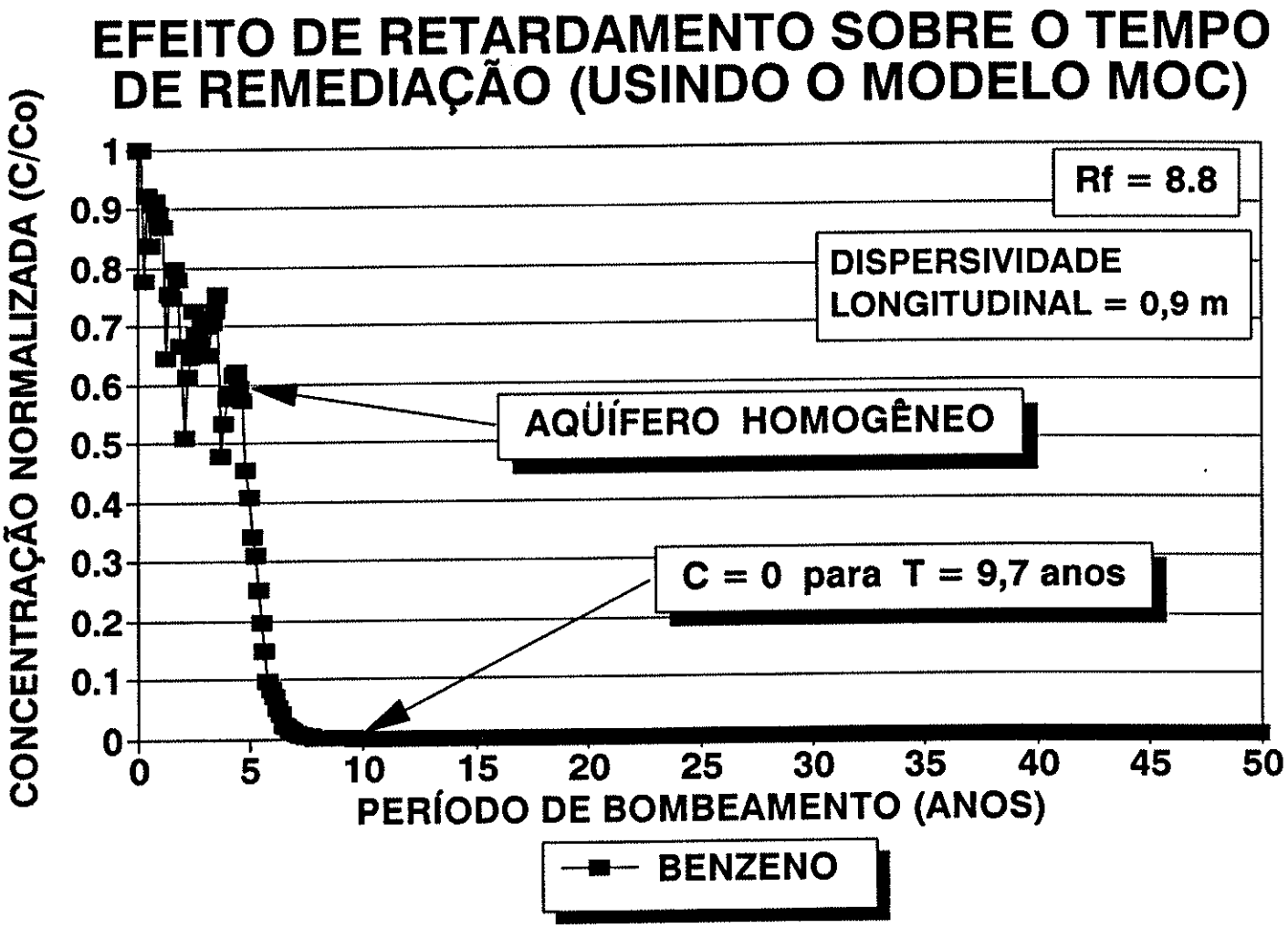


Figura 53 - Efeito de retardamento e dispersividade sobre o tempo de remediação de pluma de benzeno. A concentração normalizada atinge o valor 0 após 9,7 anos de bombeamento.

11.5 EFEITO DE HETEROGENEIDADE GEOLÓGICA

O que acontece à previsão da eficácia de um esquema de remediação que utiliza um poço bombeando, quando a heterogeneidade do aqüífero contaminado é levada em consideração? A heterogeneidade do aqüífero é uma das causas da condição assintótica da concentração. Sua inclusão na previsão de um programa de remediação mostra que um tempo maior do que o previsto será consumido durante o período em que a concentração da água bombeada mantém-se constante ou oscila em torno de um valor.

A condição assintótica é observada na curva de chegada de concentração (breakthrough curve), no intervalo em que a inclinação diminui e aproxima-se de zero. Este intervalo é também chamado de "cauda" ("tailing") da curva. O início da condição assintótica da concentração acontece quando a zona de captura do poço atinge áreas (blocos) de baixa condutividade hidráulica, e a contaminação que ocupa os poros destas áreas é lentamente bombeada. A remoção da contaminação destas áreas é comparada a um sangramento (bleeding).

O tempo total necessário para a remediação deste aqüífero heterogêneo é surpreendentemente maior do que aquele previsto quando assume-se que o aqüífero contaminado é homogêneo e isotrópico. Esta realidade, além de surpresas, tem trazido embaraços para aqueles responsáveis por programas de remediação por bombeamento e tratamento, que não levaram em consideração esta causa hidrológica da condição assintótica da concentração.

11.5.1 GEOLOGIA HETEROGÊNEA I

Utilizando-se o modelo MOC, simulou-se um esquema de remediação para uma pluma de benzeno, desenvolvida num aqüífero heterogêneo (Figura 54). Em torno do poço encontra-se o bloco de maior condutividade hidráulica (K_1), e em torno deste o bloco de condutividade K_2. A montante e a jusante domina o bloco de menor condutividade hidráulica, K_3, onde encontra-se a pluma (embora o símbolo K_3 apareça fora da pluma). Note-se a ocorrência de pequenos blocos de condutividade hidráulica K_1 e K_2 nestas duas áreas. As condições de contorno e a malha de

diferenças finitas utilizada para a discretização do modelo físico são as mesmas utilizadas para as investigações dos efeitos de dispersividade e de retardamento (Figura 48), bem como os valores dos parâmetros, listados na Tabela 13.

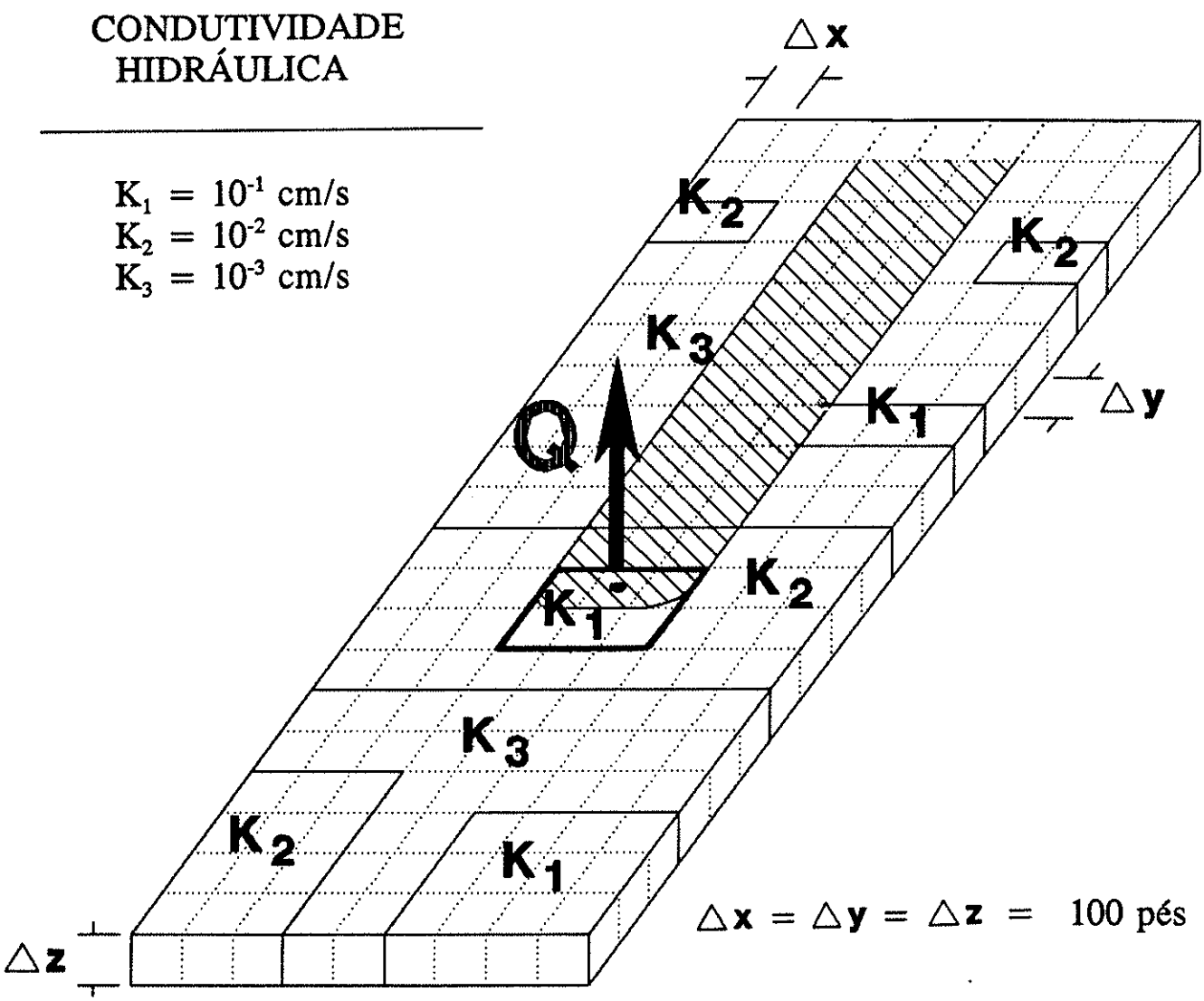


Figura 54 - Bloco diagrama do aqüífero heterogêneo (conferido pelos blocos de condutividade hidráulica)

Efeitos surpreendentes surgem quando leva-se em consideração a heterogeneidade do aqüífero que o poço bombeando tenta remediar. Não só o tempo de remediação é quase cinco vezes maior (passa de 9,7 anos para 47 anos), mas por aproximadamente 20 anos a concentração comporta-se assintoticamente. Na Figura 55, esta curva de aparecimento de concentração é apresentada juntamente com a curva de chegada da concentração quando o aqüífero é considerado homogêneo (mesma curva da Figura 53), para facilitar a comparação entre a eficácia do esquema de remediação quando o aqüífero é homogêneo e quando é heterogêneo I.

Na Figura 55, pode-se ver que a concentração no aqüífero homogêneo atinge metade do seu valor em aproximadamente 5 anos, enquanto que a remediação no aqüífero heterogêneo I leva aproximadamente 1 ano. O decaimento mais lento dos valores de concentração no aqüífero homogêneo em relação ao tempo gasto no aqüífero heterogêneo I (o mesmo efeito é observado nos aqüíferos heterogêneos II e III) deve-se à pequena área de alta condutividade hidráulica em torno do poço neste aqüífero heterogêneo.

A princípio a concentração decai rapidamente, como função da remediação do bloco de maior condutividade hidráulica (K_1) em torno do poço. No início do bombeamento nos aqüíferos heterogêneos, a extração de água da pequena área de maior condutividade hidráulica (K_1) em torno deste poço é suficiente para remediá-la rapidamente, tornando as concentrações deste local mais baixas do que as das áreas de menor condutividade hidráulica a montante. Com o passar do tempo de bombeamento a zona de captura do poço atinge áreas menos condutoras (K_2 e K_3) e a montante e a água contaminada proveniente desta zona passa lentamente a "sangrar" ("bleed") e a concentração aí presente é baixa. Ao passar pela área de K_1 antes de atingir o poço, sofre diluição porque a pequena área já se encontra remediada. O processo se estende por um longo período, e a concentração comporta-se assintoticamente.

As causas da condição assintótica observada na prática podem ser várias, incluindo processos cinéticos e físicos de não-equilíbrio, causadas por adsorção e águas imóveis de zonas mortas respectivamente. Estes processos são discutidos em detalhe no clássico capítulo publicado por Van Genuchten and Cleary (1979), num dos muitos volumes da série Elsevier de Developments in Soil Science 5B. Dissolução lenta e difusão subseqüente de frações residuais de um orgânico hidrofóbico em sedimentos de grãos finos pode também ser uma das causas da condição assintótica. Contudo, apesar de todas estas causas possíveis, esta investigação mostrou que quando um contaminante ocorre principalmente em materiais de baixa condutividade

hidráulica, circundado por geologia de alta condutividade hidráulica que não contém contaminação, o efeito da condição assintótica é atingido por razões puramente hidrogeológicas (físicas). Isto significa que um poço de remediação localizado em sedimentos de grãos finos que sofreram contaminação, pode receber a maior parte de água dos sedimentos de alta condutividade hidráulica livres de contaminação. O resultado é a concentração da água bombeada aproximar-se ou oscilar por muito tempo em torno de um valor constante, usualmente maior do que zero. Se adicionado a este efeito hidrogeológico causado somente pela distribuição heterogênea de condutividades hidráulicas, tem-se efeitos cinéticos e físicos de não-equilíbrio na dissolução de frações residuais de contaminantes, o tempo da condição assintótica na curva de concentração versus tempo será até mais longo do que o mostrado aqui.

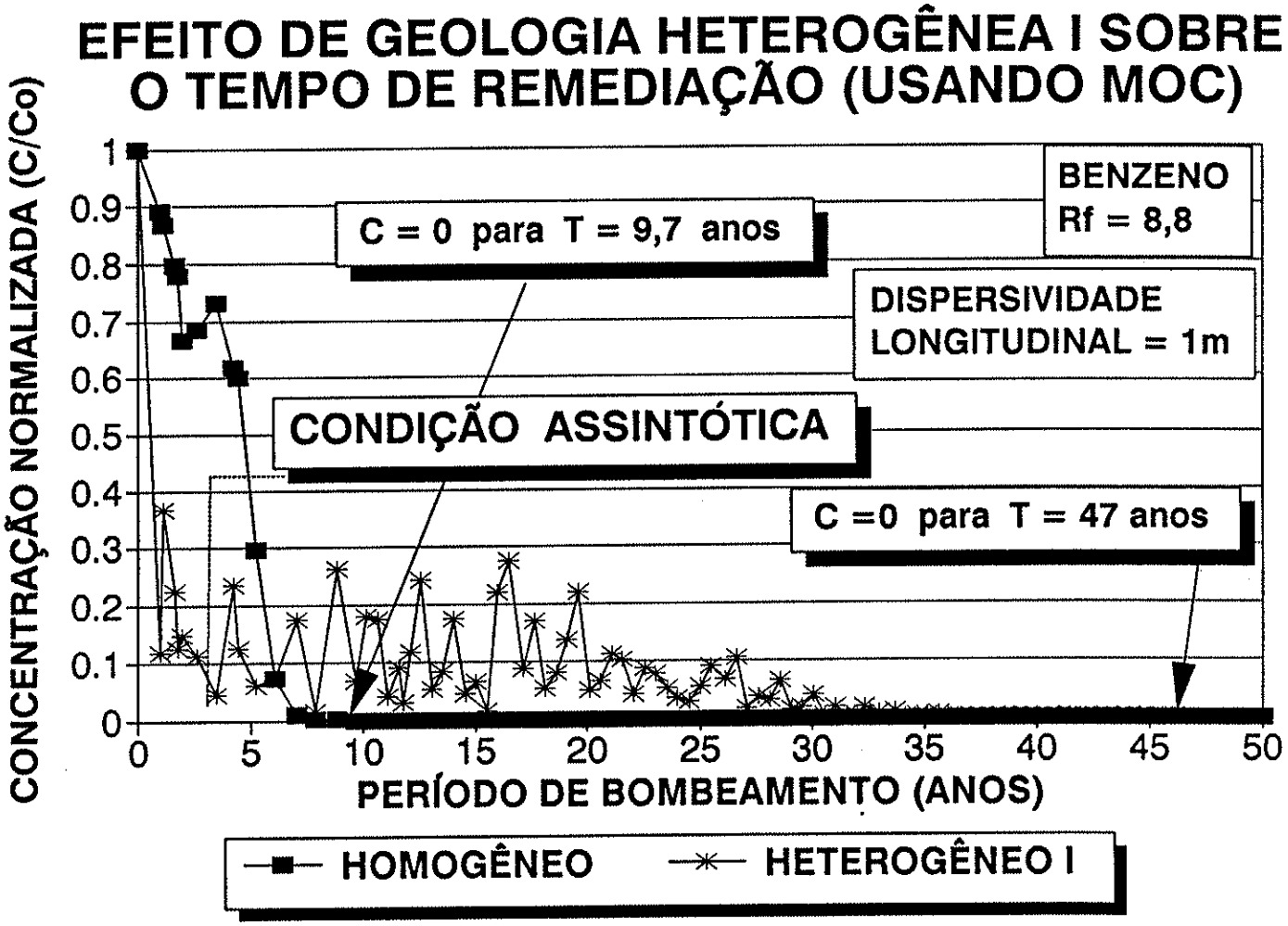


Figura 55 - Comparação entre curvas de concentração de benzeno para esquema de remediação por bombeamento e tratamento, quando o mesmo aqüífero é idealisticamente tomado como homogêneo (—■—), e quando o aqüífero heterogêneo I (—✳—) é considerado, causando a condição de concentração assintótica e aumentando o tempo de remediação da pluma de benzeno em quase cinco vezes.

Para este esquema de remediação no aqüífero heterogêneo I, a proximidade entre o poço e o contorno de carga constante a montante não permite que a zona de contribuição desenvolva a largura total de 700 pés (213,36 m), assumida nos cálculos para a taxa de bombeamento do poço (ver seção 11.1.3). A baixa condutividade K_3 que domina a metade da área a montante do poço, obriga o desenvolvimento da zona de contribuição também na porção a jusante do poço. O fluxo que dirigia-se em direção ao rio a jusante é invertido, e este rio passa também a fornecer recarga induzida para o poço (Figura 56).

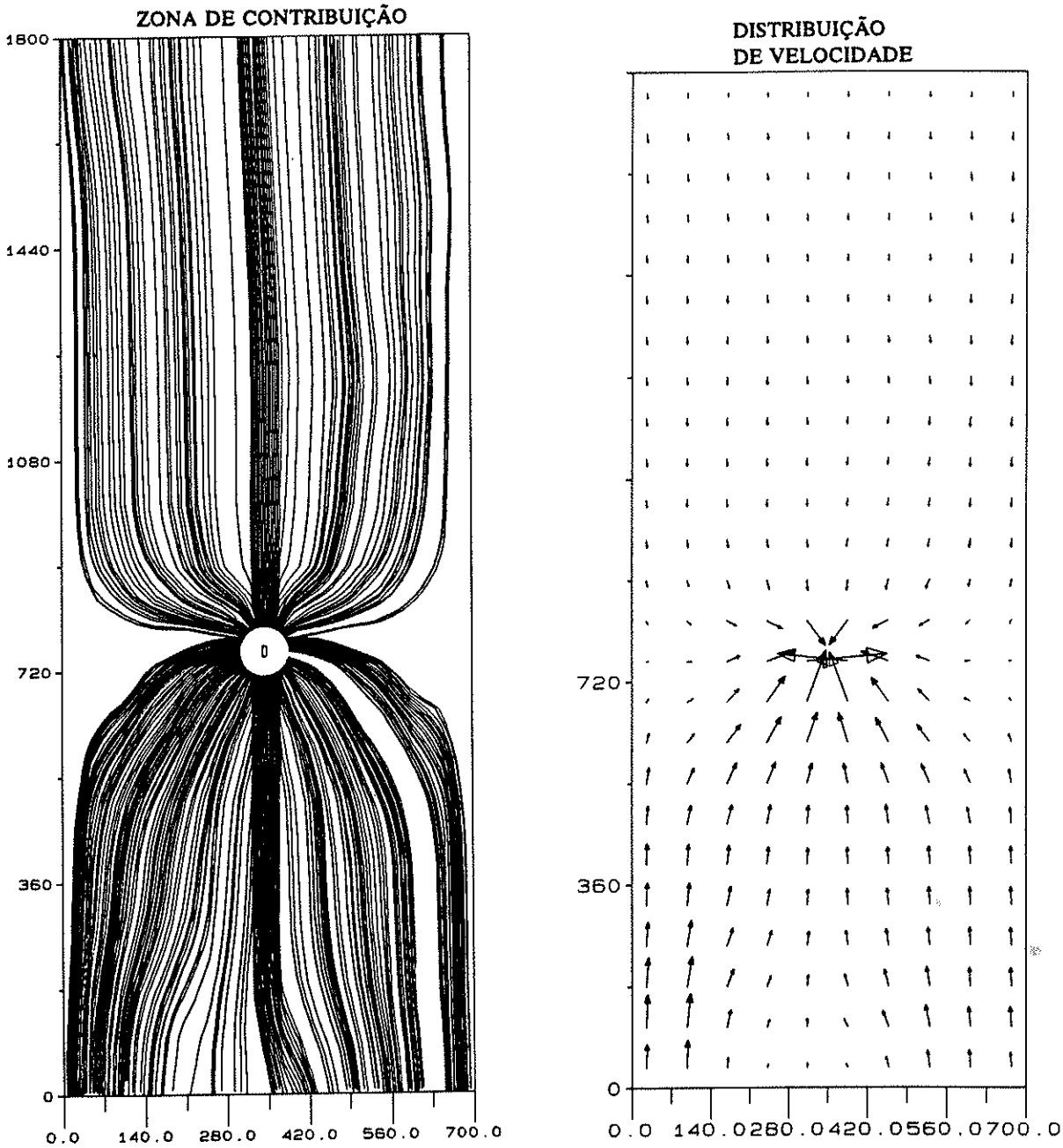


Figura 56 - Zona de contribuição desenvolvida no aqüífero heterogêneo I. Os rios a montante e a jusante fornecem recarga induzida.

11.5.2 EFEITO DE GEOLOGIA HETEROGÊNEA II

Considerando-se que em torno do poço bombeando ocorre uma área mais extensa de condutividade hidráulica (K_1) (Figura 57), maior do que a condutividade K_3 a montante e a jusante, confirma-se a ocorrência do efeito de diluição nos primeiros momentos do bombeamento. Esta diluição faz a concentração de benzeno decair ainda mais rapidamente do que quando K_1 em torno do poço restringe-se a um pequeno bloco no aqüífero heterogêneo I (mostrado na Figura 54). O tempo de remediação aumenta em um ano (passa a ser de 48 anos), como mostra a Figura 58, enquanto que o período de concentração assintótica inicia-se em torno de quatro anos de bombeamento nestes dois aqüíferos (I e II).

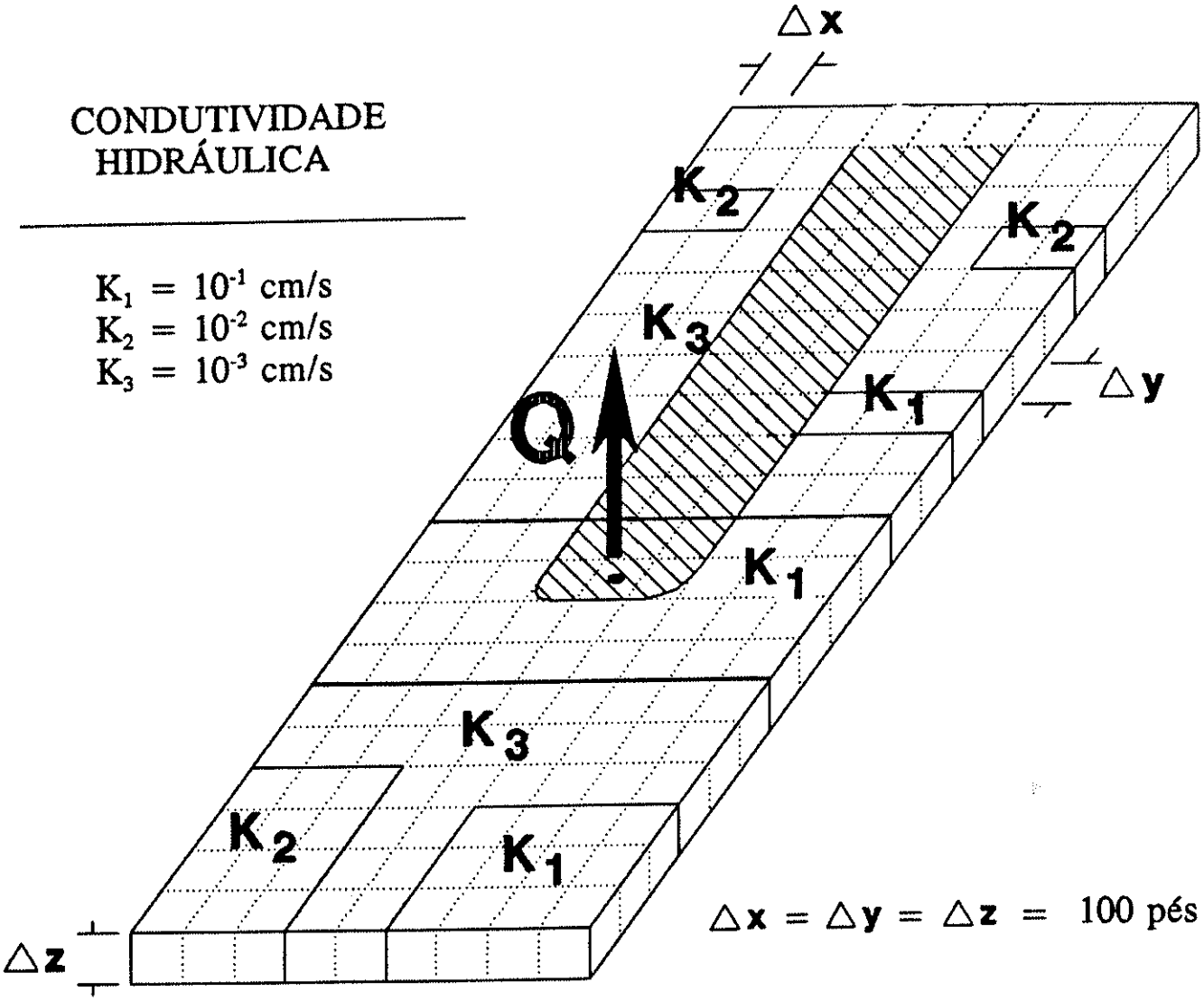


Figura 57 - Bloco diagrama mostrando a distribuição de blocos de condutividade hidráulica numa área de geologia heterogênea II.

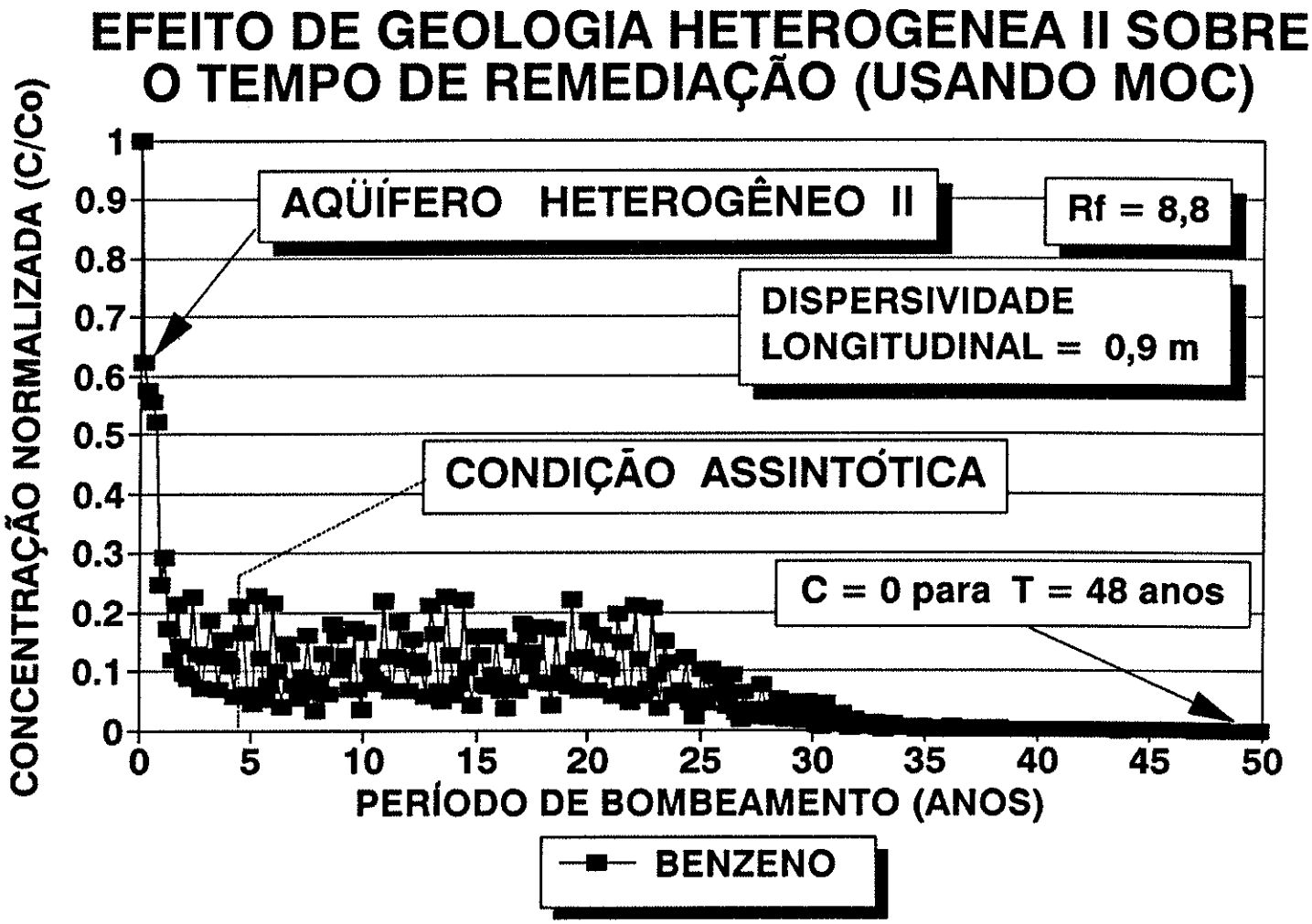


Figura 58 - Efeito de geologia heterogênea II sobre o tempo de remediação de pluma de benzeno.

A zona de contribuição do poço bombeando no aqüífero heterogêneo II recebe recarga induzida dos rios a montante e a jusante (Figura 59). Note que a ZC expande-se um pouco mais para os lados do que no aqüífero heterogêneo I, porque a área de K_1 em torno do poço naquele aqüífero (Figura 57) é menor.

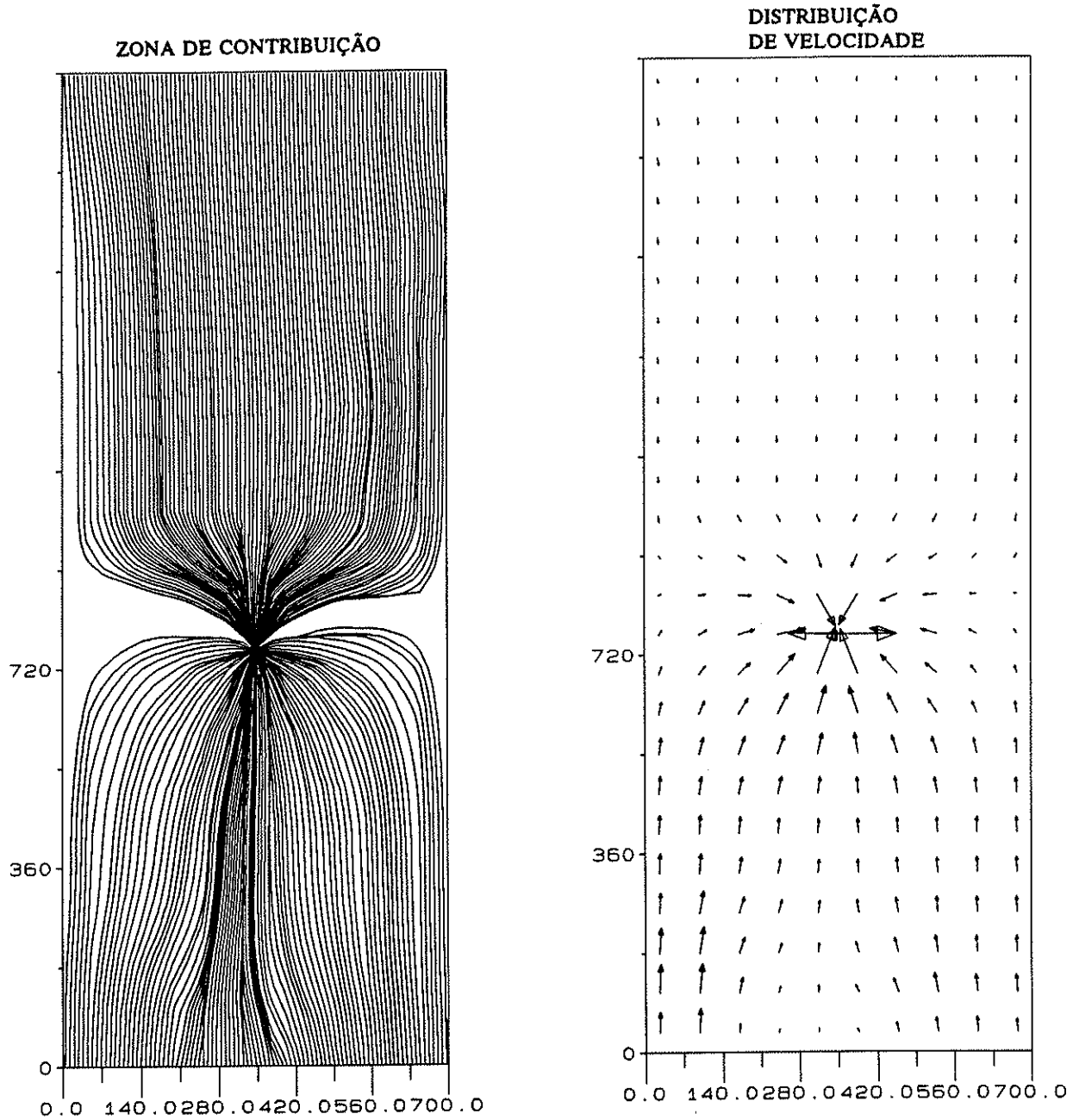


Figura 59 - Zona de contribuição desenvolvida em aqüífero heterogêneo II. O tamanho maior dos vetores de velocidade indicam os caminhos mais fáceis de serem percorridos dentro deste aqüífero.

11.5.3 EFEITO DE GEOLOGIA HETEROGÊNEA III

A distribuição dos blocos de condutividade hidráulica para esta simulação é mostrada na Figura 60. Neste aqüífero heterogêneo III, a pluma encontra-se totalmente sobre o meio poroso de condutividade hidráulica K_1. A montante e a jusante do poço domina o bloco de condutividade hidráulica K_3, com ocorrência de alguns blocos de condutividade hidráulica K_1 e K_2.

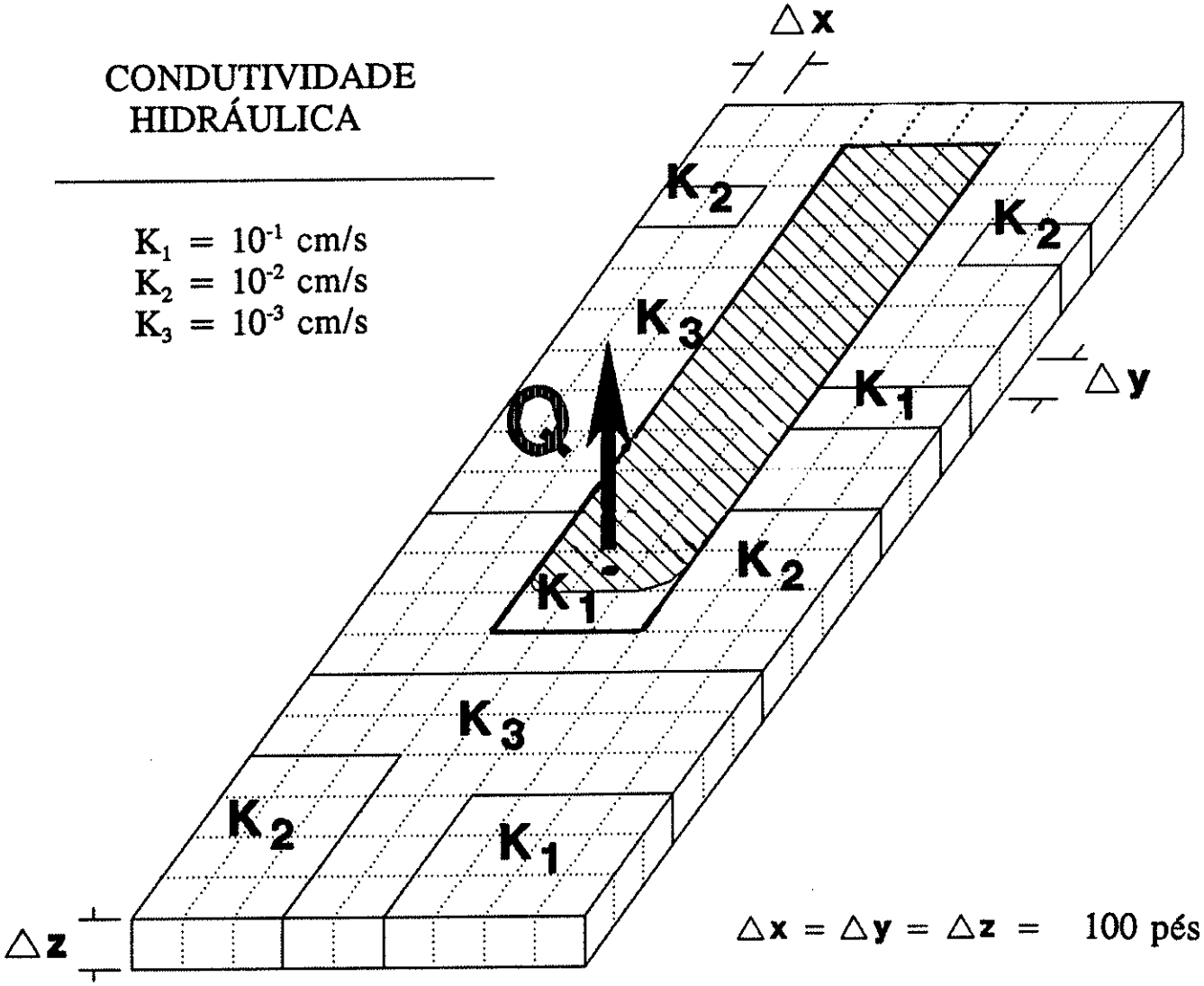


Figura 60 - Bloco diagrama de aqüífero heterogêneo III, mostrando a distribuição dos blocos de condutividade hidráulica.

A Figura 61 mostra os valores de concentração variando com o passar do tempo de bombeamento. O tempo de remediação é de 16 anos, cerca de 5 anos a mais do que aquele necessário para levar as concentrações a zero quando o aqüífero é homogêneo (Figura 53). O processo é mais lento porque, apesar da pluma estar sobre K_1, a zona de contribuição bombea água de zonas de menor condutividade hidráulica (K_2 e K_3) em torno da pluma. A remoção da contaminação é mais rápida do que quando a pluma encontra-se também sobre K_3 (Figuras 55 e 58), mas somente em torno de 4 anos a concentração atinge a metade do seu valor.

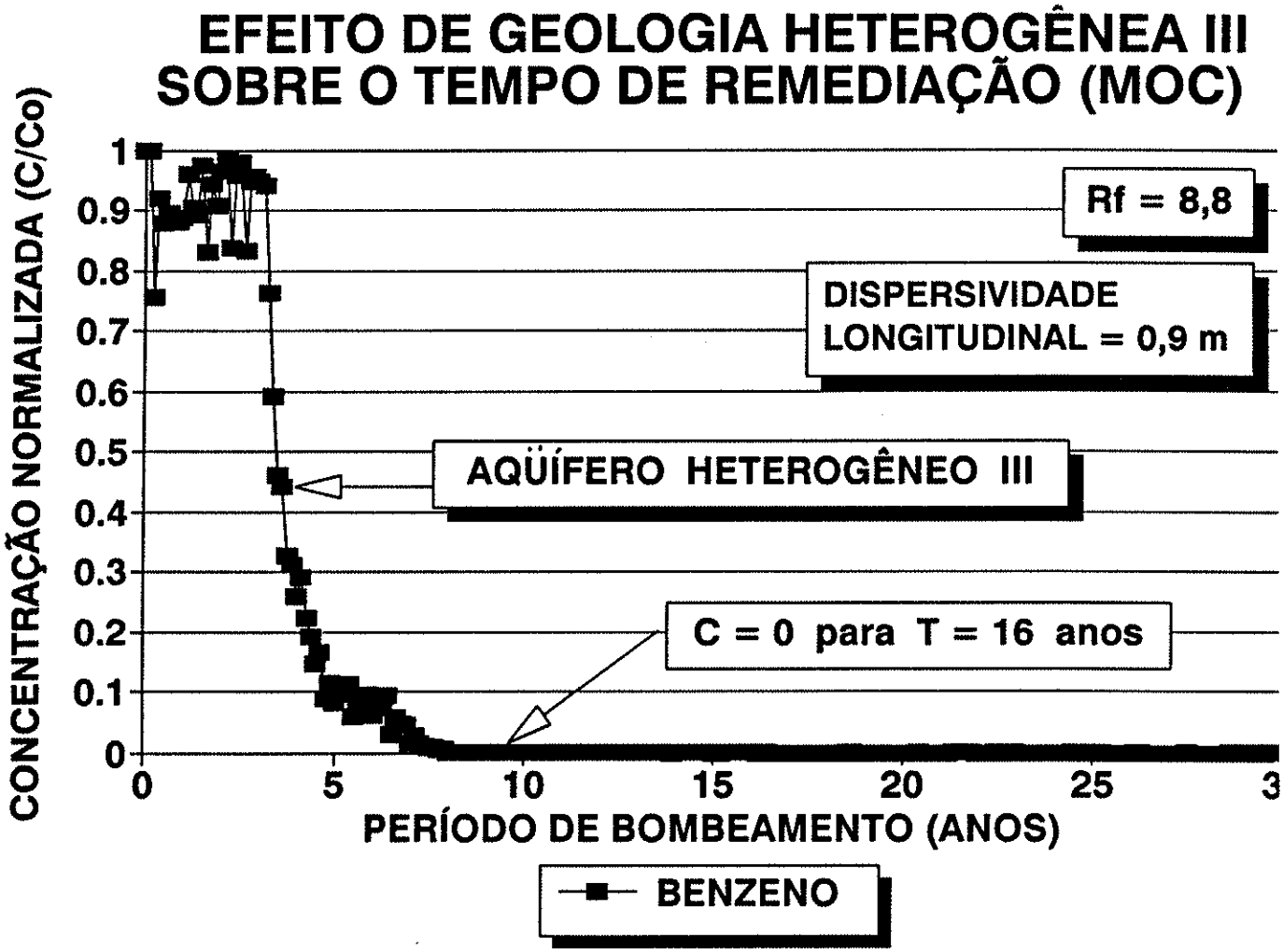


Figura 61 - Efeito de geologia heterogênea III sobre o tempo de remediação de pluma de benzeno.

A zona de contribuição criada pelo poço bombeando, quando toda a pluma de contaminação encontra-se sobre o bloco de condutividade hidráulica K_1, só recebe recarga induzida do rio localizado a montante do poço (Figura 62).

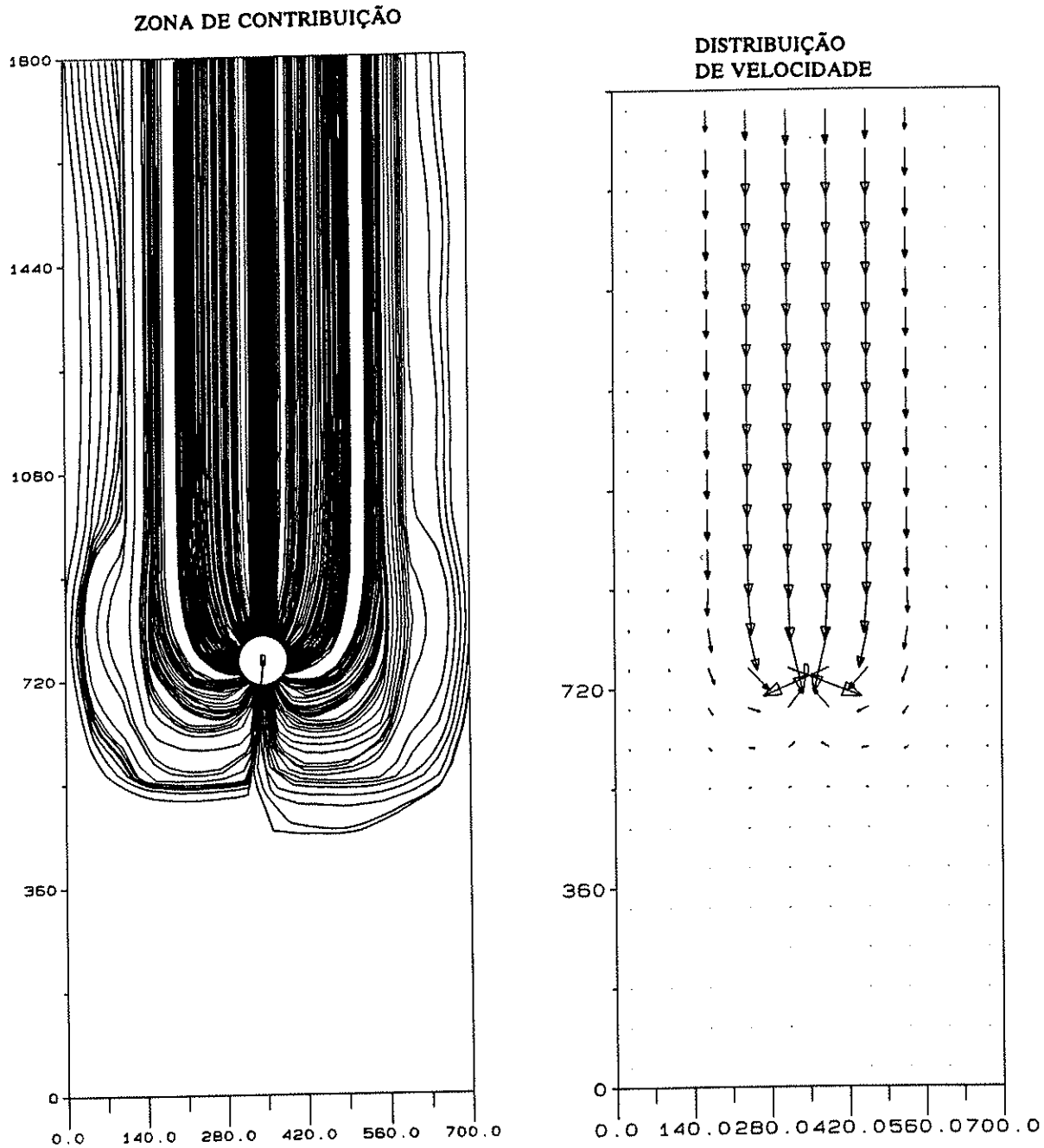


Figura 62 - ZC do poço bombeando sobre aqüífero heterogêneo III. O rio a montante fornece recarga induzida ao poço. A água subterrânea move-se a uma velocidade muito baixa (pequenos vetores de velocidade), fora do local de ocorrência da pluma (K_1).

12. CONCLUSÕES

Dentre os métodos, sugeridos pelas emendas ao SDWA (1986), para a determinação de uma área de proteção de poço, está o de modelos numéricos de fluxo e de transporte. Trata-se de uma ferramenta mais sofisticada do que os modelos analíticos porque além de levar em consideração os muitos fatores que afetam a forma, tamanho e direção da APP que se deseja definir, permite que se considerem as heterogeneidades do aqüífero em estudo.

Este trabalho demonstra que o uso dos modelos matemáticos na definição das APPs é de grande valia. A possibilidade da inclusão de fontes de contaminação na APP, expondo à inutilização da água subterrânea que contribui para poço municipal, justifica que a delineação da APP seja a mais acurada possível. Os exemplos simulados mostraram o alcance do método de modelos matemáticos na previsão do impacto de determinadas situações sobre a APP.

Baseados nestas simulações as seguintes conclusões podem ser feitas:

1 - Sob geologia homogênea e isotrópica, a largura da APP para um único poço é inversamente proporcional a transmissividade (T = Kb) e ao gradiente (i), mas diretamente proporcional à taxa de bombeamento (Q). Os cálculos utilizam o Modelo Analítico de Fluxo Uniforme (U.S.EPA, 1987) ou Curvas-tipo de zonas de captura (Javandel and Tsang, 1986)

2 - Sob geologia heterogênea, o critério de tempo de trânsito (TT) pode ser utilizado para a delineação da APP. O tamanho da APP é então diretamente proporcional ao valor da condutividade hidráulica (K). Quanto mais condutor o aqüífero, maior a APP para um determinado tempo de trânsito.

3 - Anisotropia resulta em inesperadas direções de desenvolvimento de APPs, que são melhor delineadas com o uso de um modelo matemático.

4 - A porosidade efetiva para fluxo (n_{ef}) é inversamente proporcional ao tamanho de APPs para tempo específico. Quanto menor o n_{ef}, maior a velocidade da água subterrânea, e, por conseguinte, maior a distância que um contaminante pode percorrer neste tempo específico.

5 - Sob gradientes naturais e aqüífero homogêneo e isotrópico, as equipotenciais em torno de um poço bombeando são elipsoidais ao longo da direção de fluxo, mas as curvas de rebaixamento, talvez para a surpresa de muitos hidrogeólogos, são círculos concêntricos. Esta tese mostrou que os modelos matemáticos em computadores disponíveis não levam em consideração a declividade da base do aqüífero, gerando sempre curvas de rebaixamento circulares, mesmo quando a declividade da base do aqüífero é bastante acentuada e as curvas são teoricamente elipsoidais, segundo Hantush (1964) e segundo figuras incluídas no guia de delineação de APP, preparado pelo U.S.EPA (1987b).

6 - A heterogeneidade de um aqüífero, quando levada em consideração, produz os efeitos mais surpreendentes na forma, tamanho e direção da APP, somente determinados se um modelo numérico for utilizado.

Entre as implicações para o fato de utilizar-se rebaixamento como critério de delineação de APP está a possibilidade de desconsiderar-se uma fonte de contaminação que na realidade é englobada pela curva elipsoidal de rebaixamento. Esta possibilidade existe sempre que se desconsiderar qualquer um dos parâmetros que influem na forma, tamanho e direção da APP. Foi mostrado nesta tese que os efeitos destes parâmetros são surpreendentes e difíceis de serem avaliados sem o uso de modelos matemáticos em computadores.

O uso desses modelos matemáticos vai muito além da determinação das APPs. Eles podem ser empregados também para avaliar os efeitos de heterogeneidades geológicas, e de processos atenuantes de transporte num esquema de descontaminação, ou para testar a eficácia do esquema escolhido. Estes efeitos foram investigados na parte II desta tese. Justifica-se a preocupação com os esquemas de descontaminação porque às vezes a prevenção contra a

poluição chega tarde, e a fonte de abastecimento ameaçada pode ser a única de que se dispõe.

Entre os resultados das simulações realizadas na parte II desta tese, pode-se concluir que:

1 - Esta tese mostrou que para razões físicas simples, isto é, a heterogeneidade do aqüífero, pode-se produzir efeitos freqüentemente observados no campo, no caso, a condição assintótica da concentração de águas bombeadas em esquemas de remediação. É possível que esta seja a verdadeira causa do comportamento observado no campo, e não as muitas causas físico-químicas teóricas e complicadas atribuídas por muitos na literatura.

2 - A heterogeneidade do aqüífero sendo remediado, envolve meios de baixa e de alta condutividade hidráulica. Quando a extração da água contaminada, com o passar do bombeamento, começa a acontecer nas áreas de menor condutividade hidráulica, somente pequenas quantidades conseguem ser retiradas ("sangradas"), que sofrem diluição ao passarem por áreas de maior condutividade. O resultado são as baixas concentrações medidas na água bombeada, que se mantêm constante até que a contaminação seja retirada destas áreas de baixa condutividade.

3 - Em poços de remediação a condição assintótica da concentração pode representar um aumento significativo do tempo de bombeamento necessário até que uma concentração pré-estabelecida, menor do que aquela em torno da qual a concentração se mantém, seja obtida. Um tempo previsto de 9,7 anos, necessários para a remediação de uma pluma de benzeno (R_f = 8,8) que se encontra em aqüífero idealisticamente pressuposto como homogêneo e isotrópico, passa a ser quase cinco vezes maior, 48 anos, quando a heterogeneidade do aqüífero é realisticamente considerada.

4 - A dispersividade afeta diretamente o tempo de um esquema de remediação por bombeamento e tratamento de um aqüífero. Não existe uma fórmula que relacione o tempo adicional de bombeamento num esquema de remediação ao valor da dispersividade assumida para aquele aqüífero, mas as simulações utilizando-se

modelos de transporte advectivos-dispersivos podem mostrar o efeito desta relação. Num aqüífero homogêneo, por exemplo, um tempo de remediação de 1,04 anos passa a ser de 1,6 anos, quando a assume-se que a dispersividade longitudinal (na direção da velocidade real) é de 3 pés (0,9144 m).

5 - O coeficiente de retardamento (R_f) de um contaminante afeta o tempo de remediação de um aqüífero homogêneo e isotrópico segundo a fórmula simples: o tempo de remediação de um contaminante que sofre retardamento é igual ao tempo para remediar um contaminante que não adsorve ou decai, multiplicado pelo coeficiente que mede este retardamento (R_f). O 1,1,1-Tricloroetano (1,1,1-TCA), por exemplo, R_f igual a 2, requer pela fórmula um tempo de 2 vezes 1,04 anos (2,08 anos) de bombeamento, para ser remediado de um aqüífero homogêneo e isotrópico. O tempo total, no entanto é de 2,6 anos, porque a dispersividade longitudinal de 3 pés (0,9144 m) é considerada para a simulação.

6 - De todos os parâmetros investigados, a heterogeneidade é, também nos esquemas de remediação, aquele que causa os efeitos mais surpreendentes no tempo de remediação.

Os computadores devem ser considerados não só na delineação da APP, ou na remediação de contaminação que tenha ocorrido na APP, mas já na fase inicial da implementação de um programa de proteção de poço, para a geração de um banco de dados (equivalente ao GIS (Global Information System) em operação nos Estados Unidos) para, entre outros usos, auxiliar nos PPPs das municipalidades) contendo:

- ***o cadastramento das fontes de poluição dentro da área de proteção de poço e as ocorrências de casos históricos envolvendo essas fontes.***

- ***as características hidrodinâmicas do aqüífero ou multi-aqüíferos, dados coletados de***

rebaixamento e/ou carga hidráulica, e dados das concentrações dos contaminantes envolvidos (obtidos através da coleta e análise da água do poço).

13. BIBLIOGRAFIA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. 1991. Technological Limits of Groundwater Remediation: A Statistical Evaluation Method. Health and Environmental Sciences Department. API Publication number 4510. Washington, D.C. 67 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. 1990. A Compilation of Field-Collected Cost and Treatment Effectiveness Data for the Removal of Dissolved Gasoline Components from Groundwater. Health And Environmental Sciences Department. API Publication number 4525. Washington, D.C.

ANDERSON, M.P. and WOESSNER, W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. San Diego, California. 391 p.

BEAR, J. and VERRUIJT, A. 1987. Modeling Groundwater Flow and Pollution with Computer Programs for Sample Cases. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland. 414 p.

BEAR, J. 1979. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill Inc. Israel. 567 p.

BLANDFORD, T.N. and HUYAKORN, P. 1989. An Integrated Semi-analytical model for the Delineation of Wellhead Protection Areas. Relatório preparado por HydroGeologic, Inc. para o U.S.EPA, Office of Groundwater Protection. Washington, D.C.

CASWELL, BRAD. 1987. Anisotropy in Fractured Bedrock Aquifers: It can Be Helpful. Water Well Journal. pp. 32-33.

CH2M HILL. 1989. Update Biscayne Aquifer...Ahead to the future. Report prepared for U.S.EPA. Miami, FL. 15 p.

CLEARY,R.W., PINDER,G.F. & UNGS,M.F. 1992. IBM-PC Applications in Groundwater Pollution and Hydrology: a Hands-on Short Course. Princeton, NJ. Curso profissional de uma semana, todo janeiro e julho em Princeton, NJ, e San Francisco, CA. National Ground Water Association. 823 p.

CLEARY, R.W., MILLER, D.W., PINDER, G.F. 1992. Groundwater Pollution and Hydrology Princeton, NJ. Curso profissional de uma semana, todo Janeiro e Julho em Princeton, NJ e San Francisco, CA. OMNI Environmental Corporation. Princeton, NJ. 675 p.

CLEARY, R.W. 1991. Águas Subterrâneas. in Hidrologia Ambiental. Coleção da ABRH, Editora da USP. v. 3, pp. 223-312.

CLEARY, R.W. 1989. Águas Subterrâneas. in Engenharia Hidrológica. Coleção da ABRH, Editora UFRJ. v. 2, pp. 291-404.

CLEARY, R.W. & CLEARY, T.C.B.F. 1988. Aplicações de Microcomputadores em Hidrologia e Poluição de Água Subterrânea. Anais do 5° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, ABAS, p. 186-195.

CLEARY, R.W. 1988b. Avançados Métodos de Campo e de Microcomputadores para Avaliação de Poluição de Aqüíferos com uma Aplicação no Lixão de Novo Horizonte - São Paulo. Anais do 5° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, ABAS, p. 216-225.

CLEARY, T.C.B.F. & CLEARY, R.W. 1992. MOC: THEORY & LABORATORY EXERCISE. in IBM-PC Applications in Ground Water Pollution and Hydrology: A Hands-on Short Course. Princeton, NJ. Curso profissional de uma semana, todo janeiro e julho. National Ground Water Association. capítulo 5. Teoria sobre MOC pp. MOC1-15 e manual de laboratório pp. MOC1-86.

CLEARY, T.C.B.F. & CLEARY, R.W. 1991. MOC: THEORY & LABORATORY EXERCISE.in IBM-PC Applications in Ground Water Pollution and Hydrology: A Hands-on Short Course. Princeton, NJ. Curso profissional de uma semana, todo janeiro e julho. National Ground Water Association. capítulo 5. Teoria sobre MOC pp. MOC1-15 e manual de laboratório pp. MOC1-59.

CLEARY, T.C.B.F. & CLEARY, R.W. 1990. Delineation of Wellhead Protection Areas: Theory and Practice. Anais do International Seminar of Pollution, Protection and Control of Ground Water. ABAS, ABES and IAWPRC. Porto Alegre, RS. pp. 140-151.

CLEARY, T.C.B.F. & CLEARY, R.W. 1988b. Avançados Métodos de Campo e de Microcomputadores para a Avaliação de Poluição de Aqüíferos com uma Aplicação no Lixão de Novo Horizonte - São Paulo. Anais do 5º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS. São Paulo, SP. pp. 216-225.

CODE OF METROPOLITAN DADE COUNTY. 1989. Proposed West Wellfield Interim Protection Ordinance. Miami, FL.

DAGGETT, C.J. 1989. New Jersey Well Head Protection Program Plan. New Jersey Department of Environmental Protection and Energy. 31 p.

DAVIS, A.D. 1986. Deterministic Modeling of Dispersion in Heterogeneous Permeable Media. Groundwater. v. 24, no. 5, pp. 609-615.

DOMENICO, P.A. and SCHWARTZ, F.W. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley and Sons, Inc. New York. 824 p.

EL-KADI, ALY I. 1988. Applying the USGS Mass-Transport Model (MOC) to Remedial Actions by Recovery Wells. Groundwater. v.26, no. 3, pp. 281-288.

FERREIRA, J.P.LOBO. 1988. A Comparative Analysis of Mathematical Mass Transport Codes for Groundwater Pollution Studies. in Groundwater Flow and Quality Modelling. NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences. Published by Reidel Publishing Company. v.224, pp.699-716.

FINDIKAKIS, A.N. & I.T. FINDIKAKI. 1989. Comparison of Two Approaches to the Flow and Transport Simulation of Three-Dimensional Ground Water Systems. in Proceedings of the NWWA Conference on Practical Applications of Groundwater Models. v.1, pp 783-795.

FRANZ, T. & N. Guiguer. 1990. FLOWPATH: 2D horizontal aquifer simulation model. Waterloo hydrogeologic software. Waterloo, ON, Canada. 72 p.

GARABEDIAN, S.P., LeBLANC, D.R., GELHAR, L.W. and CELIA, M.A. 1991. Large-Scale Natural Gradient Tracer Test in Sand and Gravel, Cape Cod, Massachusetts. 2. Analysis of Spatial Moments for a Nonreactive Tracer. Water Resources Research, Vo. 27, no. 5. pp. 911-924.

GIGGY, C.L. & G.H. SWETT. 1989. Ground Water Treatment of Non Volatile Organics. in Proceedings of The Third National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring and Geophysical Methods. Orlando, FL. pp. 109-119.

GOODE, D.J. and KONIKOW, L.F. 1989. Modification of a Method-of-Characteristics Solute-Transport Model to Incorporate Decay and Equilibrium-Controlled Sorption or Ion Exchange. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 89-4030. 65 p.

HANTUSH, M.S. 1964. Hydraulics of Wells. Reprinted from Advances in hydroscience, vol. 1. Academic Press Inc., New York. 442 p.

JAVANDEL, I. and TSANG, C. 1986. Capture-Zone Type Curves: a Tool for Aquifer Cleanup. GroundWater. Vol. 24. No. 5. p. 616-625.

KING, F.H. and SLICHTER, C.S. 1899. Principles and Conditions of Movements of Groundwater with a Theoretical Investigation of the Motion of Groundwater. Extract from the Nineteenth Annual Report of the Survey, 1987-98. Part II - Papers chiefly of a theoretic nature. Washington, D.C. pp. 368-382.

KINZELBACH, W. 1986. Groundwater Modelling: An Introduction with Sample Programs in BASIC. Series Developments in Water Science. Elsevier Publishers. Amsterdam, The Netherlands. 333 p.

KINZELBACH, W. 1987. Methods for the Simulation of Pollutant Transport in Ground Water - A Model Comparison. in Proceedings of the NWWA Conference on Practical Applications of Groundwater Models. v.1, pp. 656-674.

KONIKOW, L.F. and BREDEHOEFT, J.D. 1978. Computer Model of Two-Dimensional Solute Transport and Dispersion in Groundwater. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations. Book 7, chapter C2.

LARSON, S.P., ANDREWS, C.B., HOWLAND, M.D., FEINSTEIN, D.T. 1987. Three-Dimensional Modeling Analysis of Ground Water Pumping Schemes for Containment of Shallow Ground Water Contamination. in Proceedings of the Conference on Solving Ground Water Problems with Models. Denver, CO. vol. 1, pp. 517-531.

MACKAY, D.M. 1990. Characterization of the Distribution and Behavior of Contaminants in the Subsurface. in Ground Water and Soil Contamination Remediation: Toward Compatible Science, Policy, and Public Perception. Report on a Colloquium Sponsored by the Water Science and Technology Board. Colloquium 5 of a Series. National Academy Press. Washington, D.C. pp. 70-90.

MARSILY, GHISLAIN DE. 1986. Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. Translated by Gunilla de Marsily. Academic Press, Inc. London.

McDONALD, M.G. & HARBAUGH, M.G. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. "Tecniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey", Modeling Techniques. Vol.6, Cap. A1.

MERCER, J.W., SKIPP, D.C. and GIFFIN, D. 1989. Basics of Pump-and-Treat Ground-Water Remediation Technology. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Developement and U.S.EPA. 31 p.

MOORE, B.A. et al. 1989. Strategy for Delineation and Detection Monitoring of the Fulbright Springhead Protection Area, Springfield, Missouri. Artigo não publicado. 15 p.

MOORE, B.A., CATHCART, A.H. e DANOS, S.C. 1989. Littleton, Massachusetts' Wellhead Protection and Monitoring Strategy. Artigo não publicado. 17 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1990. Groundwater Models. 303 p.

NEW JERSEY DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION AND ENERGY. 1991. New Jersey Well Head Protection Program Plan. NJDEPE. Trenton, New Jersey. 84 p.

NYER, E.K. and MEHAN, D.G. 1991. How to Determine the End of Active Remediation. in Ground Water Monitoring Review. pp. 89-91.

PEKAS, B.S. 1992. Capture-zone Geometry Calculations with Spreadsheet Programs. in Proceedings of the Fifth International Conference on the Use of Models to Analyze and Find Working Solutions to Ground Water Problems. Solving Ground Water Problems with Models. National Ground Water Association, International Ground Water Modeling Center and the Association of Ground Water Scientists and Engineers. Dallas, Texas. pp. 653-666.

PLOMB, D.J. and ARNETT, K.M. 1992. Combining Groundwater Flow Modeling, Particle Transport, and GIS for Effective Wellhead Protection in the Greater Miami River Valley, Ohio. in Proceedings of the Fifth International Conference on the Use of Models to Analyze and Find Working Solutions to Ground Water Problems. Solving Ground Water Problems with Models. National Ground Water Association, International Ground Water Modeling Center and the Association of Ground Water Scientists and Engineers. Dallas, Texas. pp. 571-594.

REBOUÇAS, A.C. 1988. Groundwater in Brazil. EPISODES. Vol. 11, No. 3, pp. 209-214.

ROADCAP, G.S. and BAIR, E.S. 1990. Delineation of Wellhead Protection Areas in Semiconfined Aquifers Using Semianalytical Methods. in Wellhead Protection: An Anthology, 13 papers of importance. May of 1991. National Ground Water Association. Dublin, Ohio. pp. 399-412.

RUMBAUGH, J.O.III. 1991. QUICKFLOW™: Analytical 2D Ground-Water Flow Model. User's Manual. Geraghty and Miller, Inc., Modeling Group, Reston, VA. 100 p.

SATKIN, R.L. and BEDIENT, P.B. 1988. Effectiveness of Various Aquifer Restoration Schemes Under Variable Hydrogeologic Conditions. Groundwater. v.26, no. 4, pp. 488-498.

SCHOOLEY, J. 1989. Application of a Geographic Information System in New Jersey's Wellhead Protection Program. New Jersey Department of Environmental Protection and New Jersey Geological Survey. 12 p.

SHAFER, J.M. 1987b. GWPATH: Interactive Ground-Water Flow Path Analysis. Bulletin 69. Illinois State Water Survey. Champaign, Illinois.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1985. Guidance on feasibility studies under CERCLA. Prepared for the Hazardous Waste Engineering Research Laboratory and Offices of Emergency and Remedial Response, and Waste Programs Enforcement.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1987b. Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. Office of Groundwater Protection. Washington, D.C. 185 p.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1988. Wellhead Protection Area Delineation, A Hands-on Training Course. Fairfax, VA.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1988b. Model Assessment for Delineating Wellhead Protection Areas. Office of Groundwater Protection. Washington, D.C. 210 p.

VAN GENUCHTEN, M.Th. and CLEARY, R.W. 1979. Movement of Solutes in Soil: Computer-Simulated and Laboratory Results. in Soil Chemistry: B. Physico-Chemical Models. Series Developments in Soil Science 5B. Elsevier Scientific Publishing Company. Chapter 10. pp. 349-386.

VAN WAEGENINGH, H.G. 1985. Protection of the Groundwater Quality in Porous Permeable Rocks. in Theoretical Background, Hydrogeology and Practice of Groundwater Protection Zones. UNESCO. International Contributions to Hydrogeology; Vol. 6. pp. 111-121.

VARLJEN, M.D. and SHAFER, J.M. 1992. A Coupled Simulation-Optimization Technique for Protecting Municipal Ground-Water Supplies from Contamination. in Proceedings of the Fifth International Conference on the Use of Models to Analyze and Find Working Solutions to Ground Water Problems. Solving Ground Water Problems with Models. National Ground Water Association, International Ground Water Modeling Center and the Association of Ground Water Scientists and Engineers. Dallas, Texas. pp 381-393.

WALTERS, R.R. 1987. Dade County, Florida, Case Study. in Planning for Groundwater Protection. Academic Press, Inc. pp. 205-239.

WANG, H.F. and ANDERSON, M.P. 1982. Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods. W.H. Freeman and Company. San Francisco, CA. 237 p.