

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA FORMA GEOMÉTRICA DE POÇOS E  
TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO NA PROPAGAÇÃO DE  
CONTAMINANTES EM REGIÃO DE SOLO SATURADO**

**JOÃO HENRIQUE MOREIRA DE SOUZA DANTAS**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO**  
**COORIENTADOR: LUAN CARLOS SENA MONTEIRO**  
**OZELIM**

**PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA – DF, 11 DEZEMBRO DE 2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA FORMA GEOMÉTRICA DE POÇOS E  
TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO NA PROPAGAÇÃO DE  
CONTAMINANTES EM REGIÃO DE SOLO SATURADO**

**JOÃO HENRIQUE MOREIRA DE SOUZA DANTAS**

**TRABALHO DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**PROF. LUAN CARLOS DE SENA MONTEIRO OZELIM, D. Sc. (UniCEUB)**  
**(COORDENADOR)**

---

**PROF. DEMETRIOS CHRISTOFIDIS, D.Sc. (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**PROFA. JOSELEIDE PEREIRA DA SILVA, D.Sc. (IFB)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA – DF, 11 DEZEMBRO DE 2015**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA DANTAS, JOÃO HENRIQUE MOREIRA

Influência da forma geométrica de poços e trincheira de infiltração na propagação de contaminantes em região de solo saturado [Distrito Federal] 2015.

xii, 124 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2015)

Trabalho de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem urbana

2. Poços de infiltração

3. Trincheira de infiltração

4. Pluma de contaminação

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA DANTAS, J. H. M. (2015). **Influência da forma geométrica de poços e trincheira de infiltração na propagação de contaminantes em região de solo saturado.** Trabalho de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 124p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Henrique Moreira de Souza Dantas

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Desafios de implantação de trincheiras e poços como mecanismos eficazes de infiltração

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

João Henrique Moreira de Souza Dantas

e-mail: joaoh.ms@gmail.com



## **AGRADECIMENTOS**

A minha família que sempre me apoiou.

Ao Orientador Professor José Camapum de Carvalho e ao Coorientador Luan Carlos De Sena Monteiro Ozelim, pela paciência, acompanhamento e aprendizados do mundo da engenharia.

Aos amigos do curso de engenharia civil que me acompanharam na reta final do curso.

Aos amigos Juliano Luiz Ferreira e ao Danilo Garcia Brandão, que começaram como colegas de colégio, viraram amigos, por coincidência viraram amigos de curso e sempre serão amigos da vida.

A Empresa Júnior Concreta Consultoria e Serviços pelos erros, aprendizados, diversão e visão mais aberta da relação do curso de Engenharia Civil com a vida empresarial.

## RESUMO

O fenômeno de drenagem ocorre naturalmente, seja superficial por meio da declividade do terreno ou pela infiltração no solo. No momento em que o homem ocupa uma certa região, ele altera o seu redor para adapta-lo ao seu estilo de vida, mas essa transformação do local geralmente afeta também o comportamento da drenagem. Para solucionar o problema do acúmulo de água gerado pela impermeabilização das áreas que ocupa e usa, o ser humano comumente se vale de tecnologias de drenagem. Hoje em dia, o método mais utilizado é a canalização da água pluvial até um curso d'água ou talvegue. Com o aumento das zonas impermeáveis, essa tecnologia vem mostrando problemas ambientais e ineficiência para acompanhar tal crescimento. Com isso, novas tecnologias foram desenvolvidas para solucionar esses problemas. Uma delas é a utilização de sistema de drenagem por infiltração. Essa tecnologia oferece a vantagem de possibilitar a recarga do aquífero compensando as áreas impermeabilizadas. A utilização de drenagem por infiltração gera alteração da umidade e do grau de saturação de água no solo, acarretando muitas vezes alteração no comportamento do perfil geotécnico e essas alterações podem gerar danos ambientais e danificar estruturas ao redor. Nessa monografia foram levantados os problemas conhecidos e as causas deles, como infiltração nos revestimentos; redução da capacidade de carga de fundações, pavimentos e contenções; desmoronamento de taludes de corte e de encostas. Outro fator levado em conta foi a poluição de aquíferos e recursos hídricos pelas águas infiltradas. Além das patologias capazes de ocorrer ao redor do sistema de infiltração, levantou-se também os problemas que podem ocorrer no próprio elemento de infiltração tanto estruturais quanto na redução da capacidade de infiltrar a água. Devido grande parte das patologias apresentadas ser dependente da geometria (largura, comprimento e profundidade) das valas, trincheira e poços, verificou-se a necessidade de estudar a influência desses parâmetros no funcionamento do sistema de infiltração. Pelo questionamento levantado, foram realizadas simulações numéricas para analisar a influência, na condição isolada, do formato de poços circulares e trincheiras retangulares, triangulares equiláteras e triangulares isósceles na propagação de um contaminante na região saturada do solo. Destaca-se que essa condição saturada ou quase saturada pode se dar por meio do próprio processo de infiltração ao longo da estação chuvosa.



# 1. SUMÁRIO

Capítulo	Página
1. SUMÁRIO.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. JUSTIFICATIVAS.....	4
1.2. OBJETIVOS.....	4
2. DESENVOLVIMENTO.....	5
2.1. Patologias externas oriundas da infiltração .....	5
2.1.1. Propagação de frente de umidade nas construções.....	5
2.1.2. Elementos estruturais.....	7
2.1.3. Pavimentação.....	10
2.1.4. Taludes de cortes e de encostas .....	11
2.1.5. Poluição de recursos hídricos .....	13
2.2. Patologias internas ao sistema de infiltração.....	14
2.2.1. Colmatação.....	14
2.2.2. Colapso interno.....	17
2.2.3. Recalque .....	17
2.2.4. Deterioração dos materiais constituintes do revestimento e preenchimento.....	19
2.2.5. Vida útil.....	19
2.3. Execução.....	20
3. PARÂMETROS .....	22
3.1. Parâmetros .....	23
3.1.1. Hidrológicos .....	23
3.1.2. Geotécnicos .....	23
3.2. Formato.....	24
3.3. Preenchimento .....	24
3.4. Revestimento .....	25

3.5.	Fator de segurança.....	25
3.6.	Avaliação da zona de influência no maciço segundo a intensidade e regime de precipitação .....	26
3.7.	Transporte de poluentes para as zonas não saturada e saturada do maciço.....	27
3.7.1.	Difusão .....	28
3.7.2.	Advecção .....	28
3.7.3.	Dispersão .....	29
4.	METODOLOGIA.....	30
4.1.	Descrição da metodologia para a análise de casos e de parâmetros.....	31
4.1.1.	Modelo numérico.....	31
4.1.1.1.	Geometria, condições iniciais e malha.....	32
4.2.	Resultados e análise.....	35
•	Em relação ao formato.....	35
	Em relação ao alcance máximo .....	48
5.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	61
5.1.	Conclusão .....	61
5.2.	Sugestões para pesquisas futuras .....	62
6.	REFERÊNCIA .....	62
	APÊNDICE A - SCRIPT DO PROGRAMA MATHEMATICA .....	67
	APÊNDICE B - IMAGENS DAS ANÁLISES .....	73

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Influência da inundação dos solos em resultados de provas de carga com carregamento vertical (Fonte: modificado de Sales, 2000).....	8
Tabela 3.1 – Classificação hidrológica de solos segundo o SCS (Fonte: modificado <a href="http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/fmartins/Publica%C3%A7%C3%B5es/Tese%20Mestrado/T-CII.pdf">http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/fmartins/Publica%C3%A7%C3%B5es/Tese%20Mestrado/T-CII.pdf</a> , 7 janeiro de 2015) .....	24
Tabela 3.2- Coeficientes de segurança para o projeto de estruturas de infiltração (Fonte: modificado Bettess, 1996, apud Souza.2002) .....	26
Tabela 4.1 - Geometria e respectivas propriedades dos formatos de poços e trincheiras simuladas.....	32
Tabela 4.2 - Dados encontrados na geometria circular .....	55
Tabela 4.3 - Dados encontrados na geometria retangular .....	56
Tabela 4.4 - Dados encontrados na geometria triangula equilátera .....	56
Tabela 4.5 - Dados encontrados na geometria triangular retangular isósceles .....	57
Tabela 4.6 - Dados encontrados para diferentes formatos com mesma .....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ilustração do conceito convencional e de BMP (Fonte: Canholi, 2005 apud Restrepo, 2010) .....	2
Figura 1.2– Poço de infiltração .....	3
Figura 1.3 – Trincheira de infiltração. (Fonte: modificado de Bettess, 1996) .....	3
Figura 2.1 – Relação entre condutividade hidráulica saturada e carga sólida acumulada (FONTE: Ishisaki, 1996 apud Souza. 2002) .....	15
Figura 2.2 – Evolução da vazão infiltrada em função do tempo (FONTE: Detay <i>et al</i> , 1994 apud Souza, 2002).....	16
Figura 2.3 – Condições do geotêxtil no interior da trincheira após 33 meses de utilização. (Fonte: Souza, 2002) .....	17
Figura 2.4 – Utilização de garrafas PET como material alternativo para preenchimento. (Fonte: Camapum de Carvalho & Lelis , 2011 apud Silva, 2012).....	18
Figura 4.1 - Representação do estado inicial da análise em 2D .....	34
Figura 4.2 - Formato Circular com raio igual a 0,5m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1 .....	35
Figura 4.3 - Formato Quadrado dimensão 0,78 x 0,79 m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0.....	36
Figura 4.4 - Formato Retangular dimensão 0,3 x 1,27 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,1, (c) 1. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0.....	36
Figura 4.5 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 0,5m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1 .....	37
Figura 4.6 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 0,92m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1 .....	37
Figura 4.7 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 0,37 e 1,36 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,1, (c) 1.....	38
Figura 4.8 - Formato Circular com raio igual a 1,0m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1 .....	38
Figura 4.9 - Formato Quadrado dimensão 1,57 x 1,57 m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para	

apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo o padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0.....	39
Figura 4.10 - Formato Quadrado dimensão 0,60 x 2,54 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,5, (c) 4. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo o padrão do domínio o valor desta área em branca é 0,0. ....	39
Figura 4.11 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 2,09m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1 .....	40
Figura 4.12 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 1,84m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1 .....	40
Figura 4.13 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 0,74 e 2,72 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,5, (c) 4. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo o padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0 .....	41
Figura 4.14 - Formato Circular com raio igual a 1,5m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.....	41
Figura 4.15 - Formato Quadrado dimensão 2,36 x 2,35 m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.....	42
Figura 4.16 - Formato Retangular dimensão 0,90 x 3,81 m e no tempo (a) 0,05, (b) 2, (c) 15. ....	42
Figura 4.17 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 3,14m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0 .....	43
Figura 4.18 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 2,76m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.....	43
Figura 4.19 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 1,11 e 4,08 m e no tempo (a) 0,05, (b) 1, (c) 8.....	44
Figura 4.20 - Formato Circular com raio igual a 2,0m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.....	44
Figura 4.21 - Formato Quadrado dimensão 3,14 x 3,14 m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.....	45
Figura 4.22 - Formato Retangular dimensão 1,2 x 5,08 m e no tempo (a) 0,05, (b) 2, (c) 20. ....	45
Figura 4.23 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 4,19m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2. ....	46
Figura 4.24 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 3,68m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.....	46

Figura 4.25 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 1,5 e 5,43 m e no tempo (a) 0,05, (b) 2, (c) 15.....	47
Figura 4.26 – Medidas de referência dos poços para região até 10% de concentração .....	48
Figura 4.27 – Medidas de referência de trincheiras Retangulares para região até 10% de concentração.....	49
Figura 4.28 – Medidas de referência das trincheiras Triangulares Equiláteras para região até 10% de concentração.....	50
Figura 4.29 - Medidas de referência das trincheiras Triangulares Retangular Isósceles para região até 10% de concentração .....	51
Figura 4.30 – Medidas de referência dos poços para região até 1% de concentração .....	52
Figura 4.31 – Medidas de referência de trincheiras Retangulares para região até 1% de concentração.....	53
Figura 4.32 – Medidas de referência das trincheiras Triangulares Equiláteras para região até 1% de concentração .....	54
Figura 4.33- Medidas de referência das trincheiras Triangulares Retangular Isósceles para região até 1% de concentração .....	55
Figura 4.34 – Relação área da base da com raio da pluma contaminante estabilizada.....	58
Figura 4.35 - Circular Raio 1,5m Tempo 20 .....	59
Figura 4.36 - Retangular 1,0 x 7,07 m Tempo 20 .....	59
Figura 4.37 - Triângulo retângulo catetos 2 e 7,07m Tempo 20.....	59
Figura 4.38 - Retangular 0,5 x 14,14m Tempo 20 .....	60
Figura 6.1 – Circular com Raio 0,5m e tempo 0,005 .....	74
Figura 6.2 – Circular com Raio 0,5m e tempo 0,05 .....	74
Figura 6.3 – Circular com Raio 0,5m e tempo 0,1 .....	74
Figura 6.4– Circular com Raio 0,5m e tempo 0,5 .....	75
Figura 6.5 – Circular com Raio 0,5m e tempo 1 .....	75
Figura 6.6 – Circular com Raio 0,5m e tempo 2,5 .....	75
Figura 6.7 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,005 .....	76
Figura 6.8 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,05 .....	76
Figura 6.9 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,1 .....	76
Figura 6.10 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,5 .....	77
Figura 6.11 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 1 .....	77
Figura 6.12 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 2 .....	77
Figura 6.13 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,005 .....	78

Figura 6.14 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,05 .....	78
Figura 6.15 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,1 .....	78
Figura 6.16 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,5 .....	79
Figura 6.17 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 1 .....	79
Figura 6.18 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 1,5 .....	79
Figura 6.19 – Triangulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,005.....	80
Figura 6.20 – Triangulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,05.....	80
Figura 6.21 – Triangulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,1.....	80
Figura 6.22 – Triangulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,5.....	81
Figura 6.23 – Triangulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 1.....	81
Figura 6.24 – Triangulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 1.....	81
Figura 6.25 – Circular com Raio 1m e tempo 0,005 .....	82
Figura 6.26 – Circular com Raio 1m e tempo 0,05 .....	82
Figura 6.27 – Circular com Raio 1m e tempo 0,1 .....	82
Figura 6.28 – Circular com Raio 1m e tempo 0,5 .....	83
Figura 6.29 – Circular com Raio 1m e tempo 1 .....	83
Figura 6.30– Circular com Raio 1m e tempo 11 .....	83
Figura 6.31 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,005 .....	84
Figura 6.32 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,05 .....	84
Figura 6.33 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,1 .....	84
Figura 6.34 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,5 .....	85
Figura 6.35 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 1 .....	85
Figura 6.36 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 8 .....	85
Figura 6.37 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,005 .....	86
Figura 6.38 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,05 .....	86
Figura 6.39 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,1 .....	86
Figura 6.40 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,5 .....	87
Figura 6.41 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 1 .....	87
Figura 6.42– Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 6 .....	87
Figura 6.43 – Triangulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,005.....	88
Figura 6.44 – Triangulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,05.....	88
Figura 6.45 – Triangulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,1.....	88
Figura 6.46 – Triangulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,5.....	89
Figura 6.47 – Triangulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 1.....	89

Figura 6.48 – Triângulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 1 .....	89
Figura 6.49 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 0,05 .....	90
Figura 6.50 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 0,1 .....	90
Figura 6.51 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 0,2 .....	90
Figura 6.52 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 1 .....	91
Figura 6.53 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 2 .....	91
Figura 6.54 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 20 .....	91
Figura 6.55 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 0,05 .....	92
Figura 6.56 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 0,1 .....	92
Figura 6.57 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 0,2 .....	92
Figura 6.58 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 1 .....	93
Figura 6.59 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 2 .....	93
Figura 6.60 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 20 .....	93
Figura 6.61 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 0,05 .....	94
Figura 6.62 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 0,1 .....	94
Figura 6.63 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 0,2 .....	94
Figura 6.64 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 1 .....	95
Figura 6.65 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 2 .....	95
Figura 6.66 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 2 .....	95
Figura 6.67 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 0,05.....	96
Figura 6.68 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 0,1.....	96
Figura 6.69 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 0,2.....	96
Figura 6.70 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 1.....	97
Figura 6.71 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 2.....	97
Figura 6.72 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 15.....	97
Figura 6.73 – Circular com Raio 2 m e tempo 0,05 .....	98
Figura 6.74 – Circular com Raio 2 m e tempo 0,1 .....	98
Figura 6.75 – Circular com Raio 2 m e tempo 0,2 .....	98
Figura 6.76 – Circular com Raio 2 m e tempo 1 .....	99
Figura 6.77 – Circular com Raio 2 m e tempo 2 .....	99
Figura 6.78 – Circular com Raio 2 m e tempo 20 .....	99
Figura 6.79 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 0,05 .....	100
Figura 6.80 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 0,1 .....	100
Figura 6.81 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 0,2 .....	100

Figura 6.82 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 1 .....	101
Figura 6.83 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 2 .....	101
Figura 6.84 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 20 .....	101
Figura 6.85 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 0,05 .....	102
Figura 6.86 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 0,1 .....	102
Figura 6.87 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 0,2 .....	102
Figura 6.88 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 1 .....	103
Figura 6.89 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 2 .....	103
Figura 6.90 - Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 20 .....	103
Figura 6.91 – Triangulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 0,05.....	104
Figura 6.92 – Triangulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 0,1 .....	104
Figura 6.93 – Triangulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 0,2.....	104
Figura 6.94 – Triangulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 1.....	105
Figura 6.95 – Triangulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 2.....	105
Figura 6.96 – Triangulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 2.....	105
Figura 6.97 – Circular com Raio 0,78m e tempo 0,5 .....	106
Figura 6.98 – Circular com Raio 0,78m e tempo 7 .....	106
Figura 6.99 – Retangular 2,0 x 2,0 m e tempo 1 .....	106
Figura 6.100 – Retangular 2,0 x 2,0 m e tempo 11 .....	107
Figura 6.101– Triangular equilátero com lados 4,5 m e tempo 2 .....	107
Figura 6.102 – Triangular equilátero com lados 4,5 m e tempo 20 .....	107
Figura 6.103 – Triangulo retângulo com catetos 3,0 m e tempo 1.....	108
Figura 6.104 – Triangulo retângulo com catetos 3,0 m e tempo 17.....	108

## 1. INTRODUÇÃO

As configurações pluviométricas, de disponibilidade de água potável e de problemas como secas, alagamentos e inundações a que os seres vivos estão submetidos atualmente são resultado de milhões de anos de transformações ocorridas na natureza.

No momento em que o ser humano ocupa uma região, ele modifica o meio na busca de construir um ambiente confortável para seu estilo de vida usual ou simplesmente para satisfazer a suas ambições sem que se elabore uma base de reflexão mais ampla envolvendo a qualidade de vida e a própria vida. Um dos métodos utilizados a centenas de anos pelo homem é a drenagem do excesso de água inconveniente na região considerada. O método consiste em recolher toda água proveniente das áreas impermeáveis de uma cidade e fazê-la desaguar em talwegues ou nos recursos hídricos próximos. Com isso, a água destinada a bacia hidrográfica é transmitida diretamente aos talwegues, córregos e rios até alcançarem um reservatório ou desembocar no mar ou oceano. Uma das principais componentes dessa água drenada é a água pluvial, cuja importância como mantenedora dos recursos hídricos das bacias hidrográficas é notória, mas não necessariamente seguindo os caminhos que lhe são impostos. Outra componente do volume drenado são os sedimentos erodidos que terminam contribuindo para o assoreamento de cursos d'água e reservatórios. Para esse tipo de método convencional, a água destinada a sustentar a bacia é rapidamente transportada para fora da região e como a vazão do rio é alterada em seu comportamento normal, surgem problemas de erosão, assoreamento e enchentes a jusante dos pontos de lançamento assim com escassez de água nas nascentes.

A drenagem da água não seria o vilão da história, mas certamente o modo como ela se dá muitas vezes o é. Por sua natureza a drenagem ocorre pela ação da energia externa, a gravidade, através do simples gradiente das cargas hidráulicas positivas, mas muitas vezes também ocorre pela ação da energia interna sucção ou capilaridade. Destaca-se que nesse estudo será dada ênfase apenas a questão da energia externa. Nesse caso, o real problema estaria no ponto de vista adotado para considerar as consequências provenientes do fluxo recorrente da água. A água proveniente da chuva flui até os pontos mais baixos pela superfície do solo (escoamento superficial) e, após a infiltração, através dos lençóis freáticos (escoamento subsuperficial e subterrâneo) ou por meio de movimentações da natureza capilar. Quando a camada superficial é menos permeável e quando se tem condições favoráveis de morfologia do terreno, a porção do escoamento superficial da água da chuva é maior que a subterrânea e conseqüentemente a vazão recebida no ponto mais baixo é alta.

A construção de cidades tende a aumentar a impermeabilização da superfície do solo, principalmente quando há um crescimento sem planejamento, gerando desconforto social e gasto com reparos causados pelos alagamentos. A solução adequada para evitar o surgimento de enchentes seria a redução do escoamento superficial, diminuindo as áreas impermeáveis e captando a água escoada e infiltrando-a ou usando-a. Essas ideias de reduzir os alagamentos e inundações estão presentes no BMP (Souza, 2002), Best Management Practices, que consiste na investigação do potencial para o uso dos sistemas de drenagem urbana sustentável e das melhores práticas de gerenciamento. A Figura 1.1 mostra o conceito convencional (esquerda) e o conceito de BMP (direita).

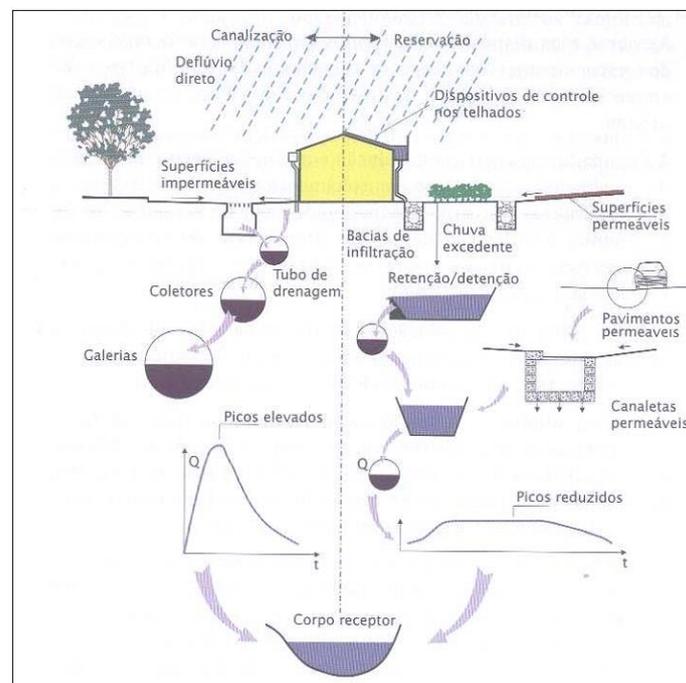


Figura 1.1 – Ilustração do conceito convencional e de BMP  
(Fonte: Canholi, 2005 apud Restrepo, 2010)

Uma das opções é a utilização de sistemas de drenagem por infiltração, como poços (Figura 1.2) e trincheiras (Figura 1.3). Além de se estar solucionando o problema de drenagem da cidade, também se vão alimentar os lençóis freáticos e aquíferos da bacia hidrográfica, contribuindo para aproximação do percurso original da água naquela região. Com isso, os rios terão amortização das vazões máximas e mínimas e quantidade maior de água no subterrâneo, provendo maior disponibilidade de acesso a água. É importante ressaltar que a acessibilidade facilitada não implica necessariamente em possibilidade de aumento do consumo. Deve-se adotar também uma política de consumo de água mais adequada.

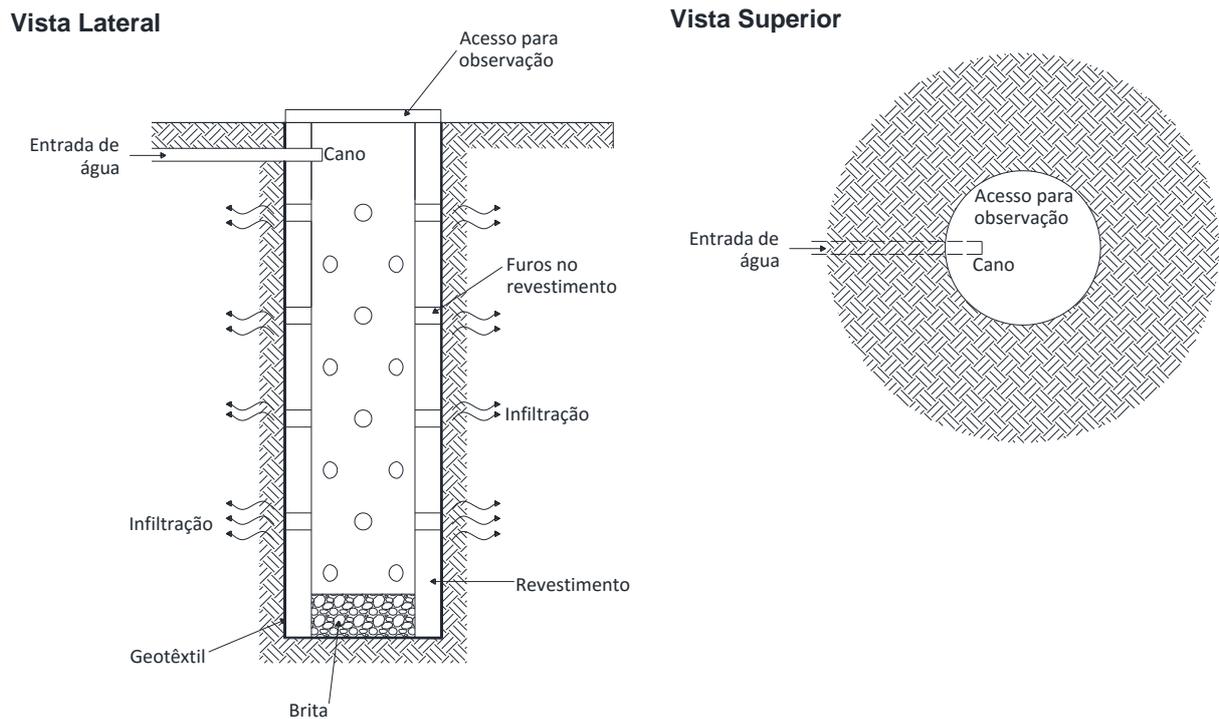


Figura 1.2– Poço de infiltração

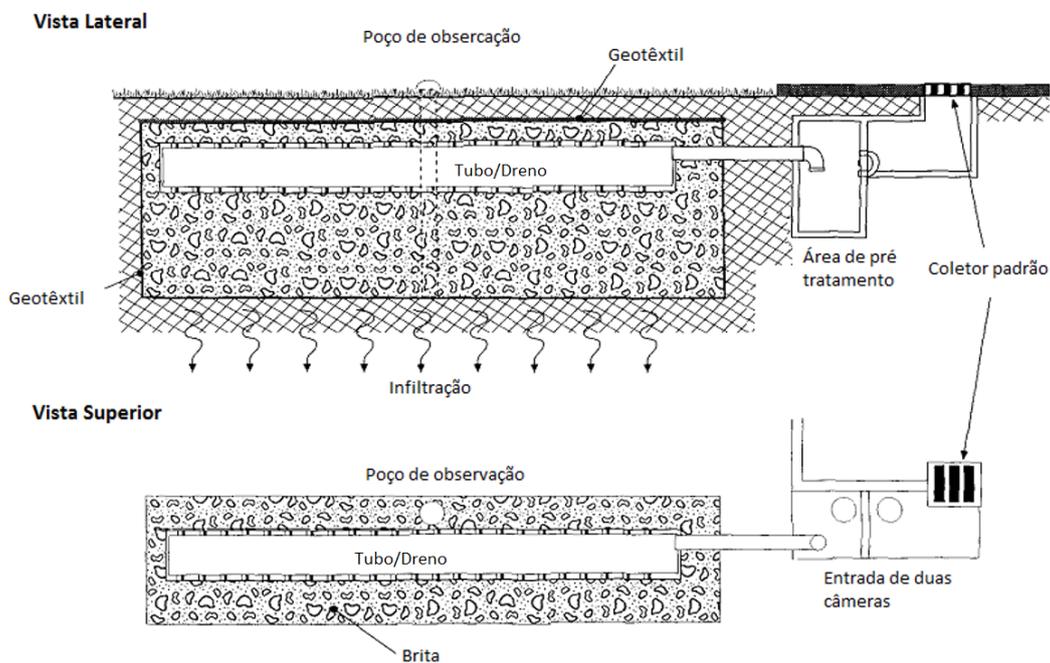


Figura 1.3 – Trincheira de infiltração.  
(Fonte: modificado de Bettess, 1996)

A utilização de poços e trincheiras é algo novo no Brasil e estudado desde meados do século 20 na Europa e nos Estados Unidos. O comportamento desses sistemas não foi estudado completamente e problemas podem ocorrer quando não projetados de forma adequada ao meio

físico existente. Um dos problemas mais sérios advindos da utilização de poços ou trincheiras de infiltração é o de contaminação do lençol d'água. Nota-se que ao facilitar a transferência de água da superfície para o interior do maciço, fica também facilitado o transporte de contaminantes que porventura podem estar ou não diluídos no fluido infiltrado.

### **1.1. JUSTIFICATIVAS**

A utilização de canalizações para drenagem de águas pluviais até os recursos hídricos é vista hoje em dia como um paradigma da engenharia, ou seja, mesmo sabendo dos problemas que esse tipo de drenagem proporciona, é utilizada como metodologia padrão de projeto haja vista ser utilizada a muitos anos. De acordo com Braga (1994), os sistemas de drenagem urbana tradicionais buscam se livrar da enchente o mais rápido possível por meio da construção de canais revestidos a fim de dar maior escoamento às vazões de cheias que passam, por consequência, a importunar quem vive a jusante. O problema não é apenas local, mas toda aquela região percorrida pela água que começa na chuva e fecha o ciclo na chuva novamente.

Apesar de existirem diversas teses sobre o assunto em destaque, há certa falta de bibliografias no Brasil que tratem de forma conjunta a incorporação de dispositivos de infiltração nas construções existentes ou nas novas, levando em conta a parte teórica e as situações locais da obra. Ao se propor orientações mais consistentes, proporciona-se a conscientização de tornar os dispositivos de infiltração fontes primordiais nas tomadas de decisões dos projetos de drenagem das águas pluviais.

### **1.2. OBJETIVOS**

A principal finalidade do presente trabalho é “compreender os requisitos e dificuldades de implantação de um sistema de infiltração para drenar águas pluviais tanto de casas e prédios quanto de pavimentos impermeáveis no meio urbano”.

Este trabalho também tem como objetivo analisar as patologias capazes de ocorrer nas proximidades do dispositivo de infiltração. Tal análise se dará considerando como causa a presença da água, contaminada ou não, no solo. Vai-se atentar para as consequências que essa presença poderia causar na parte de acabamentos da construção, elementos estruturais, geotécnico, usuários e qualidade da água dos aquíferos.

Finalmente, vai-se analisar o efeito da implantação de trincheiras e poços de infiltração sob o ponto de vista ambiental. Nesse caso, simulações de transporte de contaminante são realizadas

a fim de estudar como a pluma de contaminação se espalha pelo substrato de acordo com a geometria do elemento de infiltração. Várias geometrias serão comparadas a fim de se avaliar as possíveis diferenças no avanço da pluma.

## **2. DESENVOLVIMENTO**

É comum ver novas tecnologias mais eficientes não serem aplicadas em obras em decorrência de experiências negativas com as mesmas. Esse fato acaba gerando dificuldade na popularização dessa nova tecnologia. É interessante notar, no entanto, que a maioria dos acontecimentos ruins provém de execução inadequada, sendo essa fruto de deficiências nos estudos preliminares, de falhas de projetos e erros construtivos.

Os principais problemas nas construções advêm da falta da correlação entre partes diferentes da mesma obra durante as fases de projeto e construção. Ao analisar os constituintes isolados, é comum que se entenda o problema de uma determinada forma a qual se altera grandemente quando da análise ampla da situação. Nesse contexto, a intervenção escolhida pode se tornar inexequível ou ainda exequível, porém, inadequada.

Pelo fato de o sistema de drenagem lidar com a água em estado líquido, deve-se ter uma preocupação maior haja vista a facilidade de a água fluir para qualquer direção e ocupar áreas de indesejável ocupação. Neste capítulo serão discutidas decisões a serem tomadas durante a fase de projeto e implantação de um sistema de drenagem por infiltração no solo em construções novas ou existentes. Os questionamentos foram levantados a partir de dois pontos referenciais: quais danos o sistema de infiltração pode causar ao meio externo e interno e quais danos o sistema pode sofrer com as ações externas.

### **2.1. Patologias externas oriundas da infiltração**

#### **2.1.1. Propagação de frente de umidade nas construções**

Em uma construção sem uma impermeabilização ou drenagem adequada, a simples precipitação da chuva pode gerar patologias nas proximidades da superfície e nos objetos móveis. A implantação de um sistema de infiltração nos arredores propicia a infiltração concentrada seguida da dispersão da água pluvial na terra, o que por sua vez irá aumentar o

grau de saturação do solo e propiciar variações na frequência e amplitude da ascensão capilar nas estruturas e reduções de sucção na zona de influência do maciço.

Os efeitos danosos possíveis de acontecer tendem por um lado a estarem mais relacionados à degradação estética, ao conforto de se estar no local ou ainda lá manter um objeto e por outro, pode atingir e comprometer o desempenho mecânico da estrutura. Essas patologias são mais perceptivas ao olho nu, contudo, com o aumento da umidade nos materiais, é possível que surja proliferação de microrganismos e criação de habitat de insetos ou animais causadores de doenças patológicas ao homem ou aos próprios animais.

Além da ascensão da água capilar causar aumento de umidade nos materiais desprotegidos, tem a possibilidade também dessa água conter elementos contaminantes capazes de causar maiores riscos à saúde ou acelerar o processo de degradação dos elementos expostos.

**Recomenda-se:**

- a) Fazer estudo da propagação do fluxo e posicionar o sistema de infiltração a uma distância e/ou profundidade que dificulte a ocorrência da ascensão da frente de umidade;
- b) Para as situações em que a construção tenha algum sistema de drenagem no solo, recomenda-se não instalar o sistema de infiltração próximo, pois o resultado final poderá ser inadequado. Ou seja, a água pluvial seria infiltrada pelo sistema de infiltração e drenada. Mesmo prevenindo a mudança dos parâmetros existente, estaria fugindo do objetivo inicial desejado de reabastecer o lençol freático;
- c) Reforçar a impermeabilização de proteção da construção projetada ou existente, quando for o caso;
- d) Desfavorecer a propagação do fluxo da água na direção da construção, em especial quando a mesma for incompatível com a presença ou ampliação da presença da água infiltrada. Aplicar essa recomendação no próprio sistema de infiltração;
- e) Escolher soluções físicas que impeçam a acessão da capilaridade na construção pelo fato de possuírem resultados muitas vezes mais eficientes do que soluções utilizando materiais com proteção química;
- f) Adotar proteção química para aqueles casos em que a água capilar contenha elementos contaminantes, pois mesmo quando as proteções físicas protegerem a elevação da água

capilar a água pode conter solutos capazes de deteriorar essas proteções físicas existentes.

### **2.1.2. Elementos estruturais**

Com a propagação da frente de umidade nas camadas de solo, esses fluxos podem tender a chegar às construções. Caso a estrutura que está recebendo esse novo fluxo de água, oriunda do sistema de infiltração, não tiver algum tipo de drenagem ou alguma outra solução técnica para impedir o acesso dessa frente nas zonas de influências dos elementos estruturais - que interagem com solo, como fundações e contenções - é possível que o comportamento da estrutura seja alterado caso não tenha sido levada em conta a presença dessa água durante a elaboração do projeto.

- **Fundação**

Fundações são elementos utilizados para transferir as cargas aplicadas sobre elas para o solo. Por outro lado, a resistência do solo possui vários parâmetros que influenciam na sua capacidade de receber esse carregamento sem se deformar, ter uma deformação aceitável ou romper. As tensões aplicadas são propagadas na terra em superfícies isobáricas, sendo o conjunto dessas superfícies denominado de Bulbo de pressão. Nos solos não saturados a capacidade do maciço receber essas tensões sem que apresente grandes deformações, ou mesmo sem que se rompa, depende, quase sempre, do volume de água que nele se faz presente, sendo, portanto, afetado pela infiltração.

- a) **Redução da capacidade suporte de fundações**

Há várias formas de o perfil geotécnico sofrer alteração de seu comportamento relacionado a capacidade de sustentação das forças aplicadas sobre ele. No caso de fundações, o enfraquecimento não precisa ser necessariamente próximo dos elementos. Qualquer parte do maciço compreendida nas áreas que se submetem aos efeitos dos bulbos de pressão são susceptíveis de propiciarem o surgimento de recalque na construção.

Quando o fluxo d'água percorre as camadas subterrâneas, existe a possibilidade de acontecer o fenômeno da eluviação, ou seja, com a passagem de água esses perfis sofrem perdas de materiais, em especial os solúveis. Dependendo do grau de agressividade desse fenômeno pode dar-se um processo de esqueletização, que conforme Roose (1977) surge por meio da dissolução

de componentes minerais, provocando um aumento da porosidade do solo. Com o aumento no índice de vazios, mesmo que se mantenha constante a tensão aplicada na área, as forças aplicadas nos contatos dos componentes aumentam, propiciando muitas vezes uma ruptura do estrato. Portanto, a questão da contaminação deve ser vista sob duas óticas, a da contaminação propriamente dita e da degradação físico-química do maciço comprometendo sua estabilidade.

Além da movimentação da água no manto saturado ou não saturado, outro fator a ser considerado é a redução da tensão efetiva nesse perfil em função da ascensão do nível d'água ou da simples mudança da umidade do solo. Essas ocorrências irão alterar a resistência ao cisalhamento do solo e também poderão propiciar um deslocamento de partículas, o qual geraria uma mudança na estrutura do solo se comparada com a situação pré-existente, podendo ser prejudicial ou não à estabilidade localizada ou global do maciço

Mesmo tendo ausência do fluxo da água nas zonas de influência, a infiltração pode elevar o lençol freático. Com o aumento da altura do nível d'água a zona não saturada formada pela capilaridade do lençol freático tende a aumentar e influenciar na redução da sucção do solo, causando uma diminuição na sua resistência ao cisalhamento. A própria elevação do lençol freático reduz as tensões efetivas influenciando na resistência do solo

Essa influência na capacidade de carga de fundações já foi estudada por vários autores no Brasil. Os testes consistiam na realização de provas de cargas em solos pré-umedecidos com grande volume de água e comparados a outros resultados sem a infiltração de água nas proximidades da fundação. Na Tabela 2.1 mostra-se a redução da capacidade de carga da fundação em relação às dimensões dos elementos da fundação e a forma como foi realizada a infiltração.

Tabela 2.1 – Influência da inundação dos solos em resultados de provas de carga com carregamento vertical  
(Fonte: modificado de Sales, 2000)

Autor	Tipo de Fundação	Processo de inundação	Tempo de inundação	Redução na Capacidade de carga
Agnelli (1992)	Placa a 1 e 2m	1°	4-9h	32-46%
Souza (1993)	Placa a 0,7m	1°	não citado	40%
Carvalho e Souza (1990)	Estaca escavada L=6m, D=0,25m	1°	10h	67%
Silva (1990)	Estaca broca L=6m, D=0,25m	3°	24h	77%
Silva (1990)	Estaca broca L=6m, D=0,25m	3°	15h	71%
Lobo <i>et al.</i> (1991)	Estaca escavada L=2-6m, D=0,25m	3°	48h	35-43%

Lobo <i>et al.</i> (1991)	Estaca apiloada L=2-6m, D=0,25m	3°	48h	23-35%
Fernandes (1995)	Estaca broca L=6m, D=0,25m	1°	>48h	32%
Fernandes (1995)	Grupo 2 estacas L=6m, D=0,25m	1°	>48h	42%
Fernandes (1995)	Grupo 3 estacas L=6m, D=0,25m	1°	>48h	26-30%
Fernandes (1995)	Grupo 4 estacas L=6m, D=0,25m	1°	>48h	25%

1° = Inundação através de uma cava em torno do topo da estaca ou sapata

2° = Inundação através de furos verticais próximos às fundações

3° = Combinação dos métodos anteriores

Uma atenção maior deve ser dada às regiões em que há solos colapsíveis. Segundo Mortari e Camapum de Carvalho (1994), apesar desse tipo de solo proporcionar grande facilidade de infiltração das águas de chuva, ele também tem suas propriedades mecânicas mais facilmente alteradas em função da variação do grau de saturação e sucção matricial. Essa conjunção de fatores leva não apenas a redução da capacidade de carga, mas também ao colapso acelerado do solo.

- **Contenção**

Contenções são estruturas utilizadas para suportar o deslocamento horizontal do solo num desnível de altura de patamares próximos. Esse deslocamento horizontal pode ser pequeno, gerando fissuras de tração em seu topo, ou suficientes para causar o desbarrancamento de terra. De uma forma resumida, a contenção tem como um dos principais fatores de cálculo, quando o solo não está saturado, a força horizontal oriunda das tensões geostáticas e das cargas acidentais aplicadas no topo do maciço.

O acúmulo de água na zona de influência, para a qual foram considerados os dados para calcular as cargas que são transferidas para a contenção, pode gerar um novo acréscimo de força horizontal além de geralmente contribuir para a diminuição da resistência do solo. Essa água presente na zona de influência irá alterar o peso específico das camadas de solo e aumentar por esse viés a resultante horizontal sobre a estrutura e ao diminuir a sucção diminui a resistência do solo. Faz-se necessário, no entanto, mais análises sobre a influência da redução da sucção nos valores de  $k_o$ ,  $k_a$  e  $k_p$  (coeficientes de empuxo no repouso, ativo e passivo, respectivamente).

**Recomenda-se:**

- a) Fazer estudo da propagação do fluxo e posicionar o sistema de infiltração a uma distância ou profundidade que não altere os parâmetros adotados na elaboração do projeto dos elementos já construídos;
- b) Para a situações em que a construção tenha algum sistema de drenagem no solo, recomenda-se não instalar o sistema de infiltração próximo, pois o resultado final poderá ser inadequado. Ou seja, a água pluvial seria infiltrada pelo sistema de infiltração e drenada. Mesmo prevenindo a mudança dos parâmetros existente, estaria fugindo do objetivo inicial desejado de reabastecer o lençol freático;
- c) Reforçar a contenção e/ou fundação para evitar danos estruturais futuros provenientes da nova carga da água (pressão hidrostática e hidrodinâmica) e/ou da perda de resistência da camada de solo suporte;
- d) Procurar soluções que levem a desfavorecer a propagação do fluxo da água na direção da construção. Aplicar essa recomendação na concepção e construção do próprio sistema de infiltração.

**2.1.3. Pavimentação**

O princípio aplicado à pavimentação é o mesmo aplicado à fundação no que tange à resistência de ponta de uma estaca ou de base de uma sapata ou radier. Consiste numa superfície estruturada para receber cargas provenientes de elementos móveis e distribuir para a camadas que compõem a estrutura de pavimento. Há, porém, uma particularidade na questão do tipo de carregamento aplicado. O pavimento é projetado e construído para receber cargas dinâmicas. Além dessas solicitações existem aquelas oriundas da própria construção que são de natureza estática. Em decorrência desses fatores, ainda que os problemas passíveis de ocorrer com as fundações das estruturas sejam, no geral, configurados, o desempenho e as patologias em pavimentos devem ser tratados de forma distinta. As aplicações não se restringem apenas a pavimentação asfáltica e de concreto para vias, mas também àqueles com revestimento permeável e os de revestimento primário assim como os pisos de construções fechadas ou em áreas abertas.

As patologias não necessariamente implicam no colapso parcial ou total do pavimento, mas podem ser danos que avariam os automóveis, gerando um maior custo de manutenção. Os danos e problemas verificados podem também favorecer a infiltração da água abaixo da superfície impermeável, alterando o comportamento do sistema de infiltração implantado, e muito deles, ocorrem devido à própria infiltração de água.

**Recomenda-se:**

- a) Fazer estudo da propagação do fluxo e posicionar o sistema de infiltração a uma distância e profundidade que não altere os parâmetros adotados na elaboração do projeto dos elementos já construídos e caso altere, não coloque em risco nem comprometa o desempenho da estrutura de pavimento;
- b) Para situações em que a pavimentação tenha algum sistema de drenagem impedindo o fluxo de água no solo, recomenda-se não instalar o sistema de infiltração próximo, pois o resultado final seria inadequado. Ou seja, a água pluvial seria infiltrada no solo e drenada. Mesmo prevenindo a mudança dos parâmetros previstos, estaria fugindo do objetivo inicial desejado;
- c) Reforçar, caso necessário, a estrutura suporte do pavimento para suportar as cargas/efeitos capazes de comprometer a estrutura;
- d) Criar componentes que possam impedir ou limitar a propagação do fluxo da água na direção da construção, em zona que afete o seu desempenho;

**2.1.4. Taludes de cortes e de encostas**

Os taludes naturais ou construídos pelo homem têm um comportamento similar: ambos se mantêm estáveis em consequência do equilíbrio de energia entre a da massa de solo que compreende e a existente ao seu redor. Pelo fato de taludes e encostas não terem uma estrutura impedindo os deslocamentos, tornam-se mais susceptíveis a deformações resultantes de ações externas.

A infiltração da água da chuva pode gerar:

- a) Carreamento de partículas e compostos solúveis

No meio saturado, com o aumento do gradiente de percolação, gera-se um aumento do carreamento de partículas e compostos solúveis na área do fluxo. Em meio não saturado o fluxo se dá sob o efeito de um gradiente que surge com a redução da sucção na zona de infiltração fazendo com que a água migre muitas vezes conduzindo compostos solúveis para os pontos de maior sucção. Em ambos os casos essa ação do fluxo pode gerar o processo de eluviação, também conhecido como esquetização, ou mesmo o processo de erosão interna. A esqueletização reduz a resistência do solo podendo comprometer a estabilidade do talude. Já a erosão interna tende a instabilizar o talude devido a formação de cavidades em forma de canais.

b) Alteração do estado de tensões efetivas atuantes no maciço

Wolle (1988) estudou casos que ocorrem na Serra do Mar do Brasil e dentre vários tipos de classificação existentes, particularizou entre dois tipos de mecanismos que podem ser generalizados para a maioria das encostas brasileiras.

O Mecanismo Clássico, consiste na elevação rápida do nível de água pré-existente, proporcionando a redução das tensões efetivas e crescimento brusco nas tensões neutras do perfil de solo. Em decorrência da presença de camadas menos permeáveis nos taludes, é possível surgir um fluxo de água paralela ou subparalela a inclinação do talude, o que facilitaria o crescimento das tensões neutras e a ruptura do talude.

Já o mecanismo alternativo estaria relacionado à redução da sucção atuante no maciço proporcionada pelo avanço da frente de umidade, pois com a redução da sucção geralmente se gera uma diminuição da resistência ao cisalhamento do solo. Esse mecanismo estaria, portanto, ligado à redução da resistência do solo com avanço da frente de umidade, redução esta que ao se tornar inferior à mínima necessária à estabilidade, provocaria a instabilização do talude.

**Recomenda-se:**

- a) Fazer estudo da propagação do fluxo e posicionar o sistema de infiltração a uma distância ou profundidade que não altere os parâmetros adotados na elaboração do projeto dos elementos já construídos ou não os torne inferiores ao necessário à estabilidade dos taludes naturais eventualmente presentes;
- b) Utilizar o sistema de infiltração na base do talude;
- c) Caso o talude tenha algum sistema de drenagem impedindo o acúmulo e fluxo de água no solo, recomenda-se não instalar o sistema de infiltração próximo, pois o resultado final seria inadequado. Ou seja, a água pluvial seria infiltrada no solo e drenada. Mesmo prevenindo a mudança dos parâmetros previstos, estaria fugindo do objetivo inicial desejado;
- d) Reforçar, se necessário, o talude para suportar as situações geradas pelo o efeito da presença da água;  
Procurar soluções que levem a desfavorecer a propagação do fluxo da água na direção do talude;

### **2.1.5. Poluição de recursos hídricos**

Uma das características da água é ser considerada “solvente universal”, ou seja, substância capaz de dissolver uma infinidade de substâncias e com tal propriedade, adquire a capacidade de transportar materiais químicos ou minerais para lugares que normalmente não teriam acesso. Essa “habilidade” pode ter seu lado bom, mas em outros casos pode ser considerada como indesejada, principalmente quando causadora de contaminações e danos ambientais.

Por ser um solvente universal, a água em estado puro não é possível de ser encontrada na natureza, nem mesmo na chuva. Durante o caminho da precipitação, a água já carrega diversos elementos químicos presentes no ar e ao chegar ao solo a água é considerada como uma solução. Para o sistema de infiltração em estudo, a água pluvial passa ainda por diversas superfícies como vegetação, telhados, encanamentos, terraços, varandas, pavimentos, etc, ou seja, muitas áreas capazes de conter materiais solúveis. Mas materiais capazes de se misturar com a água não são a única preocupação. Mesmo não sendo solúveis, certos materiais podem ser facilmente transportados ao longo dos diversos trajetos da água.

Mesmo que o sistema de infiltração tenha uma camada de cobertura capaz de filtrar materiais não solúveis, uma parte da água vai para o solo conduzindo elementos muito finos e os solubilizados. Até atingir o aquífero e durante esse processo de percolação o perfil geotécnico deve se tornar um elemento filtrante capaz de impedir a chegada de elementos tóxicos ao lençol freático. A capacidade do solo “limpar” a água irá depender principalmente da sua condutividade, de suas propriedades químicas, mineralógicas e estruturais e da distância até a zona impermeável, ou seja, quanto mais lenta for a percolação da água e quanto maior a distância percorrida, maior será a probabilidade de retenção dos materiais dissolvidos na água. Contudo, o solo possui sua capacidade limitada de diluição, adsorção e captação dos poluentes às partículas do solo, bem como da capacidade degradadora dos poluentes microbianas. Quando ultrapassado o limite de retenção e atenuação do perfil, os materiais atingem a região saturada.

Os materiais retidos no solo são muitas vezes degradados por micro-organismos presentes ajudando no processo de atenuação. É fato, no entanto, que esse procedimento tende a contribuir para a colmatação dos poros, tornando inviável a utilização da infiltração de uma forma contínua.

O efeito de sazonalidade no nível do lençol freático é um aspecto a ser considerada. Mesmo que os poluentes não cheguem até o aquífero, o nível do aquífero pode alcançar a zona de retenção de poluentes e sofrer os efeitos de contaminação.

Apesar da necessidade de se buscar evitar que a infiltração das águas pluviais atinja rapidamente o lençol freático, muitas vezes é inevitável, o que torna relevante o estudo do modo como frentes de contaminação avançam no meio não saturado.

### **Recomendações:**

- a) Realizar análise da qualidade da água a ser infiltrada;
- b) Se necessário, tratamento da água, num nível adequado para infiltração, antes do lançamento no sistema de infiltração;
- c) Implantar o sistema de infiltração à distância considerável de poços de abastecimento humano e de recursos hídricos em especial nos casos onde haja risco de contaminação;
- d) Utilizar plantas ao redor do sistema para ajudar no processo de atenuação e aeração do estrato;

## **2.2. Patologias internas ao sistema de infiltração**

### **2.2.1. Colmatção**

O processo de colmatção pode ser entendido como uma modificação local da condutividade hidráulica (Gautier, 1998). Ela pode ocorrer na parte filtrante do sistema, geralmente um geotêxtil, ou no próprio solo fronteiro ao sistema de infiltração implantado.

No primeiro caso, após o rebaixamento do nível de água durante o processo de infiltração, os sedimentos em suspensão ou materiais sólidos e solubilizados presentes na água a ser infiltrada podem ficar retidos no revestimento do sistema de infiltração. Nesse caso a colmatção pode se dar por três motivos, retenção dos sólidos suspensos no interior do filtro, precipitação dos compostos químicos solubilizados no interior do filtro e finalmente devido ao fato do material retido no interior do sistema pode conter nutrientes para proliferação de bactérias e algas, formando uma espécie de biofilme. O acúmulo de material na interface solo-revestimento reduz progressivamente a condutividade hidráulica do sistema de infiltração, prejudicando a vida útil. A colmatção do filtro pode ocorrer ainda devido ao fluxo invertido, ou seja, do maciço para o sistema de infiltração, em especial por atuação da sucção, situação propícia a precipitação de compostos químicos solubilizados provenientes do maciço.

No segundo caso partículas em suspensão que passem por esse filtro podem ser retidas pelo próprio solo podendo reduzir, com o tempo, sua capacidade de drenagem. Ainda nesse segundo

caso, compostos solubilizados podem reagir com o solo e precipitar, colmatando na região do revestimento. Faz-se necessário ainda, nesse segundo caso, atentar para a possibilidade de sintetização de compostos minerais nos poros do solo por meio de ação bacteriana.

Ishizaki (1996) realizou experimentos de campo durante 2 anos com o intuito de analisar a evolução da redução da condutividade hidráulica gerada pela colmatação. Nos estudos, verificou que a colmatação é dividida em duas etapas. Na primeira, o material proveniente da água se deposita na superfície do revestimento e em seguida vai ocupando os espaços vazios. Nesse período, a condutividade tem uma ligeira redução. A Figura 2.1 apresenta os resultados por Ishizaki (1996).

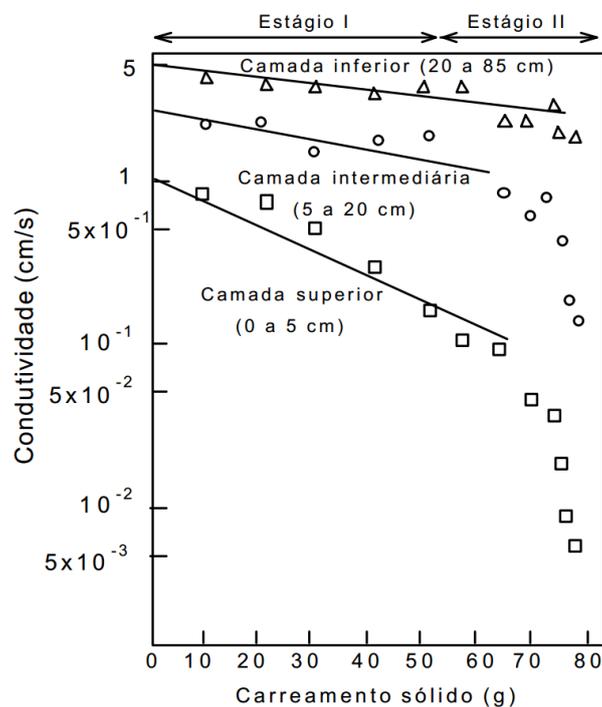


Figura 2.1 – Relação entre condutividade hidráulica saturada e carga sólida acumulada (FONTE: Ishisaki, 1996 apud Souza, 2002)

A partir de um certo ponto crítico, a condutividade hidráulica tem um decréscimo acelerado. Segundo o autor, essa segunda fase corresponde ao nascimento do biofilme.

Detay *et al.* (1994) identificaram 4 fases na evolução da colmatação (Figura 2.2) em trabalhos de campo com 3 bacias de realimentação artificial do aquífero:

- Fase A: inchamento das partículas coloidais do solo pelo primeiro contato da água;
- Fase B: dissolução progressiva de bolhas de ar;
- Fase C: formação de um filme bacteriano

- Fase D: asfixia completa do fundo da bacia, tendo como ponto final teórico a colmatação completa;

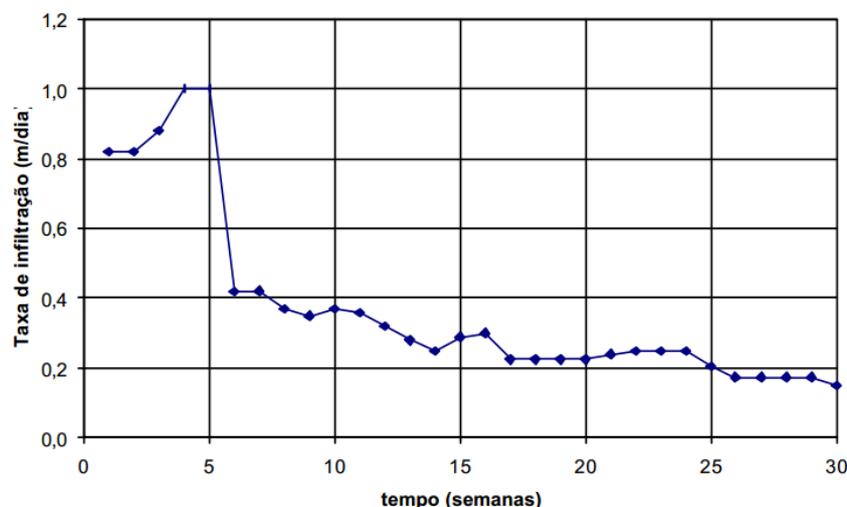


Figura 2.2 – Evolução da vazão infiltrada em função do tempo  
(FONTE: Detay *et al*, 1994 apud Souza, 2002)

A formação de biofilme em trincheiras ou poços de infiltração pode não ocorrer pela falta de luz em seu interior sendo também fundamental a presença de água para a ocorrência. Pelo fato do sistema ser utilizado apenas na presença de água pluvial, a intermitência da chuva dificultaria esse processo.

Souza (2002) realizou um estudo em duas trincheiras, uma durante 33 meses (com ensaio destrutivo ao final) e outra com duração de 6 meses. As trincheiras constituíam-se de uma camada de geotêxtil na superfície enterrada e outra na camada superficial, que fazia a pré-filtragem da entrada da água pluvial na trincheira.

Na Figura 2.3 pode-se observar o resultado do processo de colmatação da trincheira acompanhada por mais tempo. A análise dos dados revela a não alteração do processo de infiltração da água que entrava no sistema. No entanto, foi visto um estado avançado de colmatação na primeira camada. Dos resultados encontrados por Souza (2002), não se pode estabelecer a vida útil do sistema, mas se percebe que ela seria sensivelmente alterada caso não existisse a camada de geotêxtil superficial.



Figura 2.3 – Condições do geotêtil no interior da trincheira após 33 meses de utilização.  
(Fonte: Souza, 2002)

### 2.2.2. Colapso interno

Além dos fatores relacionados à água e aos parâmetros para dimensionamento, elementos externos são capazes de comprometer o sistema de infiltração. Fontes geradoras de esforços e vibrações podem causar ações não contempladas nas etapas de projeto, proporcionando a deformação ou até o colapso da estrutura interna do elemento de infiltração.

#### Recomenda-se:

- a) Prever todo tipo de cargas possíveis, tanto para a vida útil quanto durante a execução, capazes de ocorrer nas proximidades e susceptíveis de afetarem o sistema de infiltração;
- b) Se possível, utilizar um revestimento mais resistente ou condicionar o uso da área;
- c) Em casos em que torne inviável a implantação do sistema de infiltração, reavaliar o local de implantação;

### 2.2.3. Recalque

Tem considerações similares às descritas nos tópicos sobre Patologias nas Fundações e Pavimentações. Contudo, a forma como o recalque acontece é diferente. Nos tópicos citados o sistema de infiltração causa a redução da capacidade de suporte do solo abaixo das outras estruturas, porém no caso aqui discutido, o enfraquecimento da capacidade de suporte do solo

onde o sistema estará apoiado teria origem do próprio sistema, ou seja, essa situação estará presente em todos os sistemas de infiltração, porém com relevância diretamente relacionada às propriedades e comportamento do maciço. É fato que se deve levar em conta no cômputo das cargas aplicadas pelo elemento de infiltração o peso próprio (material de preenchimento e volume máximo de água retida) e sobrecargas.

O recalque por si só é algo comum de ocorrer em qualquer estrutura apoiada no solo, mas pode ter valores previstos durante a fase de projeto. Um recalque uniforme na estrutura (igual em todos os pontos) geralmente não gera danos internos, contudo quando ocorre um recalque diferencial, criam-se esforços internos nos elementos capazes de causar a ruptura.

Trincheiras de grande comprimento são mais suscetíveis ao recalque diferencial, casos em que pode ocorrer o rompimento dos elementos internos. Caso ocorra o rompimento do revestimento, o surgimento de erosão nas camadas subterrâneas pode ser mais frequente devido a surgimento de áreas com menores resistências para a passagem de água e com isso surgir fluxos preferenciados nessas áreas.

#### **Recomenda-se:**

- a) Reduzir a altura do sistema de infiltração para casos em que o sistema de infiltração possa ficar com peso inadequado e compensar a perda do volume aumentando na horizontal;
- b) Dividir o sistema em vários menores reduzindo a concentração de cargas;
- c) Utilizar materiais de preenchimento mais leves. Silva (2012) sugere utilização de garrafas PET como de material de enchimento alternativo (Figura 2.4);

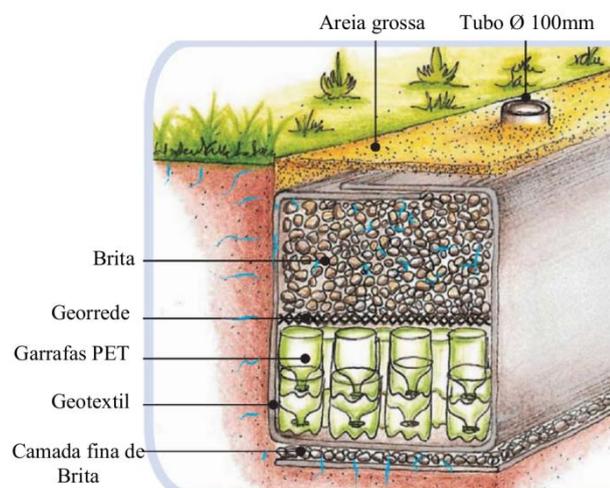


Figura 2.4 – Utilização de garrafas PET como material alternativo para preenchimento.  
(Fonte: Camapum de Carvalho & Lelis, 2011 apud Silva, 2012)

- d) Para casos extremos, analisar a utilização sistema estrutural de fundação no poço ou trincheira de infiltração;

#### **2.2.4. Deterioração dos materiais constituintes do revestimento e preenchimento**

Todos os materiais tendem a se deteriorar naturalmente pela ação de componentes químicos e agentes biológicos presentes no meio em que estão inseridos. Em função da qualidade da água proveniente da área drenada ou daquela oriunda do próprio solo (discutida no item 2.2.2) no sistema de infiltração, pode-se observar a degradação dos materiais constituintes do preenchimento e revestimento. O material degradado pode ser capaz de gerar sedimentos ou partículas capazes de proporcionar o processo de colmatação do sistema de infiltração, induzindo a redução da sua vida útil.

O fator determinante está na capacidade do material de resistir à agressividade do meio, ou seja, deve-se adquirir informações com os fabricantes quando componentes industrializados são utilizados e verificar os componentes agressivos provenientes do meio. No caso de se empregar elementos naturais é recomendado fazer testes de durabilidade em laboratórios.

#### **2.2.5. Vida útil**

A ineficiência do sistema de infiltração está ligada à redução da taxa de infiltração devido ao efeito da colmatação do mesmo e do solo ao redor. Segundo Hasegawa *et al.* (1999) apud Souza (2002), durante a análise de dispositivos de infiltração no Japão (condutos de infiltração, trincheiras de infiltração e pavimentos de asfalto porosos) verificou-se que a capacidade de infiltração decresce com o tempo de maneira exponencial. As trincheiras tiveram uma redução de 50% na capacidade de infiltração após um período de 10 anos.

A durabilidade dos sistemas de infiltração pode ser aumentada por meio de intervenções de manutenção, mas esse processo não pôde (nos casos observados) ser feito com trincheiras de infiltração (Hasegawa, 1999). A trincheira, por ser um dispositivo de infiltração enterrado, tem a manutenção de seu revestimento dificultada pelo acesso. Quando utilizado preenchimentos pesados (britas, areias, etc) a construção de uma nova trincheira pode ser, do ponto de vista técnico-econômico, uma solução mais viável do que realizar a restauração de uma antiga, porém, do ponto de vista ambiental certamente não. A manutenção pode ser facilitada usando

tecnologias diferentes que tenha foco na praticidade do manuseio quando necessário realizar intervenções futuras.

A utilização de dispositivos de infiltração é algo recente e não se tem ainda muitos dados para ter estimativas aceitáveis do intervalo de tempo que a trincheira terá funcionamento satisfatório (Souza, 2002). Schueler (1987) sugere que o tempo de vida das trincheiras pode ser da ordem de 10 a 15 anos, quando realizadas práticas de manutenção. Outros autores, tais como Fujita (1996) e Hasegawa *et al.* (1999), sugerem que a vida útil dos dispositivos de infiltração pode superar dez anos (Souza 2002). Logo, estudar técnicas alternativas de construção que facilitem a manutenção assume grande importância

Nos tempos atuais existem tecnologias de filtração com melhores rendimentos e durabilidades capazes de proporcionar menor entrada de sólidos e materiais solúveis no sistema de infiltração prolongando a vida útil. Ao mesmo tempo, é possível melhorar, em especial por meio da educação, a qualidade da água que chega ao sistema para ser infiltrada. Por exemplo, é inadmissível que toneladas e toneladas de sedimentos cheguem aos sistemas de drenagem devido à falta de cuidados na execução de obra de engenharia com reporta o jornal o Popular 1º de dezembro 2015 na matéria de capa intitulada: Lama toma conta do Córrego Joá (matéria de Gabriela Lima e foto de Diomício Gomes)

#### **Recomenda-se:**

- a) Pelo fato da colmatagem ser oriunda da água que entra no sistema (quando a execução é feita de forma satisfatória), uma solução adequada seria utilizar técnicas preventivas para evitar a entrada de sedimentos;

### **2.3. Execução**

Precauções devem ser levadas em conta durante o processo de execução para não alterar a condutividade hidráulica prevista em projeto do sistema de infiltração.

Deve-se evitar a utilização de equipamentos de grande porte para a escavação e colocação de materiais pesados nos arredores do sistema de infiltração, para evitar a compactação da camada superficial e desmoronamento das paredes.

Outra precaução a ser tomada seria evitar a inserção de materiais residuais sólidos que não integrem o sistema de drenagem previsto e de fluidos em condições idênticas a essa. Mesmo aqueles fluidos com grande porcentagem de água podem conter materiais solúveis com capacidade de preencher os vazios da camada superficial do sistema de infiltração ou alterar as características do maciço circunvizinho. Esse processo, dependendo da etapa da execução, pode favorecer a colmatção do revestimento. Os materiais residuais sólidos podem vir aderidos ao material de preenchimento e constituir-se em fator de comprometimento da condutividade hidráulica sendo recomendável a sua lavagem de forma a retirar tudo aquilo capaz de comprometer o sistema.

Além da presença de materiais sólidos no fluido infiltrante, a água pode facilitar a densificação do solo por meio do colapso estrutural ou simples perda de resistência. Mesmo não sendo utilizados equipamentos pesados, a aliança entre o simples aumento do grau de saturação da camada superficial e a ocorrência de aplicações de cargas sobre o solo propiciará uma certa densificação ou consolidação.

Durante as etapas em que as paredes do sistema de infiltração estão expostas, podem ocorrer erosões ocasionadas pelo escoamento superficial da água. Essa erosão causará alteração no formato e levará ao acúmulo de sedimentos no fundo. Esse acúmulo de sedimentos é geralmente prejudicial à infiltração na direção vertical.

Por fim, deve-se observar o método de escavação. O alisamento das paredes dificulta a passagem da água. Esses alisamentos, quando ocorrem, devem ser corrigidos removendo-os ou tornando-os mais irregulares. Dependendo da frequência de trechos das paredes alisadas, é recomendado alterar a técnica de escavação utilizada na construção.

No monitoramento de 1 ano de duração de uma trincheira executada por Lucas (2011) no modelo Filtro-Vala-Trincheira (FTV), que consiste na utilização de um sistema de caixas de areias e de um cobrimento vegetal para realizar a pré-filtragem da água pluvial, o monitoramento anual revelou uma redução da permeabilidade do geotêxtil na média de 45% quando comparado ao material novo. O material causador da colmatção foi oriundo, segundo Lucas (2011), do aporte de materiais finos contidos na areia do filtro e na brita de preenchimento. A análise dos componentes da trincheira de infiltração demonstraram que os problemas construtivos foram mais prejudiciais do que o tempo de funcionamento (Lucas 2011).

### 3. PARÂMETROS

Os modelos de dimensionamento de trincheiras têm como base a relação do balanço hídrico interno, ou seja, o volume de armazenamento é obtido da subtração do volume de saída (perdido por infiltração) do volume de entrada d'água. As diferenças entre os modelos consistem nas considerações adotadas para encontrar tais volumes (Graciosa *et al.* (2008)).

Os modelos tradicionais de infiltração, tais como Philip (1957), Horton (1940), Kostikov e Green & Ampt (1911) (*apud* Graciosa, 2008), entre outros, usualmente quantificam a infiltração de forma unidimensional. Contudo para trincheiras, o movimento da água no entorno da estrutura ocorre nas duas direções de sua seção transversal e dependem também da forma dessa seção. Para obter uma relação mais próxima da realidade, Richards descreve o movimento da água no solo não saturado de forma bidimensional (Graciosa *et al.*, 2008)

Zimmer *et al.* (1998) *apud* Souza (2002) apresentam um método de dimensionamento de sistemas de infiltração, através da utilização de elementos finitos. Métodos mais simples são apresentados por Leeflang *et al.* (1998) que apresentam curvas de dimensionamento, ou por Jonasson (1984) e Urbonas & Stahre (1993), que apresentam o “rain-envelope-method” (Souza, 2002).

Na tese de doutorado de Leão de Carvalho (2013), realizou-se um estudo do comportamento hidromecânico de solos típicos regionais de Goiânia - GO, aliado a características geométricas de infiltração. Nesse trabalho, utilizou-se um modelo numérico que permite a simulação da infiltração no poço. Também foi levantado quais das propriedades do solo podem ser estimadas e quais precisam ser avaliadas de forma mais criteriosa.

Não serão descritas aqui a funcionalidade e as fórmulas utilizadas em cada método, pois para tal devem ser levantadas questões teóricas relacionadas ao comportamento dos solos e isso fugiria do objetivo desse trabalho. Além disso, praticamente todos os métodos citados, excetuando-se o método utilizado por Leão de Carvalho (2013), tiveram origem em estudos com solos e comportamentos das chuvas não típicos no Brasil.

Apesar de todos os métodos terem algumas divergências em cálculos na determinação do volume infiltrado e de entrada, os fatores a seguir são comuns a todos. Cada ponto será discutido sob o prisma de resultados e comentários de teses de autores diversos.

### 3.1. Parâmetros

#### 3.1.1. Hidrológicos

Corresponde à constituição do volume de entrada. Nessa definição leva-se em conta:

- intensidade e tempo de chuva (curva IDF);
- área considerada de captação da água pluvial;
- tempo de recorrência adotado. De acordo com o manual do DNIT (2005), o sistema de microdrenagem considera um tempo de recorrência mínimo de 10 anos;
- coeficiente de escoamento relacionado ao material da superfície de escoamento.

#### 3.1.2. Geotécnicos

Utilizado para o cálculo da vazão de infiltração. Dependendo do modelo adotado, os parâmetros do solo são apresentados de formas diferentes, mas certos parâmetros são mais influentes nos cálculos que outros.

Segundo Williams *et al.* (1998) apud Leão Carvalho (2013), a sorvidade (sucção) é o parâmetro de entrada mais sensível para previsão da taxa de infiltração considerando a superfície do solo. Dessa forma, a incerteza nos dados de sucção contribui significativamente para a incerteza da previsão da infiltração, em especial na fase inicial da infiltração.

Segundo Emerson (2008), Gracês (2010), Peixoto (2011) e Lee (2011) *apud* Leão Carvalho (2013), a condutividade hidráulica saturada ( $k_{sat}$ ) é o fator regente no comportamento de infiltração de água em poços. Lee (2011) mostra ainda que a temperatura da água deve ser ponderada, pois uma mudança de 10° C na temperatura resulta em uma mudança de 25 a 30% no valor da permeabilidade, produzindo uma variação de 20 a 25% da taxa de recessão do solo (Leão Carvalho, 2013).

Urbonas & Stahre (1993) e outros autores fazem uma série de recomendações de cunho geotécnico indicando condições não recomendadas para a utilização de trincheiras, dentre as quais estão: quando a camada impermeável estiver a menos de 1,2m abaixo do fundo da trincheira; se a superfície de infiltração for um aterro; se o solo tiver classificação C ou D no sistema *Soil Conservation Service* (Tabela 3.1) ou se a taxa de infiltração do solo saturado for inferior a 8mm/h ou  $2,22 \times 10^{-2}$  cm/s.

Tabela 3.1 – Classificação hidrológica de solos segundo o SCS  
 (Fonte: modificado <http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/fmartins/Publica%C3%A7%C3%B5es/Tese%20Mestrado/T-CII.pdf>, 7 janeiro de 2015)

<b>Tipo de Solo</b>	<b>Características dos solos</b>
Tipo A	Solos dando origem abaixo do escoamento direto, ou que apresentam permeabilidade bastante elevada. Inclui areais com bastante espessura, e com pouco limo ou argila, e arenitos com bastante espessura e muito permeáveis.
Tipo B	Solos menos permeáveis que os do tipo A, mas com permeabilidade superior à média. Inclui fundamentalmente solos arenosos menos espessos que os do tipo A e arenitos menos espessos e menos agregados que os do tipo A.
Tipo C	Solos originando escoamentos diretos superiores à média e superiores aos originados pelos tipos anteriores. Inclui solos pouco espessos e solos com quantidades apreciáveis de argilas, se bem que menos que os do tipo D.
Tipo D	Solos com argilas expansivas e solos pouco espessos, com sub-horizontais quase impermeáveis que originam elevado escoamento direto.

### 3.2. Formato

O formato de poços e trincheiras é algo pouco discutido na literatura. É comum a utilização de trincheiras priorizar a face do comprimento em relação a face da largura. Alguns autores dos modelos de dimensionamento desconsideram a infiltração na superfície da base da trincheira, o que, dependendo do solo, pode subestimar a capacidade real de infiltração. Já os poços são cilindros com maiores profundidades de forma a possibilitar o armazenamento de mais água e a infiltração é geralmente afetada pela profundidade (carga hidráulica) e diâmetro.

Seria interessante explorar outros formatos para ver a capacidade de favorecer alguma direção do fluxo d'água e evitar patologias nas proximidades. Outra opção seria inclinar as faces laterais de trincheiras para ter mais ganho na área de infiltração em solos com condutividade hidráulica favorecida em certos ângulos. O Minnesota Stormwater Manual permite o formato trapezoidal no perfil de trincheiras respeitando a proporção máxima de 1:3 (Vertical : Horizontal)

### 3.3. Preenchimento

O material de preenchimento para trincheiras tem a função de resistir às cargas aplicadas ao redor, impedindo a deformação e o colapso da trincheira, além de, dependendo do projeto, poder promover uma filtragem impedindo a deposição de elementos sólidos graúdos provenientes da água pluvial escoada para o seu interior.

De acordo com os materiais escolhidos para o preenchimento, precisa-se atentar para a condutividade hidráulica do enchimento não ser menor que a do solo a ser infiltrado. Caso contrário, necessitar-se-á de um volume de armazenamento maior na trincheira.

Poços de infiltração normalmente não possuem material de preenchimento. Tendem a ser revestidos por materiais mais resistentes, não sendo necessária a utilização de material no enchimento, proporcionando assim mais espaços vazios e aumentando o volume de armazenamento.

### **3.4. Revestimento**

É recomendada a utilização de um geotêxtil como revestimento mais externo do sistema de infiltração para evitar a penetração de partículas finas e animais no seu interior. Tem a função ainda de evitar a erosão interna das paredes e dar uma certa resistência a deformações.

Em conjunto com a camada de geotêxtil pode-se utilizar um revestimento com capacidade estrutural de maior resistência como concreto, cerâmica, pneus, etc, para reduzir a necessidade de preenchimentos e suportar pressões de origens externas.

Poços de infiltração tendem a ter um revestimento estrutural pelo fato de priorizarem a não utilização de preenchimento. Mas deve-se atentar para a condutividade hidráulica do revestimento para que essa não seja menor que a do solo.

Uma hipótese aplicável ao revestimento seria a utilização de material impermeabilizante para priorizar o direcionamento da infiltração, evitando algumas patologias em construções próximas quando a locação do sistema é restrita. Contudo, os métodos de dimensionamento de trincheiras e poços utilizam todas as faces ou apenas a faces laterais na vazão de saída da água armazenada de forma que para considerar essa nova abordagem seria necessária uma adaptação dos modelos existentes.

### **3.5. Fator de segurança**

A utilização de coeficientes de segurança tem grande importância na engenharia. É útil para levar em consideração as adversidades não previstas em projeto e evitar o surgimento de patologias imprevistas antes da completa perda da funcionalidade do elemento projetado.

No âmbito da geotecnia, as incertezas dos parâmetros do solo são consideráveis devido a variabilidade do comportamento tanto em área quanto em perfil. Outro fator seria a acessibilidade que dificulta a obtenção de amostras sem comprometer o estado inicial in loco.

Devido à falta de confiança nos parâmetros utilizados no dimensionamento do sistema de infiltração Urbonas & Stahre (1993) sugerem um coeficiente de segurança da ordem de 2. Contudo, Bettess (1996) sugere valores entre 1,5 e 10, dependentes das consequências oriundas de falhas do sistema (Tabela 3.2)

Tabela 3.2- Coeficientes de segurança para o projeto de estruturas de infiltração  
(Fonte: modificado Bettess, 1996, apud Souza.2002)

Área a ser drenada	Consequência da falha		
	Nenhum dano ou inconveniente	Inconveniente menor, como lâmina de água em estacionamento	Danos a construções ou estruturas inconvenientes maiores, como inundação de ruas
< 100m <sup>2</sup>	1,5	2	10
100m <sup>2</sup> a 1000m <sup>2</sup>	1,5	3	10
>1000 <sup>2</sup>	1,5	5	10

### 3.6. Avaliação da zona de influência no maciço segundo a intensidade e regime de precipitação

Toda patologia e requisito de viabilidade citada nessa monografia irá depender direta e indiretamente do avanço da frente de umidade nas três direções (x, y, z). A região do solo a ter o grau de saturação alterado irá depender de vários parâmetros geotécnicos conhecidos e a serem determinados, o que dificulta a previsão da extensão dessa região de forma mais precisa.

O método mais utilizado para aferir a região que será influenciada pela infiltração de água localizada é o referente ao controle de umidade. Tal método consiste na obtenção, antes e depois de infiltrar a água, de amostras do perfil geotécnico à distâncias e profundidades pré-determinada a partir do centro da área infiltrada. A partir da obtenção do grau saturação da amostra antes e depois da infiltração, obtém-se a zona onde ocorreu o avanço da água percolada. Em análise mais elaborada as umidades ou os graus de saturação determinados podem ser utilizados, conhecida a curva características de retenção de água no solo, para estimar a sucção atuante no solo. Outra forma verificar a frente de umidade seria a utilização de Tensiômetros. Esse equipamento, junto com outras equações matemáticas permitem, obter o grau de saturação do solo fazendo relação do potencial matricial do solo. Destaca-se, porém, que o ideal é

monitorar diretamente esse potencial matricial, pois a ele associa o comportamento hidromecânico do solo. Existem também equipamentos eletrônicos, os TDRs (Time Domain Reflectometers), que medem a velocidade de um pulso elétrico entre dois elementos paralelos para obter o grau de saturação do solo na região desses dois elementos paralelos.

Dependendo do sistema adotado, poço ou trincheira, as zonas de influência poderão ser bem diferentes. Pelo fato principalmente da geometria de cada um – poço priorizar a profundidade e trincheira o comprimento linear – um pode influenciar zonas mais profundas e o outro a região superficial do perfil. É possível obter resultados distintos do avanço da frente de umidade antes da execução do sistema de infiltração e após sua implantação, haja vista a geometria e dimensões do volume onde será lançada a água no teste e no sistema de infiltração serem diferentes. Por isso, além dos ensaios de campo, é recomendável verificar por meio de simulações usando ferramentas numéricas computacionais como atuará o sistema de infiltração projetado.

Outro fator a ser considerado e analisado é a sucção/capilaridade inicial e ao longo do tempo do perfil de solo em que se vai implantar e se implantou o sistema de infiltração. A sucção/capilaridade depende da porosidade e umidade do solo estando assim, diretamente relacionada ao grau de saturação. Pelo fato das trincheiras e poços funcionarem durante e após o período de chuva, na primeira fase infiltrando e na segunda aerando, a umidade do solo é dinâmica e irá influenciar a frente de umidade, o processo de infiltração e o comportamento mecânico do solo sob influência do sistema de infiltração.

### **3.7. Transporte de poluentes para as zonas não saturada e saturada do maciço**

Ao facilitar a entrada de água no solo, torna-se essencial o estudo da contaminação que esse volume de fluido infiltrado pode trazer para o maciço de solo e para a água do lençol freático se atingível. Dessa forma, o transporte de contaminantes para o solo e eventualmente para o lençol freático deve ser estudado em detalhes. A área atingida pelo contaminante, bem como a maneira como ele se desloca no subsolo, caracteriza a chamada “pluma de contaminação”.

O transporte de contaminantes no solo é estudado como condução da massa de solutos na água em meios porosos, tanto na zona saturada como na insaturada (Bosco Gimenez, 2008), relacionadas a propriedades físicas, químicas e biológicas dos materiais participantes, solo, soluto e solvente. As propriedades físicas que influenciam no transporte de um soluto em meios porosos são difusão, advecção e dispersão mecânica.

### 3.7.1. Difusão

A difusão funciona baseada no deslocamento das moléculas geradas pelo gradiente de concentração existente em um fluido, ou seja, de uma região de maior concentração para uma de menor concentração, até o momento que o gradiente de massa de toda a região do fluido seja igual a zero. O fenômeno da difusão acontece mesmo que a velocidade do fluxo do solvente seja igual a zero, mas é acentuada quando há presença de turbulência no fluido. A difusão é considerada um fenômeno regido pela Primeira Lei de Fick: considera-se que a massa de substância em difusão que passa por uma dada seção transversal por unidade de tempo é proporcional ao gradiente de concentração (Bosco Gimenez, 2008). A Primeira lei de Fick é expressa pela seguinte equação:

$$J_{difusão} = -nD_d \frac{\partial c}{\partial z} \quad (3.1)$$

sendo que:

$J_{difusão}$  – fluxo de massa por difusão [M/L<sup>2</sup> T]

$n$  – porosidade

$D_d$  – coeficiente de difusão do poluente no solo [L<sup>2</sup>/T]

$c$  – concentração do soluto [M/L<sup>3</sup>]

$z$  – direção do fluxo [L]

Pode-se relacionar o fluxo de massa por difusão por meio de outra equação, a Segunda Lei de Fick. Matematicamente tem-se nesse caso:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D_d \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (3.2)$$

O coeficiente de difusão do poluente no solo é consideravelmente menor em solução livre devido a tortuosidade das trajetórias do fluxo (Mitchell, 1991 apud Pizarro, 2009), sendo assim a difusão efetiva depende das características do solo.

### 3.7.2. Advecção

O fenômeno advectivo de transporte de contaminantes surge quando o soluto se propaga na mesma direção que a velocidade média linear do solvente em que está dissolvido. No caso

puramente advectivo, a concentração do poluente na solução permanece constante ao longo do tempo pois não há transporte difusivo (espalhamento), apenas um movimento de translação.

A equação diferencial do transporte por advecção (Plyanin, Zaitsev, 2004, Pinchover, Rubinstein, 2005, apud Pizarro, 2009), no caso unidimensional, é dado por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad (3.3)$$

sendo que:

$c$  – concentração do soluto [ $M/L^3$ ]

$v_z$  – velocidade da água nos poros na direção  $z$  [ $L/T$ ]

$t$  – tempo [ $T$ ]

$z$  – direção do fluxo [ $L$ ]

### 3.7.3. Dispersão

A dispersão mecânica ou hidráulica consiste no transporte devido a variação das velocidades médias e direções do fluxo decorrentes da tortuosidade nos canais vazios do solo. Porém, durante o processo de dispersão, é comum que ocorram gradientes de concentração do soluto entre linhas de fluxo adjacentes, haja vista a variação de velocidades nas seções transversais dos vazios. Assim, soma-se à dispersão o fenômeno de difusão molecular lateral entre linhas de fluxo (Bosco Gimenez, 2008). Os dois mecanismos ocorrem simultaneamente (dispersão hidrodinâmica), contudo, para velocidades muito baixas, a difusão é mais importante do que a dispersão mecânica. Para o fluxo por dispersão hidrodinâmica, tem-se:

$$\frac{\partial J_{difusão}}{\partial z} = nD_{dh} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (3.4)$$

em que:

$J_{difusão}$  – fluxo de massa por difusão [ $M/L^2 T$ ]

$n$  – porosidade

$D_{dh}$  – coeficiente de dispersão hidrodinâmica [ $L^2/T$ ]

$c$  – concentração do soluto [ $M/L^3$ ]

$z$  – direção do fluxo [ $L$ ]

Sendo que coeficiente de dispersão hidrodinâmica é:

$$D_{dh} = D_d + D_m = D_d + \alpha u = D_d + \alpha nv \quad (3.5)$$

em que:

$D_d$  – coeficiente de difusão do poluente no solo [ $L^2/T$ ]

$D_m$  – coeficiente de dispersão mecânica

$\alpha$  - dispersividade dinâmica ou dispersividade (característica do meio poroso) [L]

$n$  – porosidade

$v$  – velocidade de Darcy

#### 4. METODOLOGIA

De acordo com os objetivos do trabalho, há dois grandes tópicos a serem tratados: o estudo da implantação dos sistemas de infiltração e o estudo da influência da geometria dos sistemas no transporte de contaminantes contidos na água infiltrada.

Para o primeiro tópico, a análise limitou-se a revisão bibliográfica com pequenas considerações do autor, conforme se pode ver nas seções anteriores. Para o segundo tópico, vai-se optar pela realização de simulações computacionais de transporte de contaminantes para avaliação da influência da geometria do sistema de infiltração.

Para a análise da geometria, é fato que não faz diferença qual o contaminante que está sendo carregado pelo solvente infiltrado, salvo aqueles que possam reagir com o meio e gerar processos de retardamento em pontos diferentes ou redução da massa do contaminante. Na realidade, o fenômeno difusivo em si é que está sendo analisado. Dessa forma, as leis de Fick é que serão utilizadas como equações diferenciais para realizar as análises. Destaca-se que será a variação da geometria do domínio de entrada da infiltração que será tratada como ponto central (trincheiras triangulares, retangulares e circulares).

Os procedimentos para a realização das simulações foram os seguintes: considerar a seção longitudinal da trincheira (geometria retangular e triangular) e poço (de geometria circular) numa região em que não houvesse gradiente de massa do soluto no alinhamento do eixo Z (ou seja, não há propagação de contaminação no eixo z; somente no plano x – y). O segundo conceito utilizado foi considerar que a seção estudada está totalmente imersa na região saturada

do solo sem presença de fluxo de água e de parâmetros ligados ao solo (ou seja, é uma situação de lençol freático muito alto e saturado). As equações das simulações foram resolvidas por meio dos métodos de elementos finitos em uma implementação no software Mathematica v10.1.0.0, desenvolvido por Wolfram em 2015.

Inicialmente foi realizada uma simulação para acompanhar a propagação da pluma de concentração do contaminante e comparar os resultados entre as geometrias. Na sequência, realizaram-se medições de quão distantes iam certas plumas de concentração do soluto em relação ao centro geométrico, para depois apurar se existe alguma correlação do formato do elemento de infiltração com o alcance da frente contaminante.

#### **4.1. Descrição da metodologia para a análise de casos e de parâmetros**

##### **4.1.1. Modelo numérico**

O fenômeno do transporte de contaminantes é regido pela advecção e pela dispersão hidrodinâmica, sendo essa última propriedade constituída por parcela da dispersão mecânica e outra relacionada a difusão. Para o caso em estudo no presente trabalho, como não há fluxo advectivo envolvido (o lençol é alto e já está praticamente carregado, portanto as velocidades de fluxo estão muito próximas de 0), apenas a difusão é importante na análise. É importante salientar que as propriedades do contaminante e do meio poroso considerado não foram incluídas na análise uma vez que levar esses fatores em conta traria influências externas, impossibilitando a compreensão da condição isolada da geometria do elemento de infiltração. Com isso, será adotada somente a equação (3.2 nos planos X e Y para a simulação numérica, que será feita por meio de uma rotina de elementos finitos no programa Mathematica v10.1.0.0 (Wolfram, 2015). O script do programa foi elaborado pelo autor e uma cópia encontra-se no APÊNDICE A - .

Mathematica é um programa de computador desenvolvido pela empresa Wolfram Research que implementa um sistema de álgebra computacional para resolução de qualquer equação, processamento de dados, análise gráfica, análise de imagem, elementos finitos, equações diferenciais parciais, etc..

A forma de criação do cálculo, análise, etc., é feita através do formato de arquivo chamado notebook (.nb) que consiste numa página em branco e inserção dos comandos é feita manualmente pelo usuário por meio da digitação dos códigos pré-estabelecidos no

Mathematica. Toda a parte de inserção de dados e parâmetros, elaboração das fórmulas, resultados a serem exibidos, fica a cargo do usuário programar, enquanto o software realiza todo o processo de interpretação e cálculo do script. O programa tem um grande fornecimento de ajuda na forma de utilizar os códigos, sendo por meio de explicações literais do funcionamento da compilação ou por meio de aplicações práticas com exemplos explicando passo a passo.

O computador utilizado para as simulações foi processador AMD Phenom™ II X4 3.00 GHz, 2x4 GB (dual channel) de memória RAM e programa Mathematica v10.1.0.0 (Wolfram, 2015)

#### 4.1.1.1. Geometria, condições iniciais e malha

Para o estudo do comportamento da pluma de contaminação utilizou-se dois formatos de base comuns encontrados nas biografias atualmente, o formato circular para poços e retangulares para trincheiras. Porém, pensando em opções diferentes que possam ser de utilidade prática, foi analisado o comportamento da pluma na geometria do triângulo equilátero e do triângulo retângulo.

A análise em 2D teve como foco acompanhar o desenvolvimento da geometria da pluma no plano da projeção superior (X e Y) da trincheira ou poço. Os formatos de trincheira e poços tiveram como critério de padronização manter o mesmo perímetro geométrico para garantir o grau de comparação da difusão semelhante nas regiões de contorno e todos os centros geométricos localizados no centro do domínio. A Tabela 4.1 retrata as geometrias e respectivas características, e a Figura 4.1 corresponde a representação exemplificada do lançamento em 2D correspondente à, que no caso apresentado, refere-se a geométrica circular.

Tabela 4.1 - Geometria e respectivas propriedades dos formatos de poços e trincheiras simuladas

Tipo	Dimensões (m)	Perímetro (m)	Área da Base (m <sup>2</sup> )	Relação Perímetro/Área da Base
Circular	Raio = 0,50	3,14	0,79	4,00
Quadrado	Largura = 0,78 Comprimento = 0,79		0,62	5,09
Retangular	Largura = 0,30 Comprimento = 1,27		0,38	8,24
Triângulo equilátero	Lado = 1,05		0,47	6,62
Triângulo retângulo isósceles	Catetos = 0,92 Hipotenusa = 1,30		0,42	7,42

Triângulo retângulo	Catetos = 0,37 e 1,36 Hipotenusa = 1,41		0,25	12,48
Circular	Raio = 1	6,28	3,14	2,00
Quadrado	Largura = 1,57 Comprimento = 1,57		2,47	2,55
Retangular	Largura = 0,6 Comprimento = 2,54		1,52	4,12
Triângulo equilátero	Lado = 2,09		1,90	3,31
Triângulo retângulo Isósceles	Catetos = 1,84 Hipotenusa = 2,60		1,69	3,71
Triângulo retângulo	Catetos = 0,74 e 2,72 Hipotenusa = 2,82		1,01	6,24
Circular	Raio = 1,5	9,42	7,07	1,33
Quadrado	Largura = 2,36 Comprimento = 2,35		5,55	1,70
Retangular	Largura = 0,9 Comprimento = 3,81		3,43	2,72
Triângulo equilátero	Lado = 3,14		4,27	2,21
Triângulo retângulo Isósceles	Catetos = 2,76 Hipotenusa = 3,90		3,81	2,47
Triângulo retângulo	Catetos = 1,11 e 4,08 Hipotenusa = 4,23		2,26	4,16
Circular	Raio = 2	12,57	12,57	1,00
Quadrado	Largura = 3,14 Comprimento = 3,14		9,87	1,27
Retangular	Largura = 1,2 Comprimento = 5,08		6,10	2,06
Triângulo equilátero	Lado = 4,19		7,60	1,65
Triângulo retângulo Isósceles	Catetos = 3,68 Hipotenusa = 5,20	12,56	6,77	1,86
Triângulo retângulo	Catetos = 1,5 e 5,43 Hipotenusa = 5,63		4,07	3,08

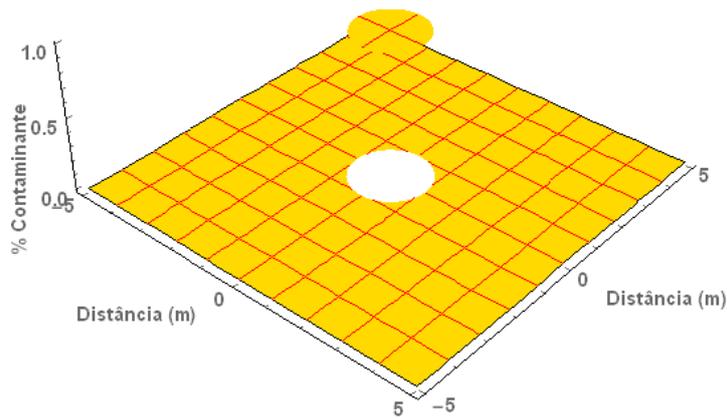


Figura 4.1 - Representação do estado inicial da análise em 2D

Os perímetros escolhidos foram resultados da variação do raio do poço de infiltração, ou seja, adotou-se valores para as dimensões do círculo e as dimensões dos outros formatos (retângulo, triângulo equilátero e triângulo retângulo) eram calculados em função do perímetro do círculo.

Na análise 2D, a pressão hidrostática no elemento de infiltração e no lençol freático não foi considerado devido a esse fator influenciar somente no fluxo de transmissão da água do interior do sistema para o lençol freático (advecção). Caso haja gradiente de pressão hidrostática entre a região da trincheira e da região saturada, a dispersão do elemento contaminante ocorrerá mais rápido ou mais lento devido a dispersão mecânica. Foi adotado valor igual a 1 para o coeficiente de difusão do poluente no solo pelo motivo de ser um fator que apenas contribui na velocidade de propagação no meio líquido. O tempo necessário para se chegar a certa dimensão ou distâncias da pluma não objeto desta monografia, mas os formatos encontrados em certos períodos de tempo será levado em consideração. Não foi atribuído um fluxo direcional no meio saturado devido essa propriedade proporcionar deformações na pluma ao longo do tempo. A concentração do elemento contaminante na água dentro do sistema de infiltração foi fixada em 100% e sem reposição.

Os domínios representam a parte saturada do solo e tiveram seus tamanhos ajustados de forma a seguir os seguintes critérios: não gerar interferência nos resultados próximo aos limites do domínio (regiões onde não tivessem mais variações relevantes para as condições desejadas) e gerar imagens capazes de serem apresentadas na versão escrita desta dissertação. O nível da zona saturada manteve-se constante ao longo de todo o intervalo de tempo estudado e solo sendo isotrópico. E por fim, a concentração do contaminante inicial no maciço corresponde a 0%.

Foram utilizadas duas malhas nas análises em 2D, porém não puderam ser apresentadas nesta monografia devido à alta densidade de elementos dificultar a apresentação em forma impressa. Uma malha foi adotada para os elementos de infiltração com perímetros 3,14 m e 6,28 m, com os limites da região do domínio entre -5 m e +5 m nos eixos x e y, precisão dos elementos finitos igual a 0,0005. Enquanto que outra malha foi adotada para os elementos com perímetros iguais a 9,42 m e 12,57 m, tendo o limite da região do domínio o intervalo compreendido entre -10 m e +10 m nos eixos x e y, precisão dos elementos finitos igual a 0,005.

## 4.2. Resultados e análise

### • Em relação ao formato

As geometrias analisadas para as quatro variações de perímetros tiveram três tipos de comportamentos (Figura 4.2 a Figura 4.25). Em três das geometrias (circular, quadrada e triângulo equilátero), os níveis de concentração do contaminante resultaram na forma circular e de centro localizado no mesmo centro dos elementos de infiltração. Esse comportamento já era esperado nas geometrias do retângulo, círculo e triângulo equilátero devido a simetria em diversos eixos. Já nas geometria retangular e triângulo isósceles as plumas contaminantes tenderam num tempo curto formato elíptico que pode ser correlacionado ao fato de essas geometrias terem apenas um eixo de simetria, mas após certo período de tempo tenderam a um formato de aproximadamente igual a um círculo. A terceira e último tipo de comportamento encontrado na pluma foi a do triângulo retângulo com lados diferentes entre si. Essa geometria inicialmente não resultou a nenhum formato de fácil conhecimento de suas dimensões, mas após certo período de tempo, também resultou numa pluma circular.

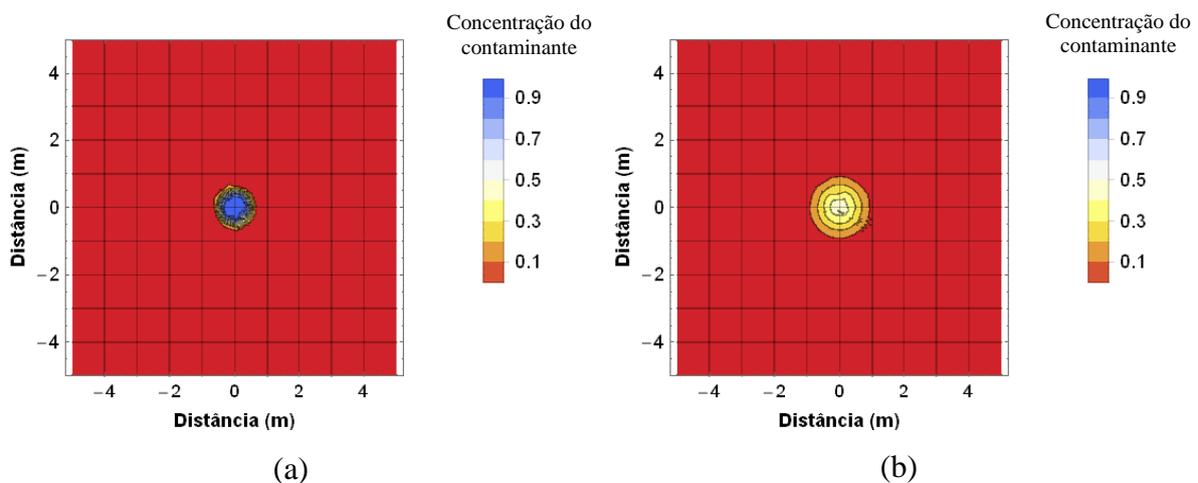


Figura 4.2 - Formato Circular com raio igual a 0,5m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1

Concentração do  
contaminante

Concentração do  
contaminante

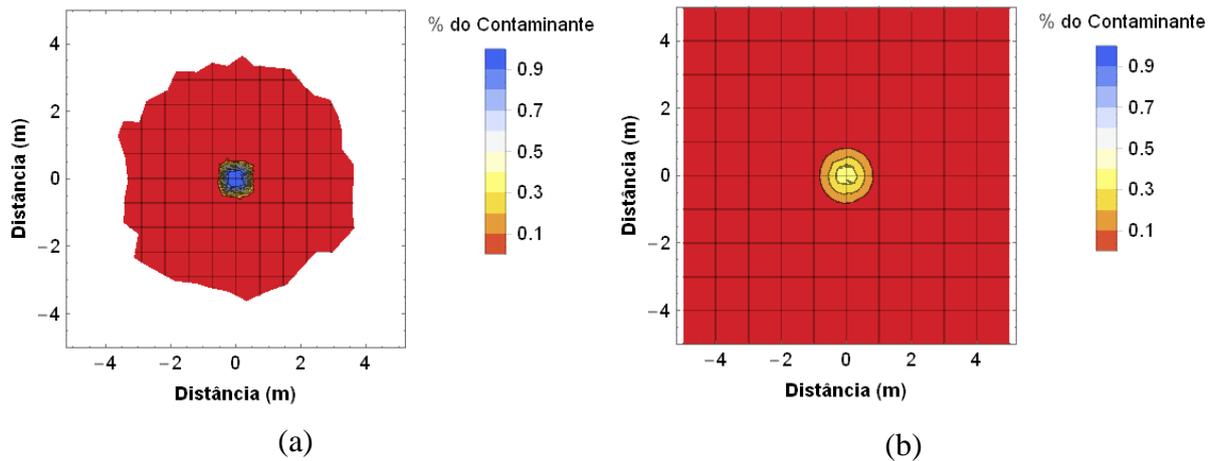


Figura 4.3 - Formato Quadrado dimensão 0,78 x 0,79 m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0

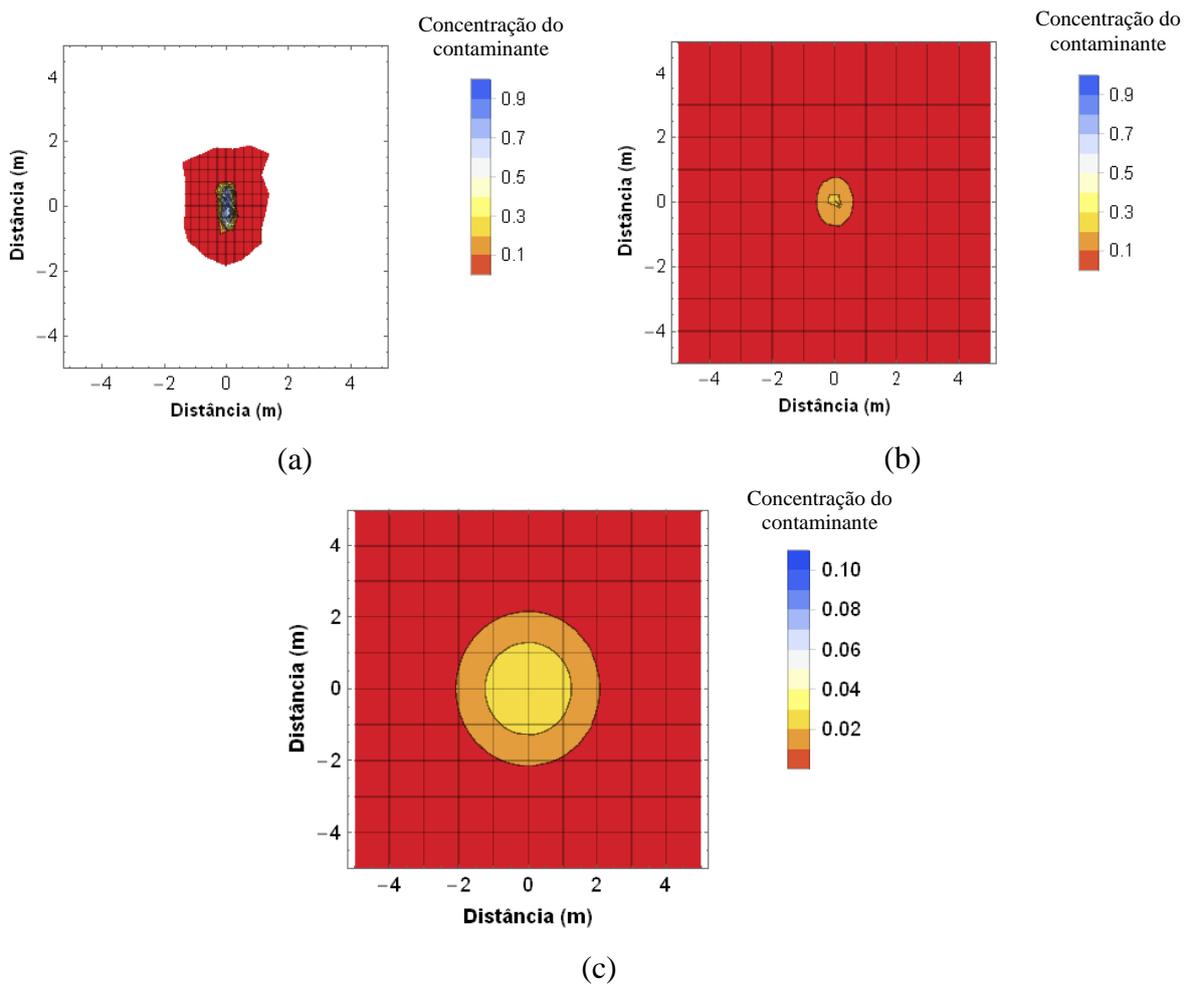


Figura 4.4 - Formato Retangular dimensão 0,3 x 1,27 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,1, (c) 1. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0

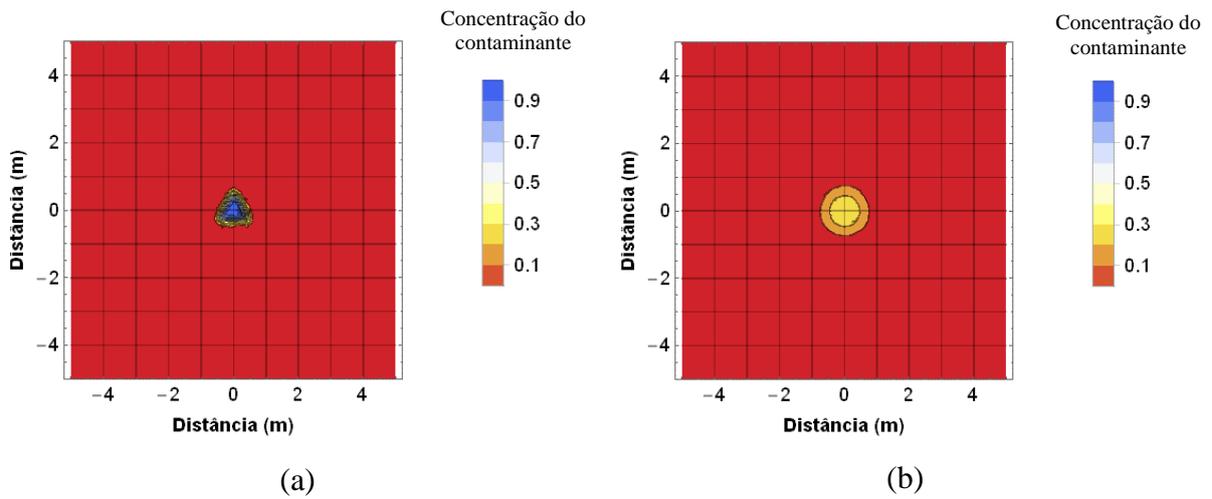


Figura 4.5 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 0,5m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1

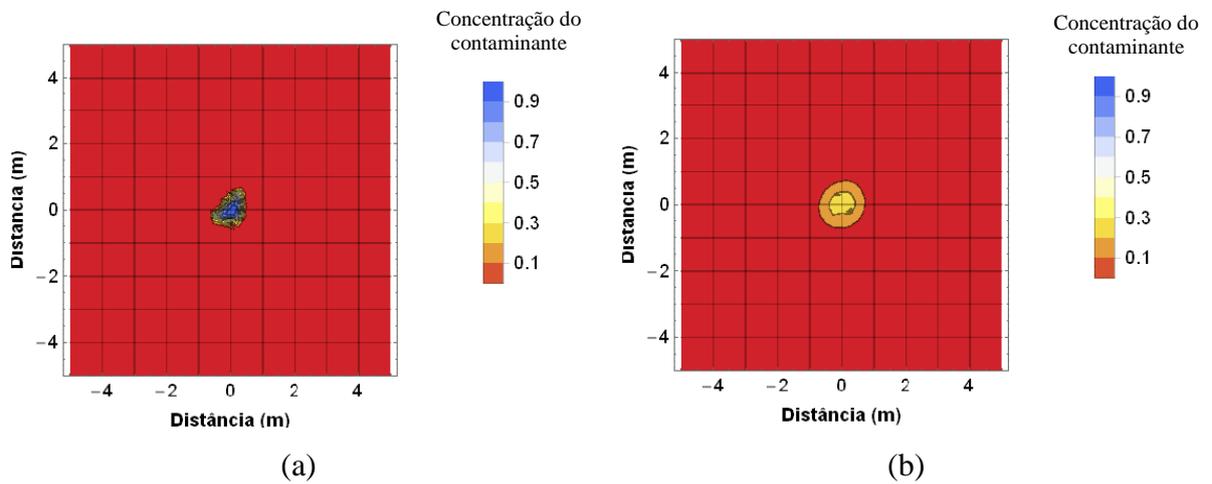


Figura 4.6 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 0,92m e no tempo (a) 0,005 e (b) 0,1

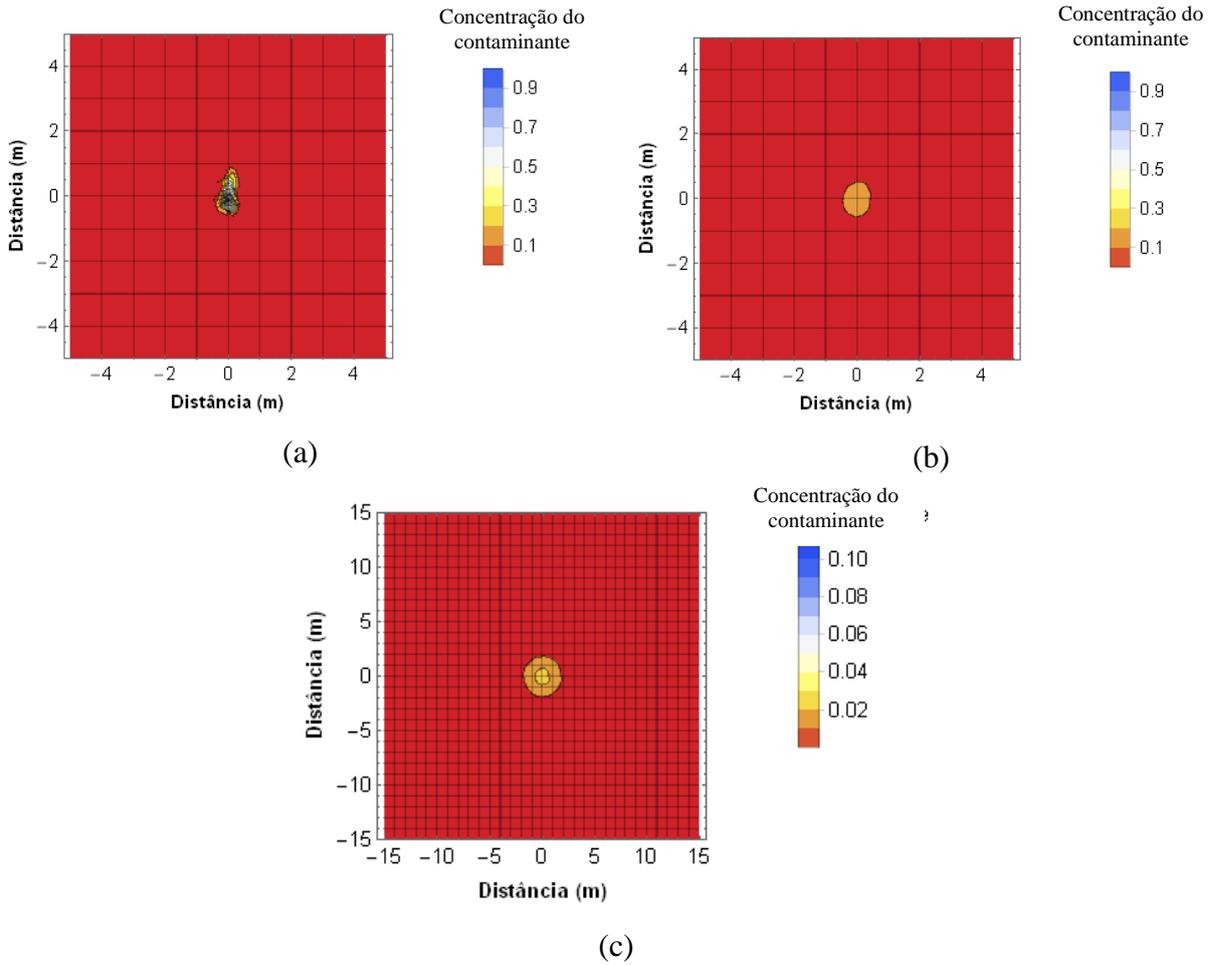


Figura 4.7 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 0,37 e 1,36 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,1, (c) 1

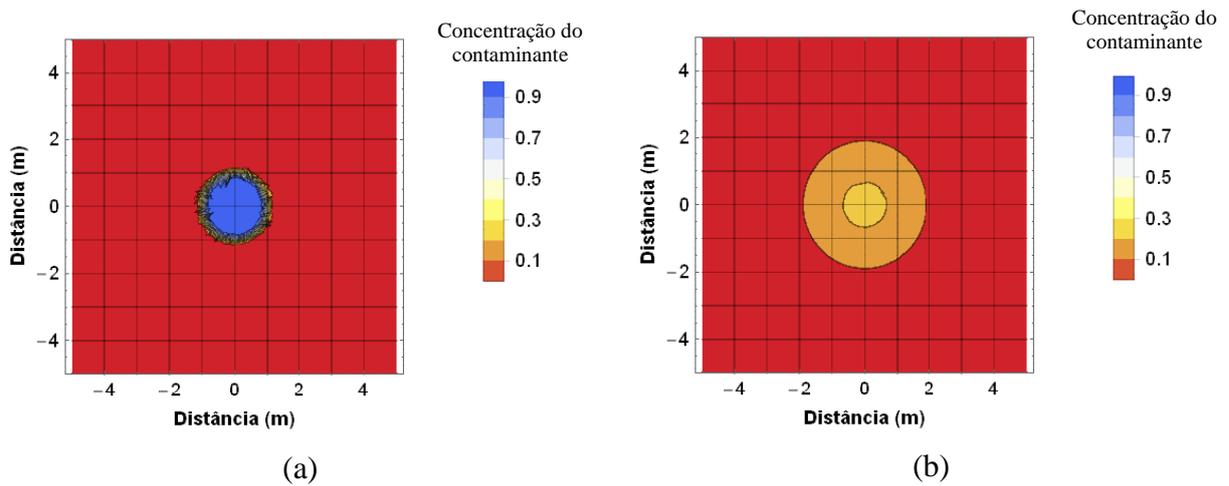


Figura 4.8 - Formato Circular com raio igual a 1,0m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1

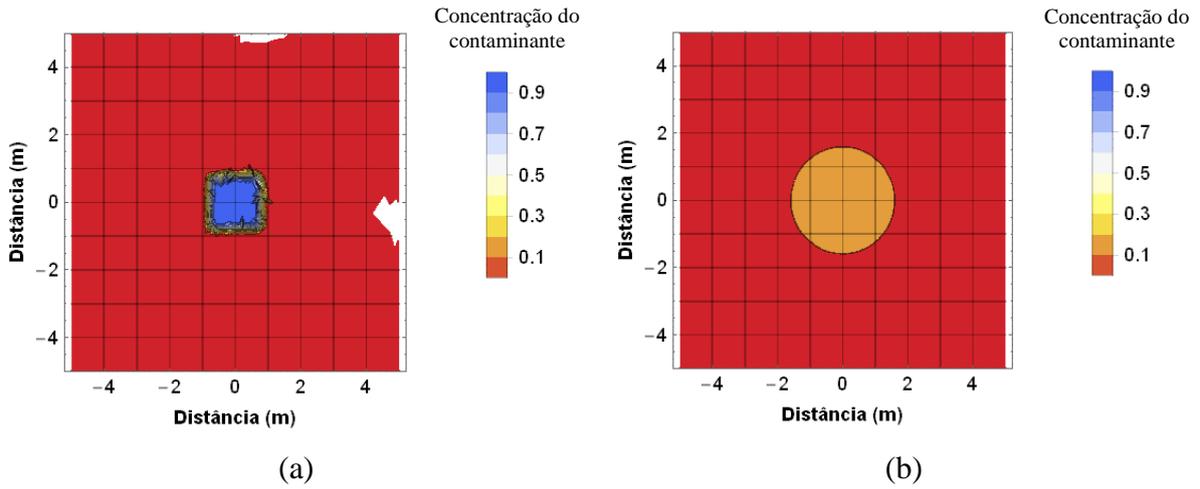


Figura 4.9 - Formato Quadrado dimensão 1,57 x 1,57 m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo o padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0

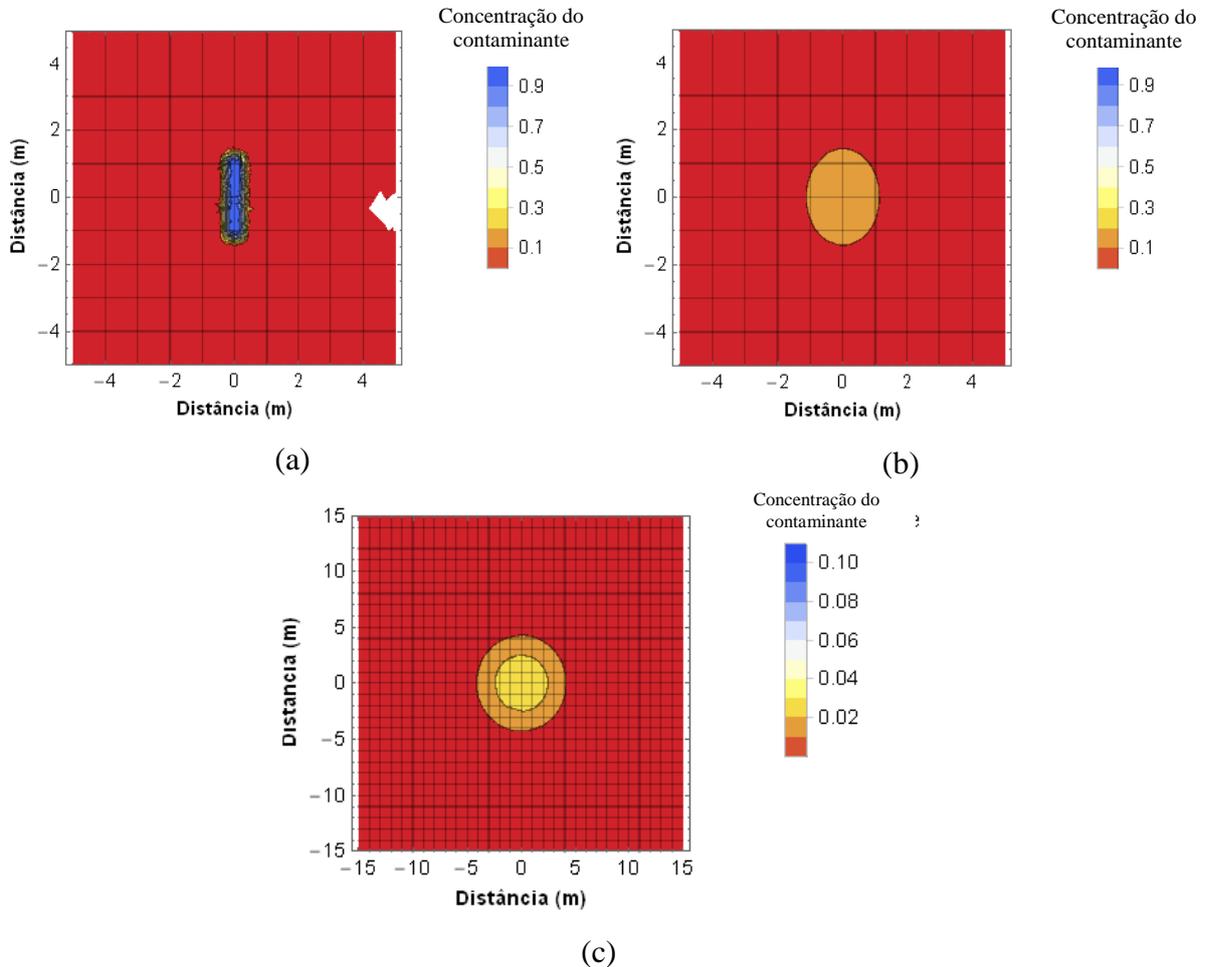


Figura 4.10 - Formato Quadrado dimensão 0,60 x 2,54 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,5, (c) 4. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo o padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0.

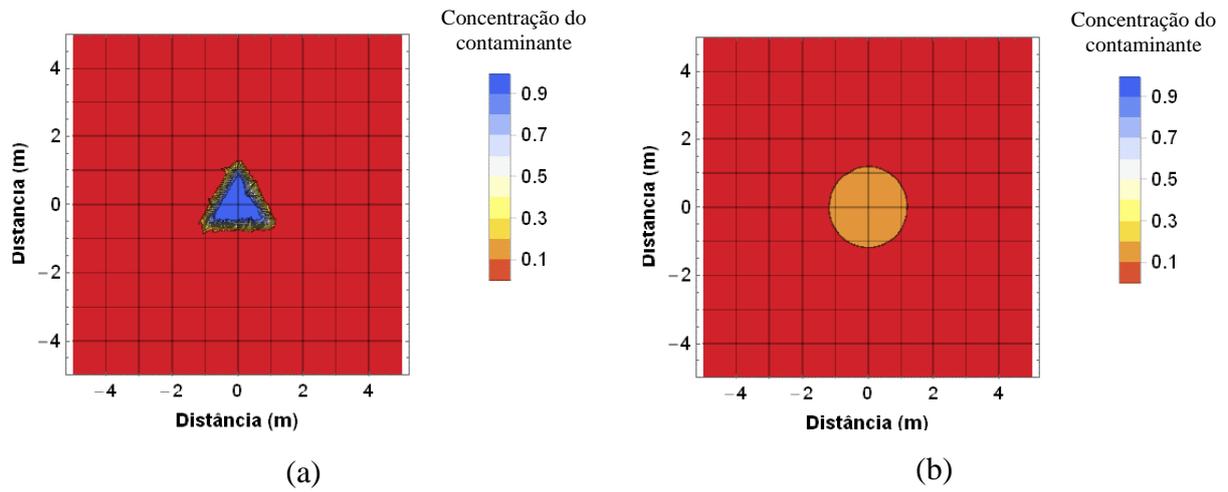


Figura 4.11 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 2,09m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1

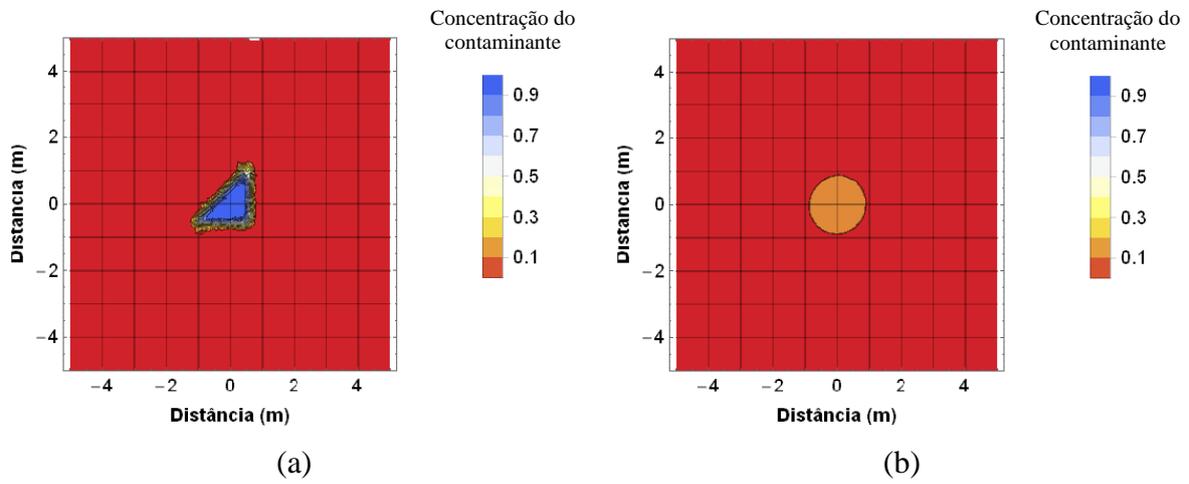


Figura 4.12 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 1,84m e no tempo (a) 0,005 e (b) 1

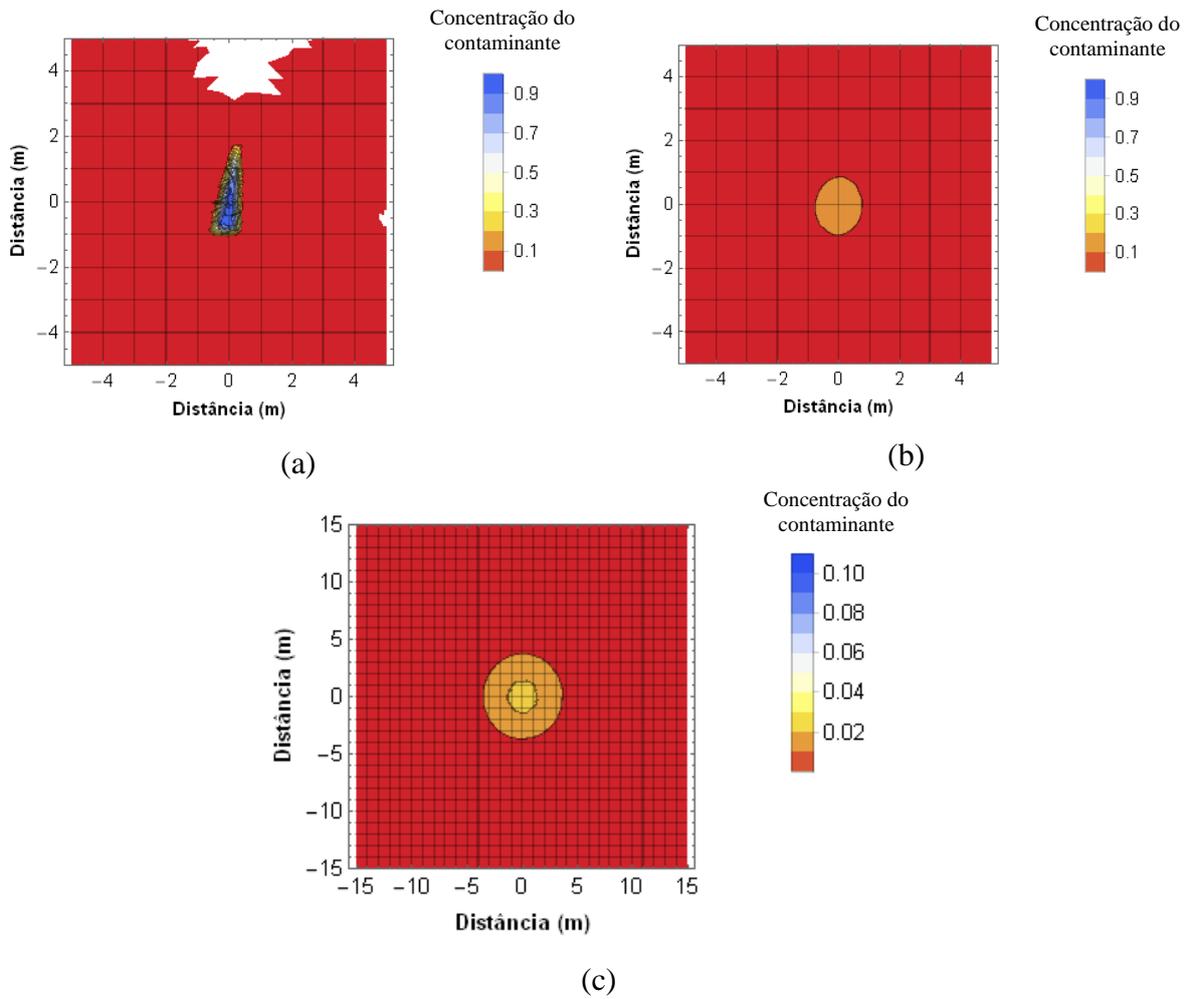


Figura 4.13 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 0,74 e 2,72 m e no tempo (a) 0,005, (b) 0,5, (c) 4. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo o padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0

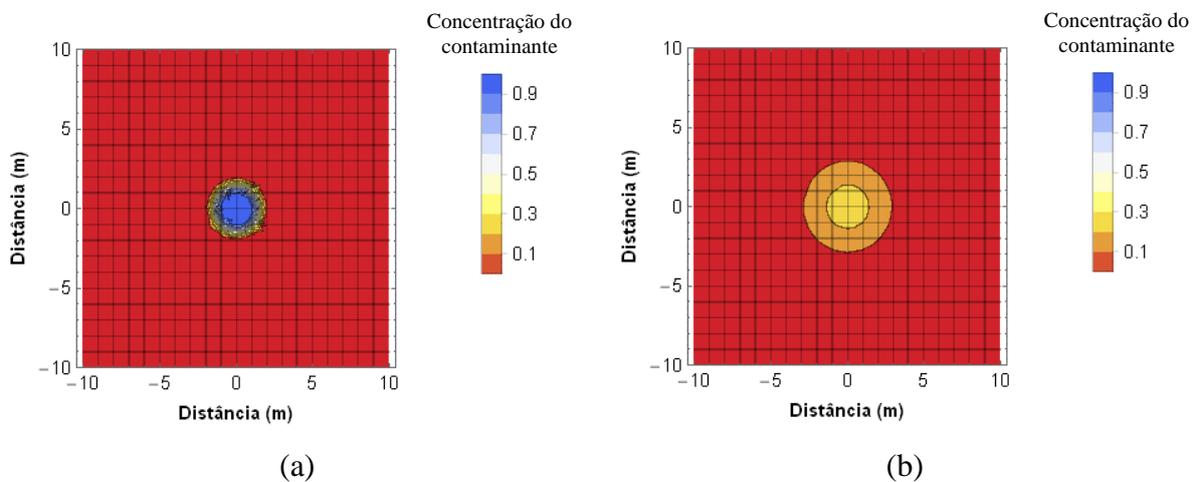


Figura 4.14 - Formato Circular com raio igual a 1,5m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2

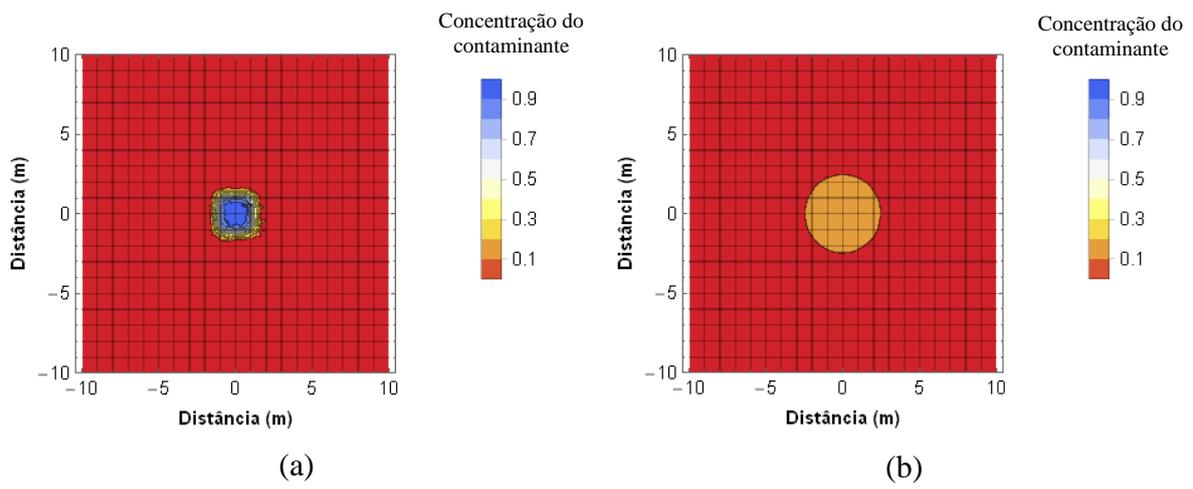


Figura 4.15 - Formato Quadrado dimensão 2,36 x 2,35 m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.

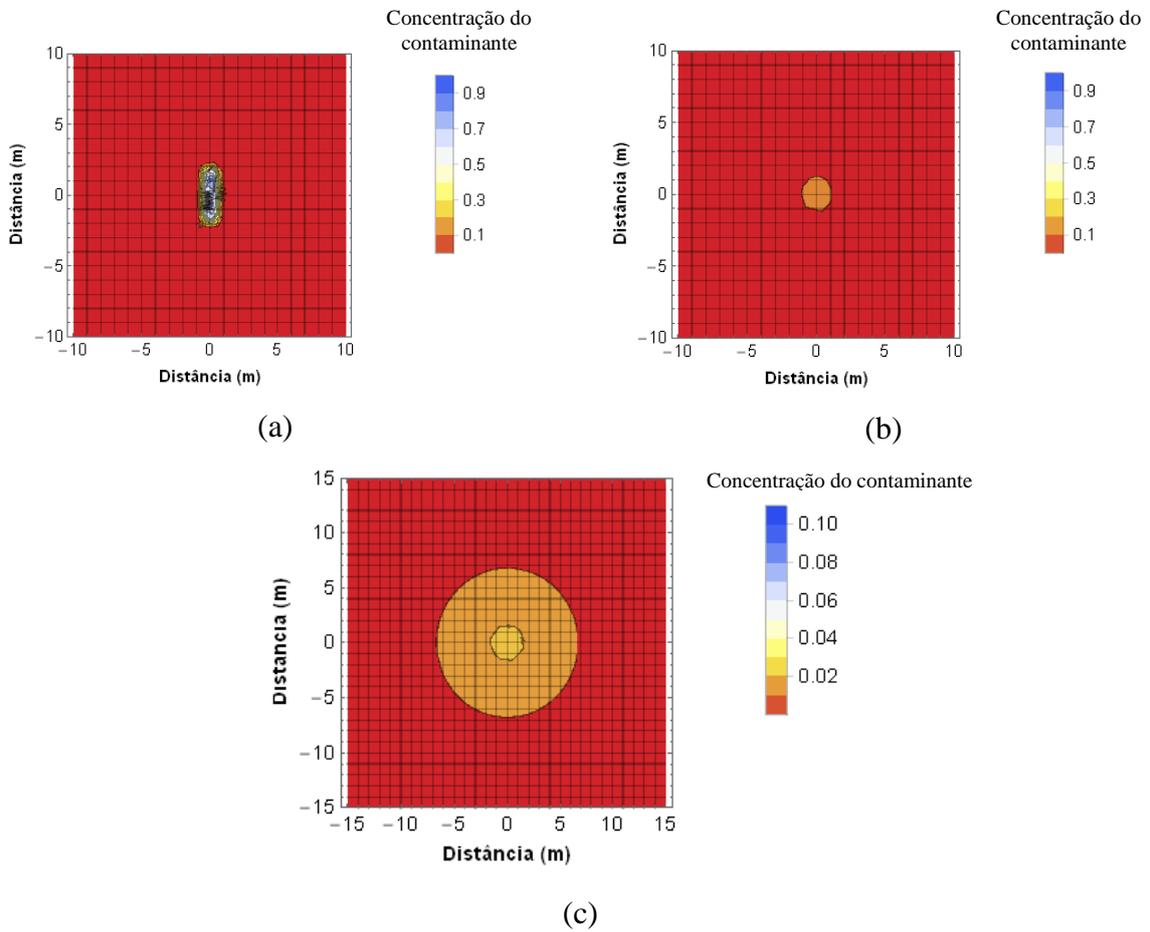


Figura 4.16 - Formato Retangular dimensão 0,90 x 3,81 m e no tempo (a) 0,05, (b) 2, (c) 15.

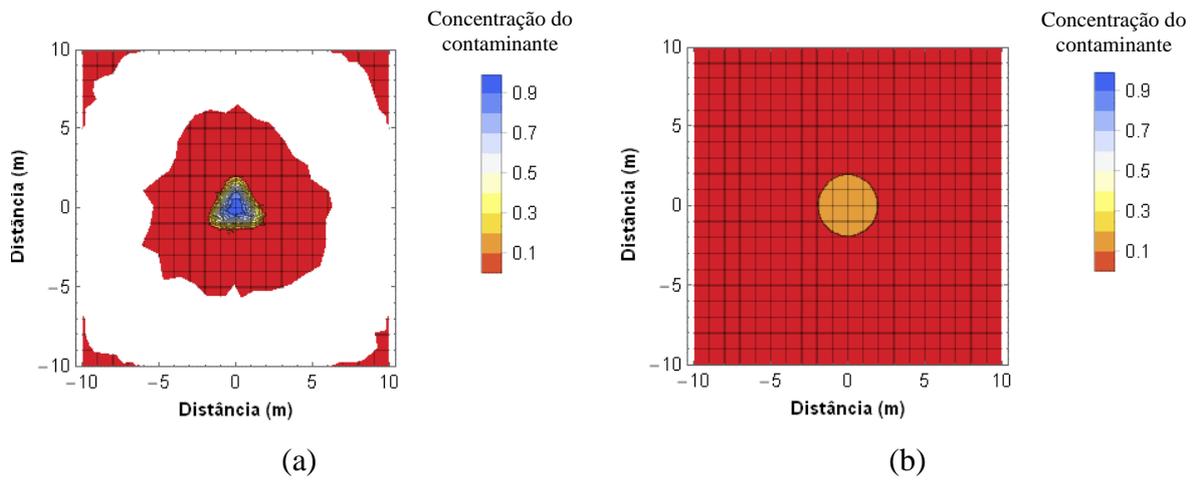


Figura 4.17 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 3,14m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2. Em (a) aparece parte da região do domínio em branco devido a malha não ser precisa o suficiente para apresentar os valores corretos, mas conclui-se que pelo padrão do resto do domínio o valor desta área em branca é 0,0

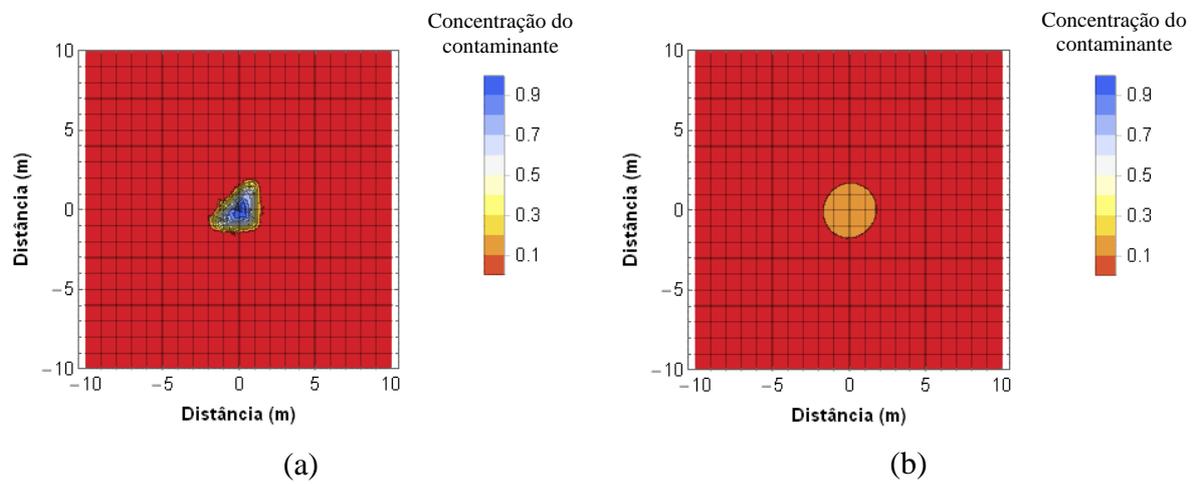


Figura 4.18 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 2,76m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2

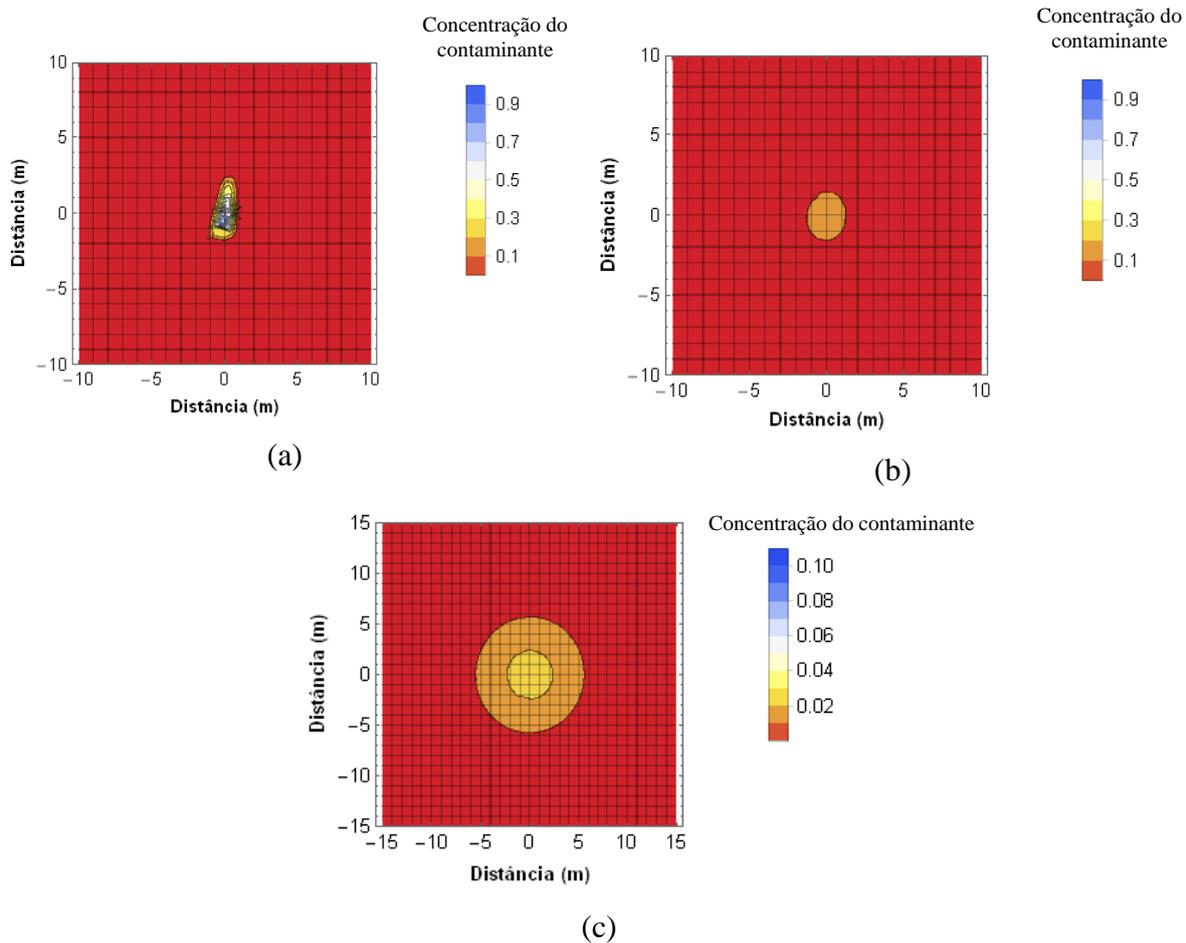


Figura 4.19 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 1,11 e 4,08 m e no tempo (a) 0,05, (b) 1, (c) 8

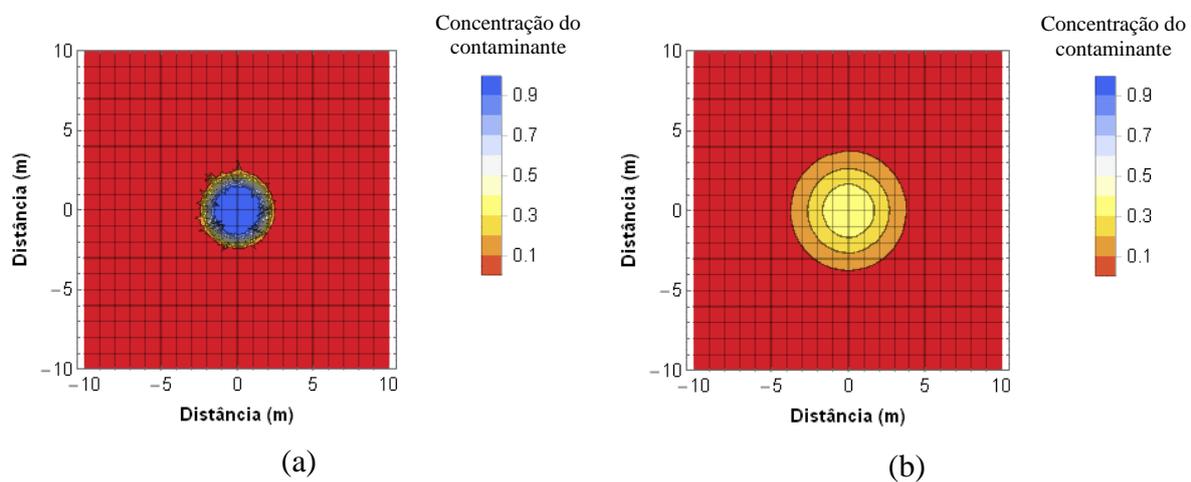


Figura 4.20 - Formato Circular com raio igual a 2,0m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2

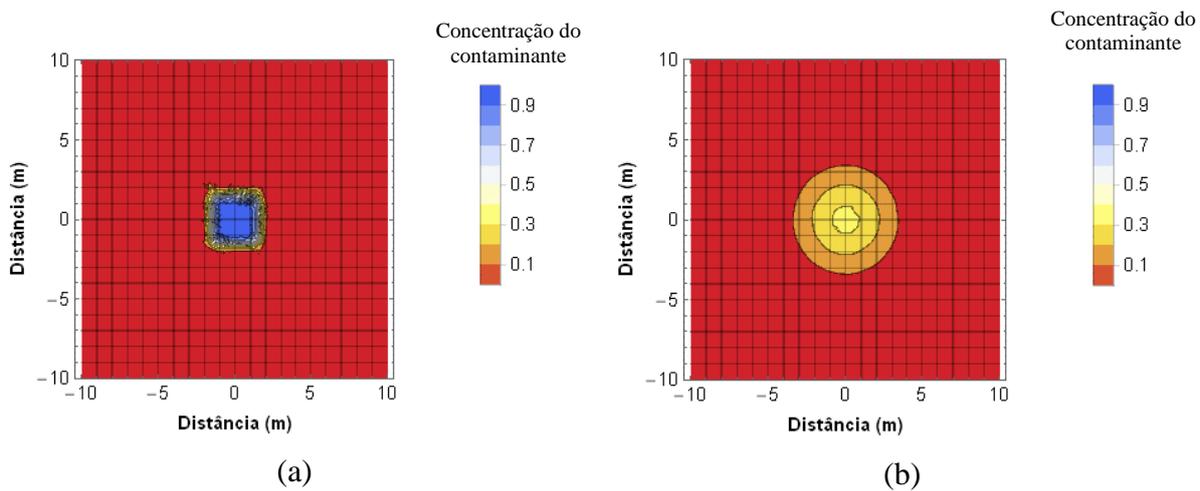


Figura 4.21 - Formato Quadrado dimensão 3,14 x 3,14 m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.

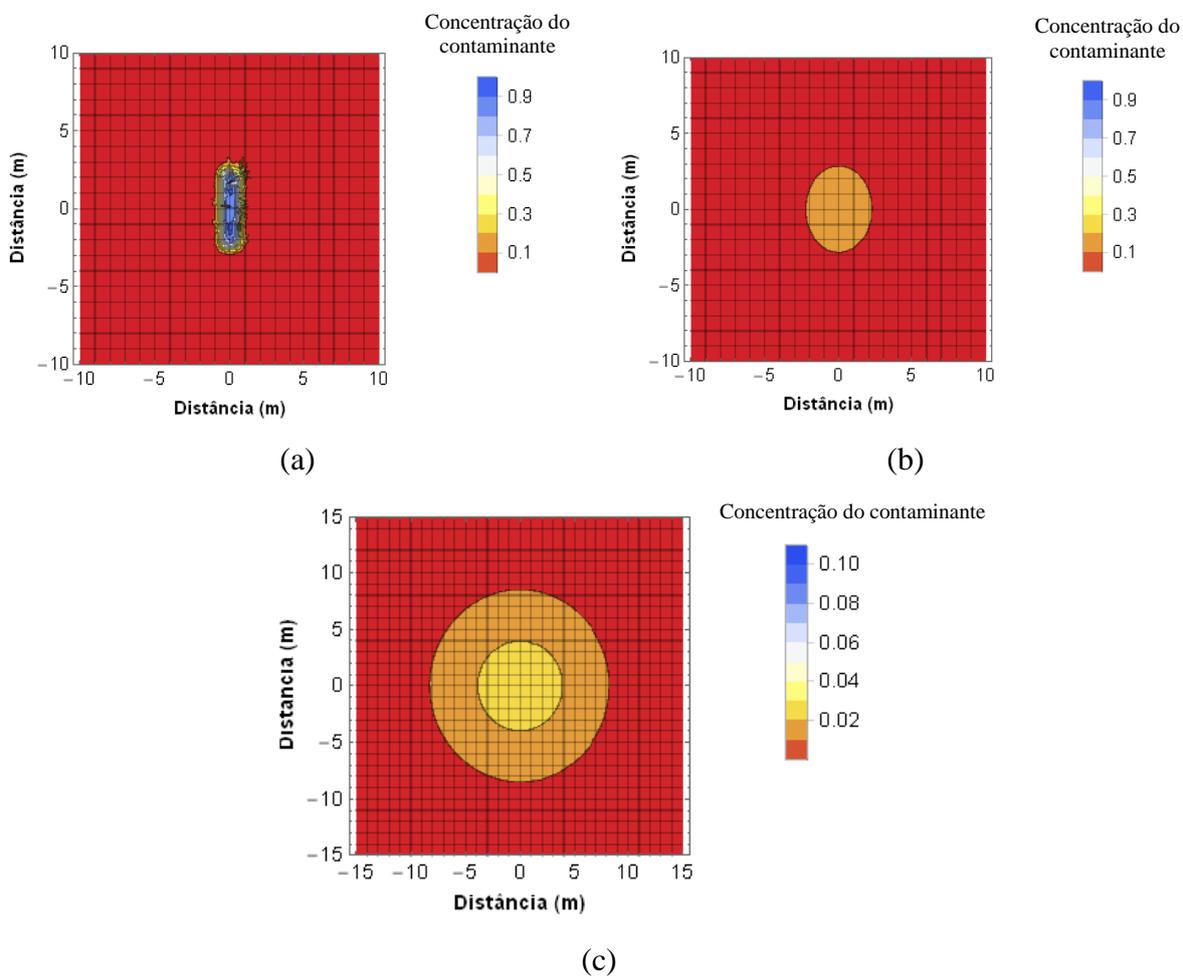


Figura 4.22 - Formato Retangular dimensão 1,2 x 5,08 m e no tempo (a) 0,05, (b) 2, (c) 20.

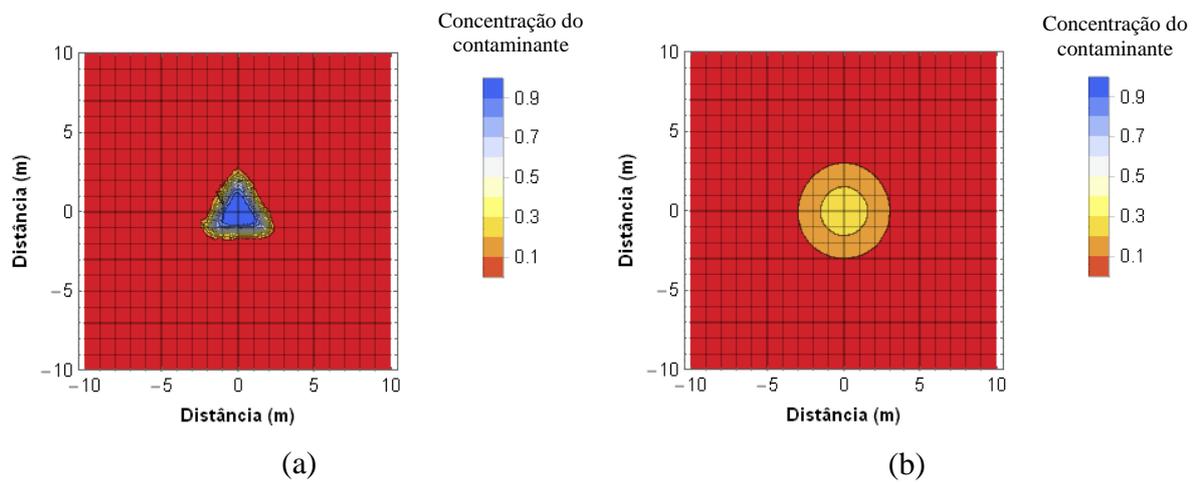


Figura 4.23 - Formato Triangular Equilátera com lados iguais a 4,19m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2.

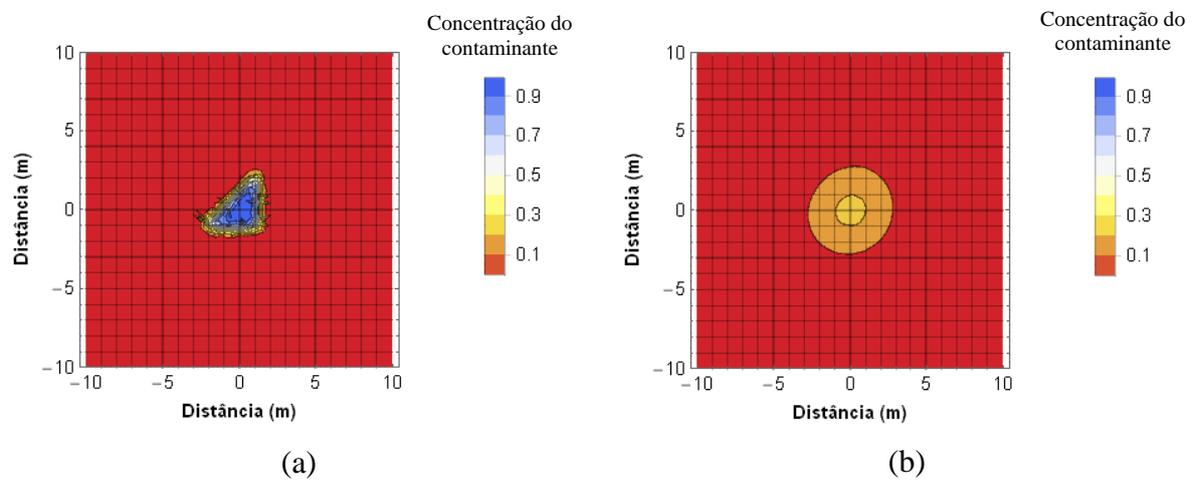


Figura 4.24 - Formato Triangular Retangular Isósceles com catetos iguais a 3,68m e no tempo (a) 0,05 e (b) 2

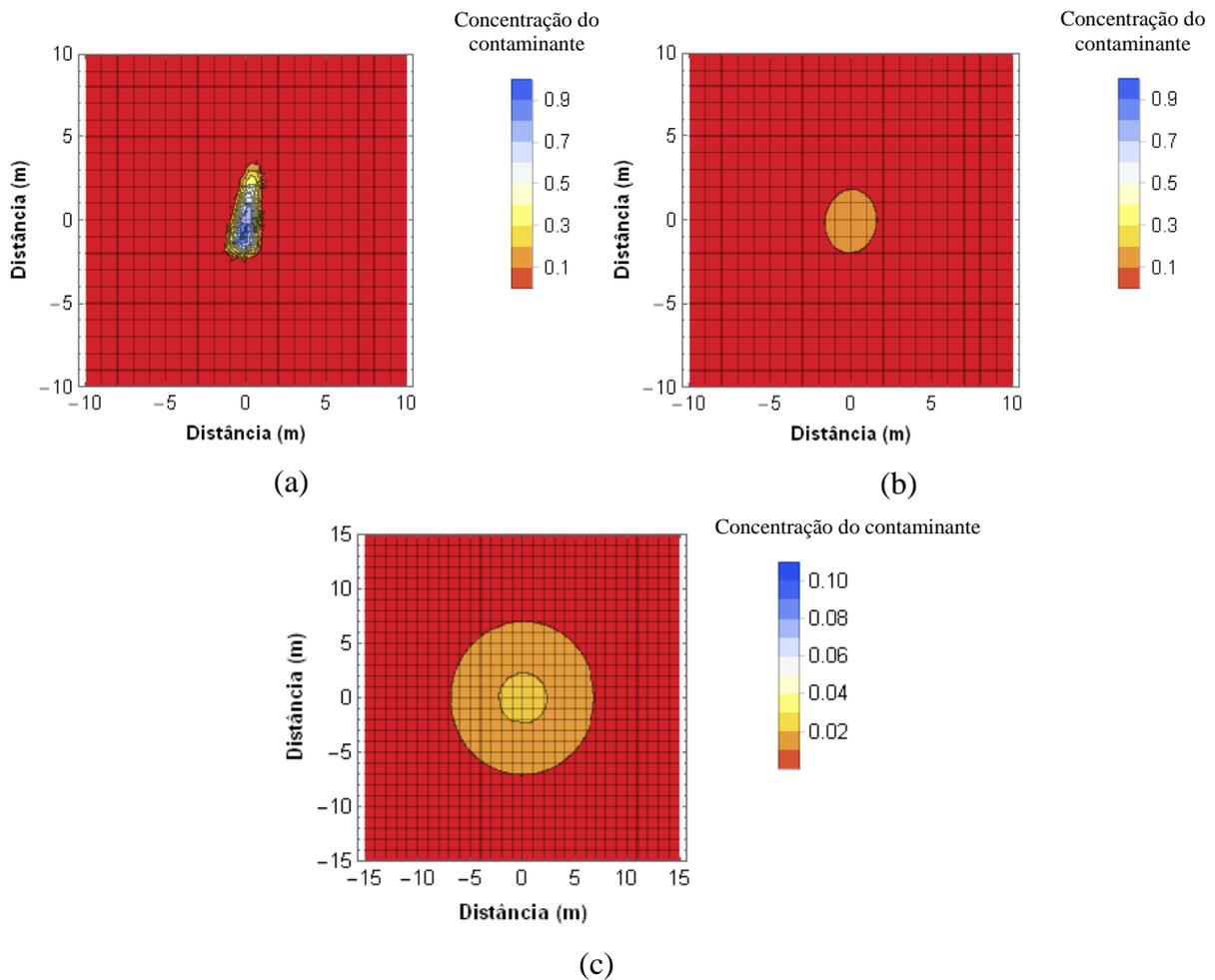


Figura 4.25 - Formato Triangular Retangular com catetos iguais a 1,5 e 5,43 m e no tempo (a) 0,05, (b) 2, (c) 15

Quando analisado o comportamento das geometrias com o mesmo perímetro e intervalo de tempo iguais, encontra níveis de concentrações do soluto diferentes. É possível perceber essa correlação verificando todas as figuras tipo (b) da Figura 4.2 a Figura 4.25, em que a circular apresenta quantidade maior de contaminante e nas outras seções tem-se quantidade menores seguindo a seguinte ordem decrescente, quadrada, triangular equilátero, triângulo retângulo isósceles, retângulo e triângulo retângulo. Esse comportamento é regido pela propriedade da área interna da geometria. Como a porção de soluto é limitada pelo espaço interno do formato capaz de armazenamento, aqueles formatos com áreas de base menores terão menor quantidade de massa do contaminante e conseqüentemente o processo de homogeneização ocorrerá mais rapidamente. O tamanho da área interna de cada formato e dimensão escolhido para as análises podem ser encontrados na Tabela 4.1 e as imagens originais utilizadas para acompanhar a difusão da pluma contaminante nesta monografia encontra-se no APÊNDICE B -

### Em relação ao alcance máximo

Nas simulações realizadas também analisou-se a relação entre as dimensões de fácil conhecimento (ex: raio do poço, lado do triângulo equilátero, etc) dos poços e trincheiras, e a distância máxima em que a zona circular resultante de até uma certa concentração de poluente poderia alcançar. Para realizar as comparações, acompanhou-se o afastamento máximo da região que continha a concentração de até 10% e outra de até 1%. Esses valores foram escolhidos para realizar uma comparação durante o processo intermediário de transporte do contaminante e outro quando o contaminante estiver em estado de quase estabilidade no domínio. As dimensões das geometrias dos elementos de infiltração foram as mesmas adotadas para a análise anterior em 2D.

As figuras Figura 4.26 a Figura 4.29 apresentam as localizações das medições das distâncias entre o centro do elemento de infiltração até o limite da região circular resultante de concentração até 10%. Nas figuras Figura 4.30 a Figura 4.33 mostram as mesmas informações para o caso da região até 1%. As verificações dos comprimentos foram feitas de forma visual e utilizando programa de Desenho Assistido por Computador (DAC ou do inglês, CAD). Cada unidade do greide equivale a 1m

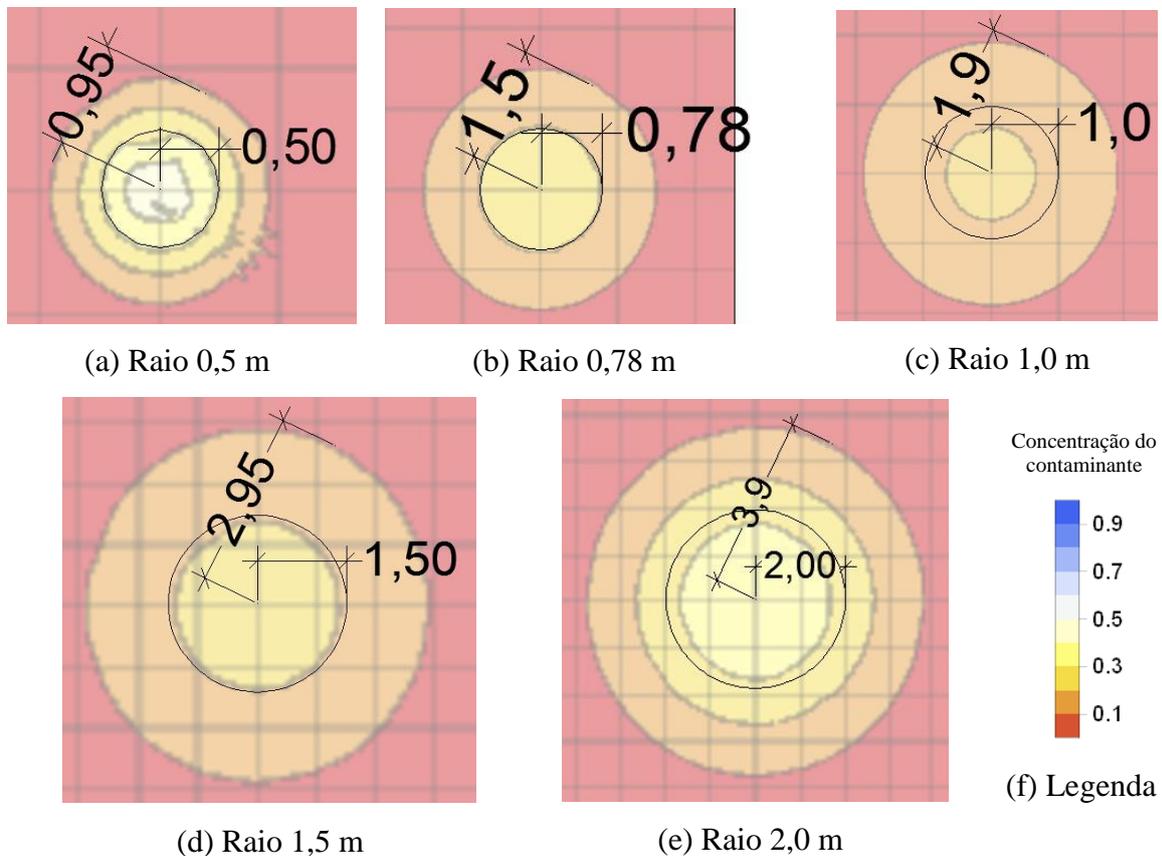


Figura 4.26 – Medidas de referência dos poços para região até 10% de concentração

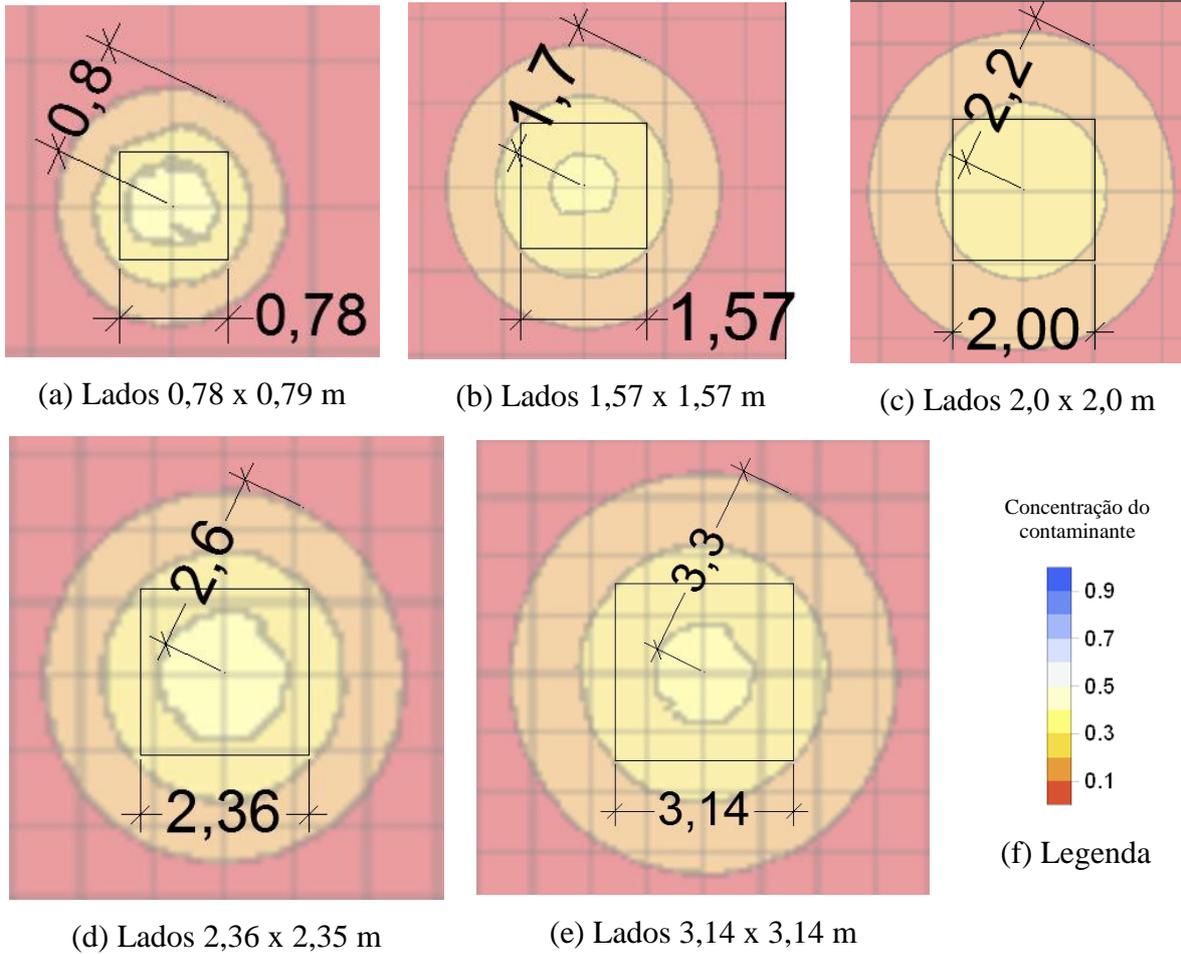


Figura 4.27 – Medidas de referência de trincheiras Retangulares para região até 10% de concentração

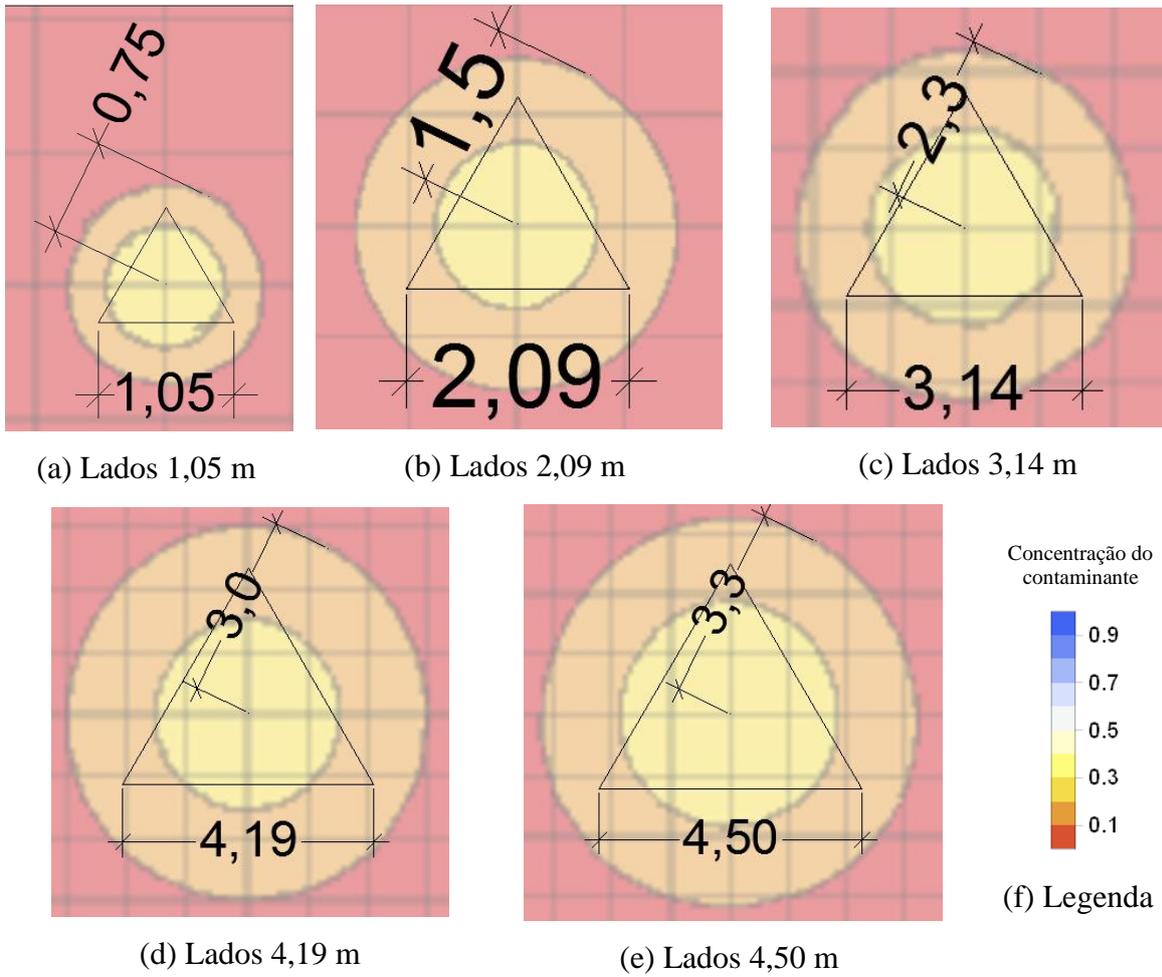
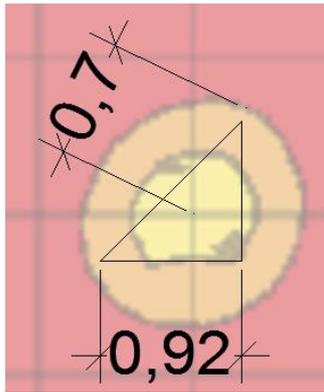
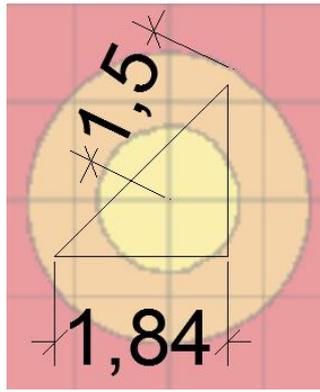


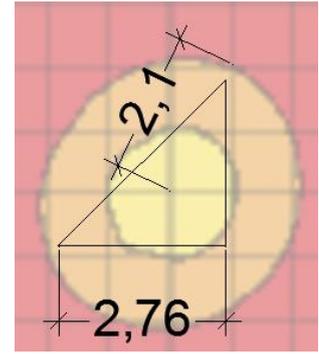
Figura 4.28 – Medidas de referência das trincheiras Triangulares Equiláteras para região até 10% de concentração



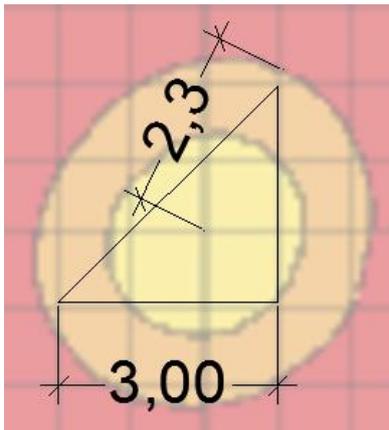
(a) Catetos 0,92 m



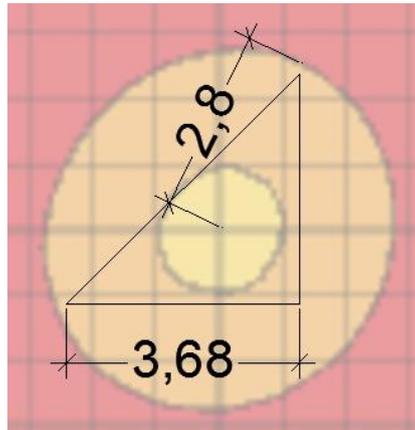
(b) Catetos 1,84 m



(c) Catetos 2,76 m

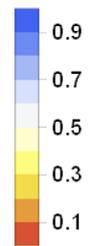


(d) Catetos 3,0 m



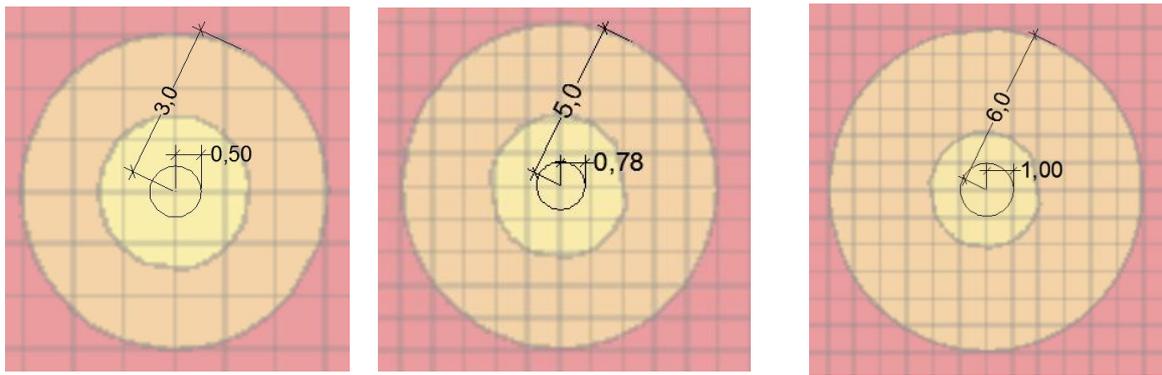
(e) Catetos 3,68 m

Concentração do contaminante



(f) Legenda

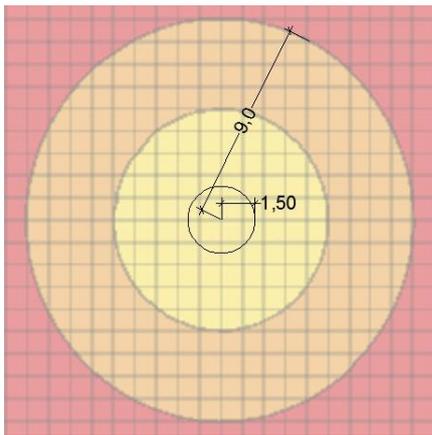
Figura 4.29 - Medidas de referência das trincheiras Triangulares Retangular Isósceles para região até 10% de concentração



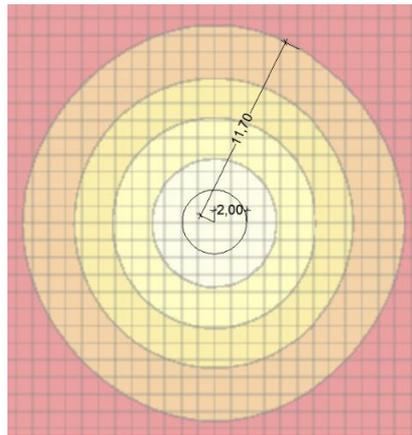
(a) Raio 0,5 m

(b) Raio 0,78 m

(c) Raio 1,0 m

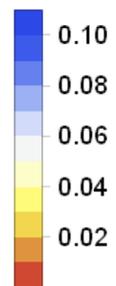


(d) Raio 1,5 m



(e) Raio 2,0 m

Concentração do contaminante



(f) Legenda

Figura 4.30 – Medidas de referência dos poços para região até 1% de concentração

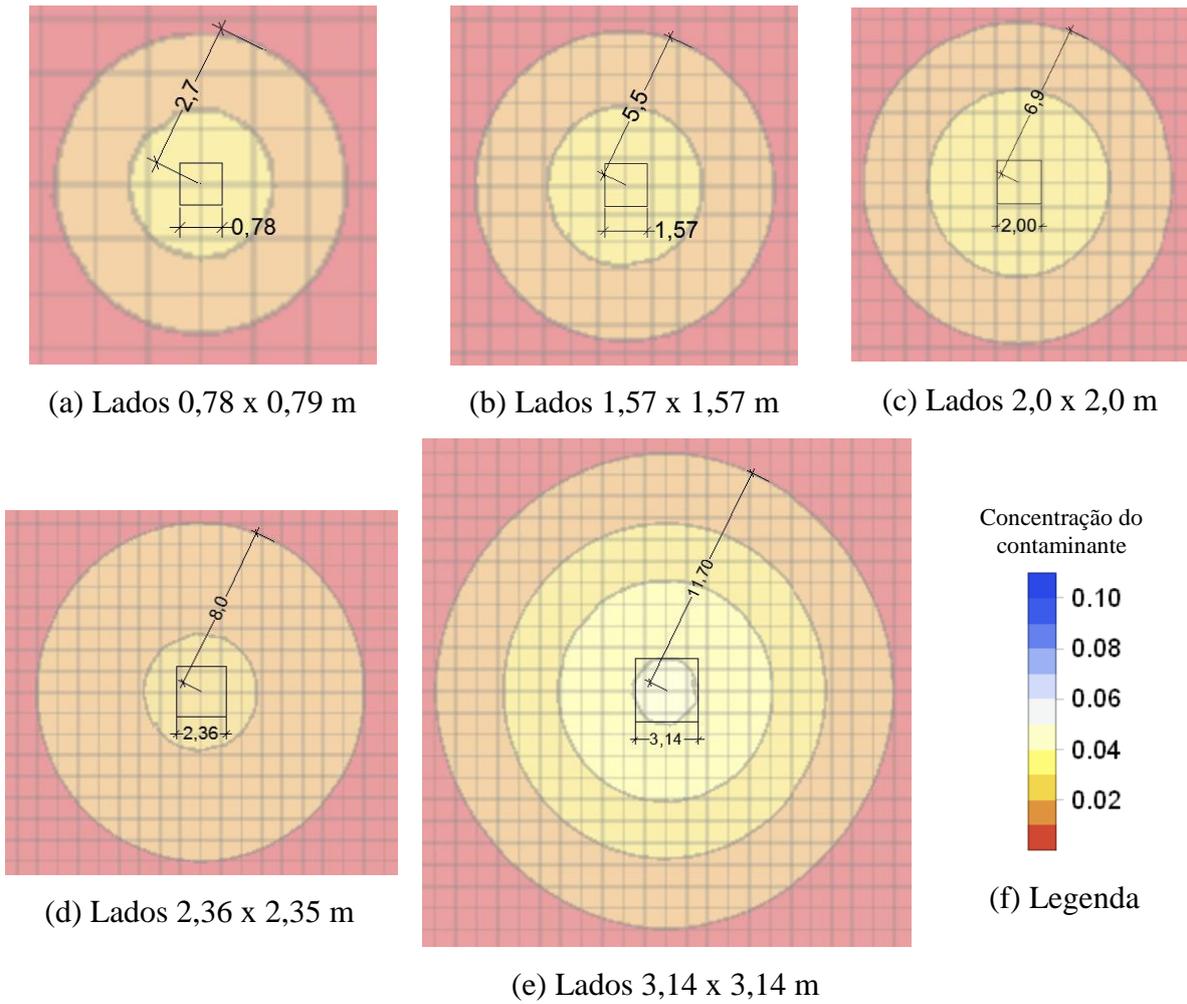
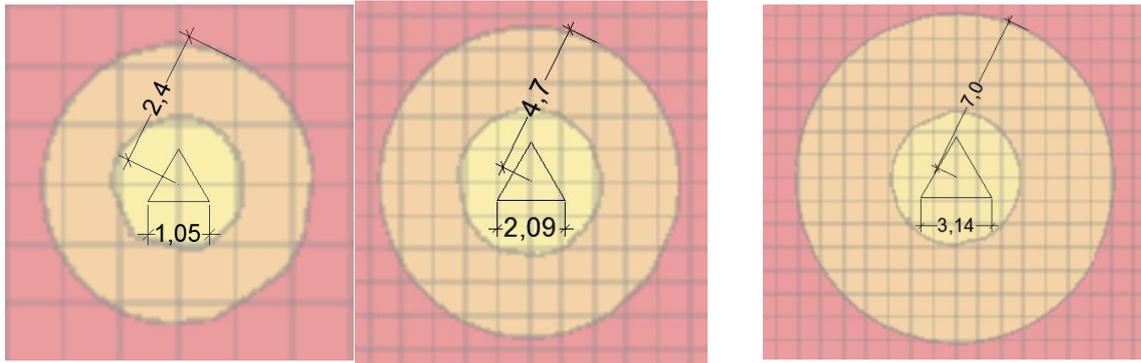


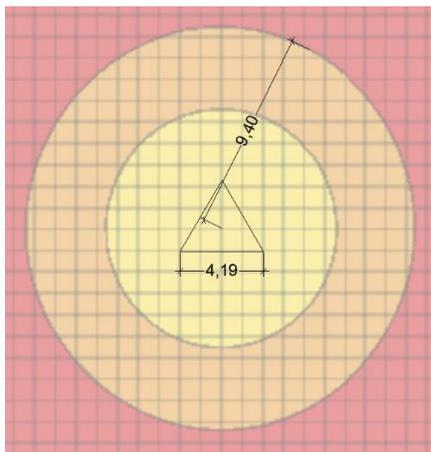
Figura 4.31 – Medidas de referência de trincheiras Retangulares para região até 1% de concentração



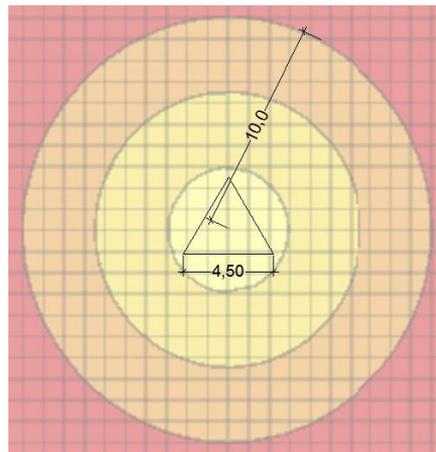
(a) Lados 1,05 m

(b) Lados 2,09 m

(c) Lados 3,14 m

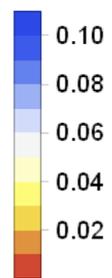


(d) Lados 4,19 m



(e) Lados 4,50 m

Concentração do contaminante



(f) Legenda

Figura 4.32 – Medidas de referência das trincheiras Triangulares Equiláteras para região até 1% de concentração

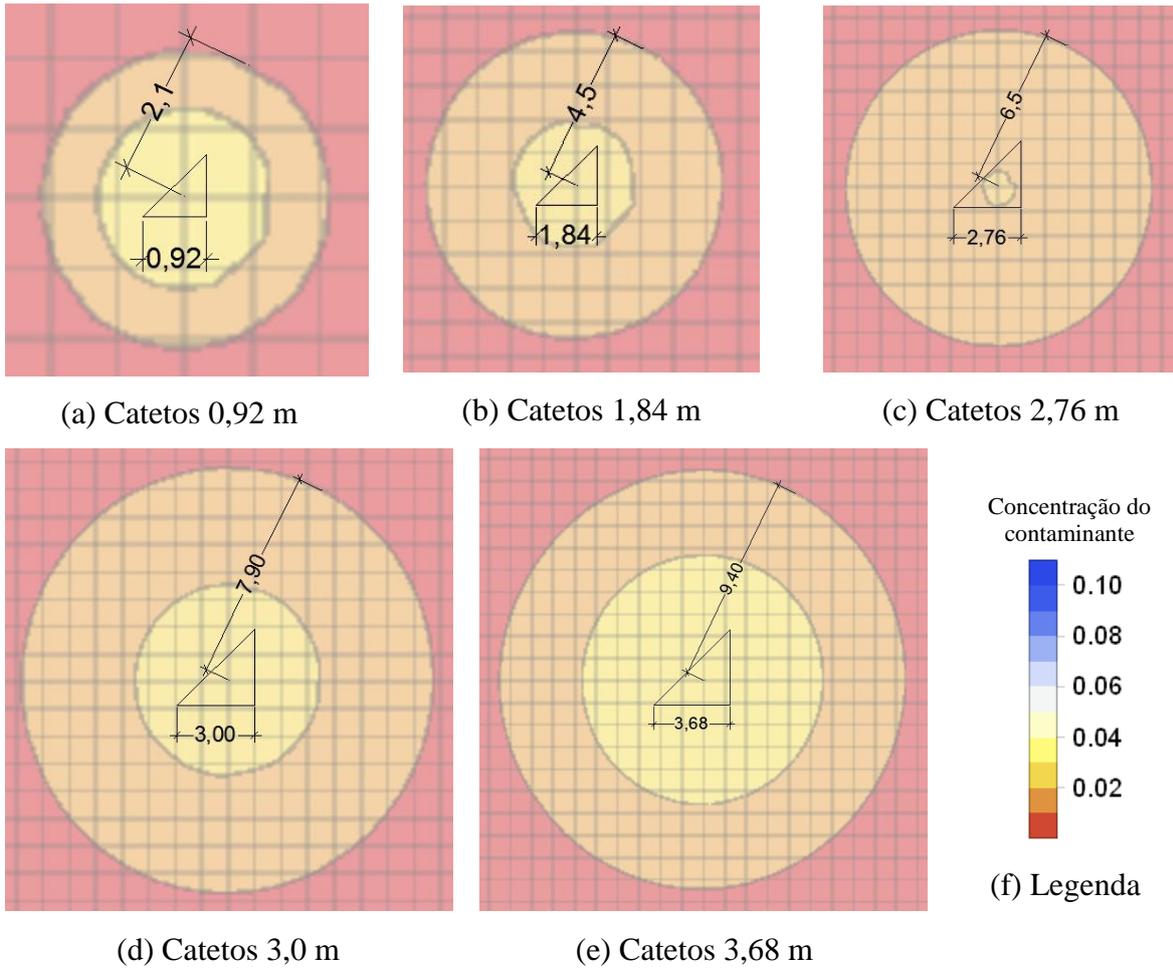


Figura 4.33- Medidas de referência das trincheiras Triangulares Retangular Isósceles para região até 1% de concentração

Nas tabelas Tabela 4.2 a Tabela 4.5 abaixo estão apresentadas as medições obtidas através dos dados das figuras Figura 4.26 a Figura 4.33 e as relações calculadas de cada geometria.

Tabela 4.2 - Dados encontrados na geometria circular

Para região até 10% de concentração						
Raio (m)	Perímetro (m)	Área da Base (m <sup>2</sup> )	Perímetro / Área da Base	Raio da Circunferência resultante de infiltração (m)	Raio do poço / Raio da Circunferência resultante de infiltração	Média
0,5	3,14	0,79	4,00	0,95	1,86	1,92
0,78 (1,56x0,5)	4,90	1,91	2,56	1,5	1,95	
1,0 (2x0,5)	6,28	3,14	2,00	1,9	2,02	
1,5 (3x0,5)	9,42	7,07	1,33	2,95	1,95	

2,0 (4x0,5)	12,57	12,57	1,00	3,9	1,98	
<b>Para região até 1% de concentração</b>						
0,5	3,14	0,79	4,00	3	6,00	6,05
0,78	4,90	1,91	2,56	5	6,41	
1,0	6,28	3,14	2,00	6	6,00	
1,5	9,42	7,07	1,33	9	6,00	
2,0	12,57	12,57	1,00	11,7	5,85	

Tabela 4.3 - Dados encontrados na geometria retangular

<b>Para região até 10% de concentração</b>							
Lados do retângulo (m)		Perímetro (m)	Área da Base (m <sup>2</sup> )	Perímetro/Área da Base	Raio da Circunferência resultante de infiltração (m)	Lado da trincheira retangular / Raio da Circunferência resultante de infiltração	Média
0,78	0,79	3,14	0,62	5,09	0,8	1,09	1,10
1,57 (2,02x0,78)	1,57	6,28	2,47	2,55	1,7	1,12	
2,00 (2,56x0,78)	2,00	8,00	4,00	2,00	2,2	1,11	
2,36 (3,02x0,78)	2,35	9,42	5,55	1,70	2,6	1,10	
3,14 (4,02x0,78)	3,14	12,57	9,87	1,27	3,3	1,10	
<b>Para região até 1% de concentração</b>							
0,78	0,79	3,14	0,62	5,09	2,7	3,46	3,46
1,57	1,57	6,28	2,47	2,55	5,5	3,50	
2,00	2,00	8,00	4,00	2,00	6,9	3,45	
2,36	2,35	9,42	5,55	1,70	8	3,39	
3,14	3,14	12,57	9,87	1,27	11	3,50	

Tabela 4.4 - Dados encontrados na geometria triangula equilátera

<b>Para região até 10% de concentração</b>						
Lados do Triângulo equilátero (m)	Perímetro (m)	Área da Base (m <sup>2</sup> )	Perímetro / Área da Base	Raio da Circunferência resultante de infiltração (m)	Lado da trincheira triangular equilátero / Raio da Circunferência resultante do contaminante	Média
1,05	3,15	0,48	6,60	0,75	0,74	0,74
2,09 (1,99x1,05)	6,27	1,89	3,31	1,5	0,74	
3,14 (2,99x1,05)	9,42	4,27	2,21	2,3	0,73	

4,19 (3,99x1,05)	12,57	7,60	1,65	3	0,74	
4,50 (4,28x1,05)	13,50	8,77	1,54	3,3	0,73	
<b>Para região até 1% de concentração</b>						
1,05	3,15	0,48	6,60	2,4	2,29	2,25
2,09	6,27	1,89	3,31	4,7	2,25	
3,14	9,42	4,27	2,21	7	2,23	
4,19	12,57	7,60	1,65	9,4	2,24	
4,50	13,50	8,77	1,54	10	2,22	

Tabela 4.5 - Dados encontrados na geometria triangular retangular isósceles

<b>Para região até 10% de concentração</b>								
Lados do Triângulo retângulo (m)			Perímetro (m)	Área da Base (m <sup>2</sup> )	Perímetro / Área da Base	Raio da máxima Circunferência resultante de infiltração (m)	<b>Cateto</b> da trincheira triangular retângulo / Raio da Circunferência resultante do contaminante	Média
Cateto (m)	Cateto (m)	Hipotenusa (m)						
0,92	0,92	1,30	3,14	0,42	7,42	0,7	0,82	0,81
1,84 (2x0,92)	1,84	2,60	6,28	1,69	3,71	1,5	0,83	
2,76 (3x0,92)	2,76	3,90	9,42	3,81	2,47	2,1	0,81	
3,00 (3,26x0,92)	3,00	4,24	10,24	4,50	2,28	2,30	0,80	
3,68 (4x0,92)	3,68	5,20	12,56	6,77	1,86	2,8	0,78	
<b>Para região até 1% de concentração</b>								
0,92	0,92	1,30	3,14	0,42	7,42	2,1	2,28	2,45
1,84	1,84	2,60	6,28	1,69	3,71	4,5	2,45	
2,76	2,76	3,90	9,42	3,81	2,47	6,5	2,36	
3,00	3,00	4,24	10,24	4,50	2,28	7,90	2,63	
3,68	3,68	5,20	12,56	6,77	1,86	9,4	2,55	

Observando as Tabelas Tabela 4.2 a Tabela 4.5, percebe-se que há certa relação entre a área da base dos formatos geométricos com o raio do alcance máximo da pluma contaminante, que, quanto maior a área, maior o raio. Pode-se ver melhor estas relações na Figura 4.34 a baixo:

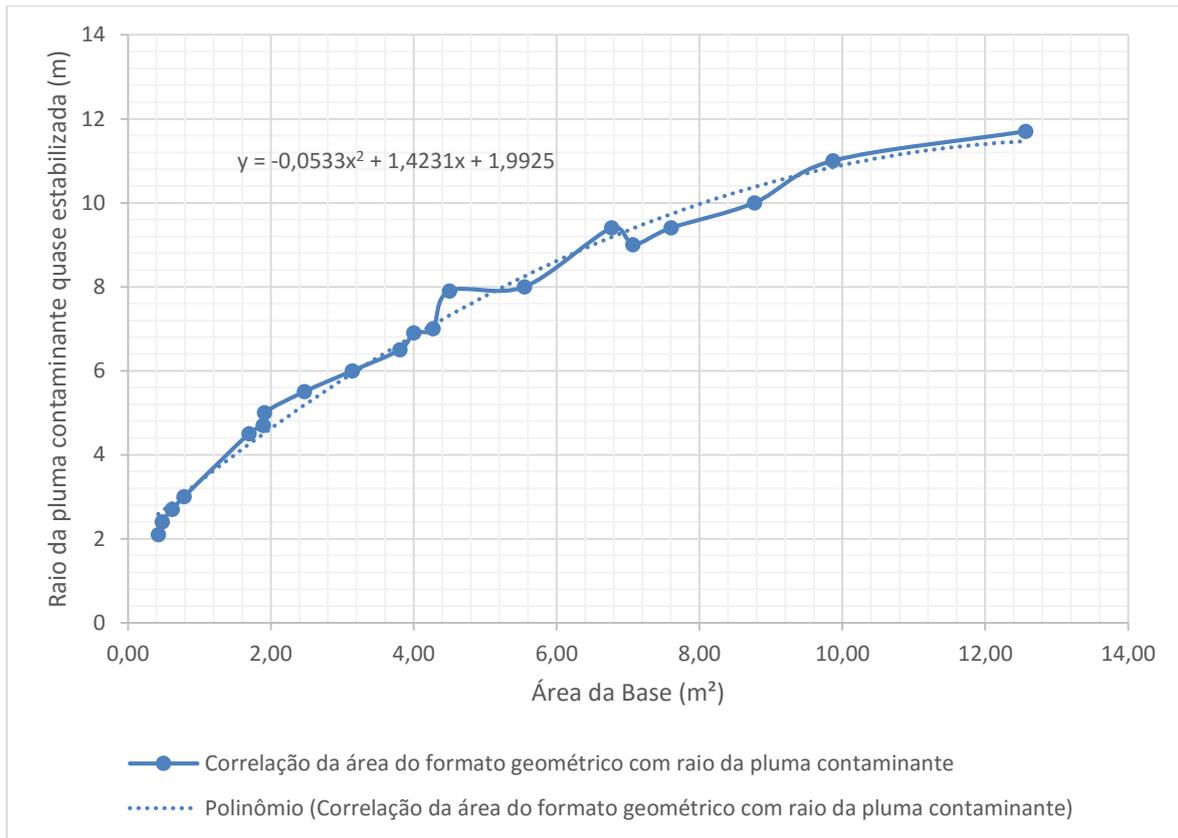


Figura 4.34 – Relação área da base da com raio da pluma contaminante estabilizada

Baseado nas informações obtidas, foi realizado outras simulações com propriedades diferentes (perímetro e relação não simétrica entre as arestas), porém mantendo áreas de base iguais. Utilizou-se então as seguintes geometrias para área de base 7,07 m² e que após simulação chegaram nas Figura 4.35 a Figura 4.38

- Circular com raio igual a 1,5 m
- Retângulo 1,0 x 7,07 m
- Triângulo retângulo com catetos igual a 2,0 e 7,07 m
- Retangular 0,5 x 14,14m

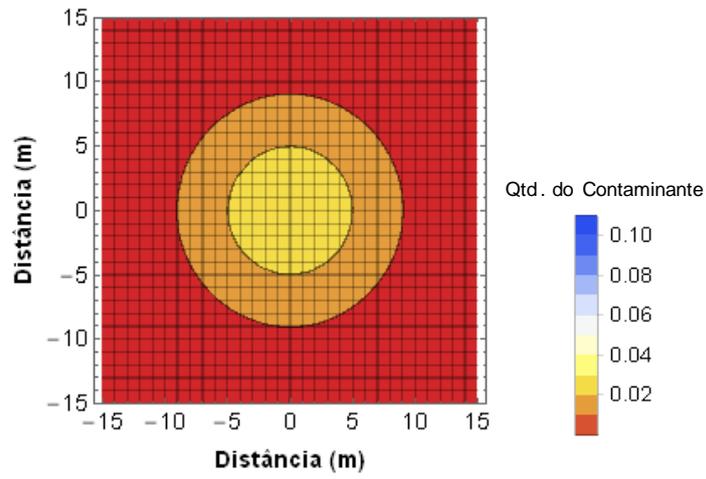


Figura 4.35 - Circular Raio 1,5m Tempo 20

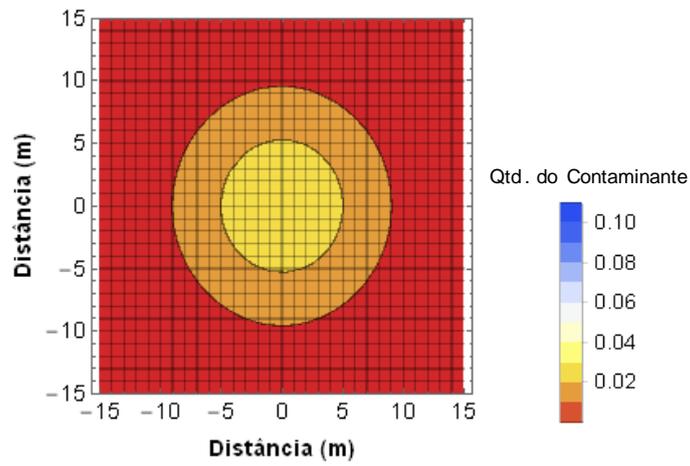


Figura 4.36 - Retangular 1,0 x 7,07 m Tempo 20

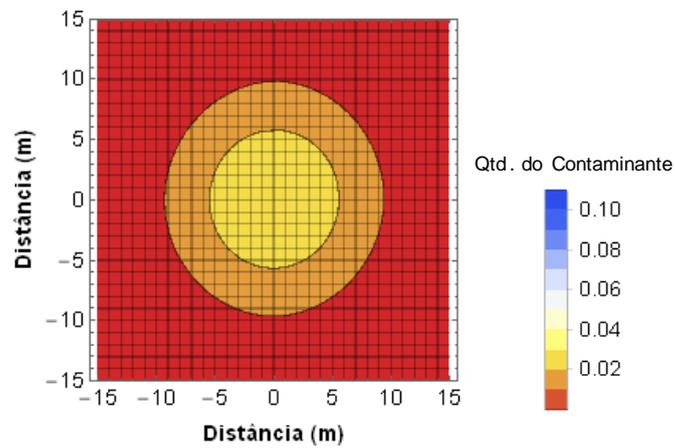


Figura 4.37 - Triângulo retângulo catetos 2 e 7,07m Tempo 20

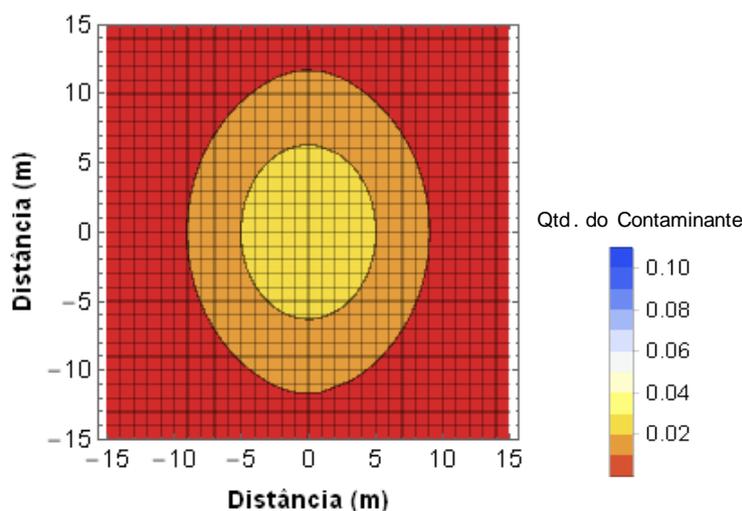


Figura 4.38 - Retangular 0,5 x 14,14m Tempo 20

Tabela 4.6 - Dados encontrados para diferentes formatos com mesma

Para região até 1% de concentração					
Geometrias	Dimensão	Perímetro (m)	Área da Base (m <sup>2</sup> )	Perímetro / Área da Base	Raio da Circunferência resultante de infiltração (m)
Circular	Raio 1,5 m	9,42	7,07	1,33	9,0
Retângulo	1,0 x 7,07 m	16,14	7,07	2,28	9,5
Triângulo retângulo	Catetos 2,0 e 7,07 m	16,41	7,07	2,32	9,5
Retângulo	0,5 x 14,14 m	29,27	7,07	4,14	Apresenta forma elíptica

Com isso percebe-se que a pluma tende a um formato circular quando está alcançando o ponto de estabilização da difusão e o alcance máximo da pluma contaminante está correlacionado com a área da base da geometria quando as arestas possuem uma relação não muito desproporcional entre as arestas do formato geométrico.

Enquanto que o formato e a proporção entre as arestas possuem grande relevância quando desejado encontrar distância máxima para a propagação das diferentes frentes de contaminação (mais de 10% de concentração), porém o “tempo de vida” é muito curto comparado com concentrações menores que 10% (entorno de 1/20 do tempo total).

## 5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1. Conclusão

A utilização de sistema de infiltração como método de drenagem das áreas impermeabilizadas de um meio urbano pode contribuir para a solução dos problemas de alagamento, qualidade de água e picos de cheias nos talwegues, contudo a utilização sem o estudo correto pode tornar algo que seria benéfico em prejudicial. A análise das interferências nas construções e áreas naturais próximas devem ser requisitos primordiais durante a fase de elaboração do projeto, proporcionando uma relação de mutualismo entre ambas as partes pertencentes ao sistema.

A presença de contaminantes na água pluvial é algo que deve ser totalmente evitado utilizando ferramentas de tratamento de água para melhorar a qualidade antes de ser lançada no meio ambiente. Contudo, na construção de qualquer objeto ou sistema deve-se utilizar mecanismos para evitar que, caso o primeiro passo não tenha funcionado ou funcionado incorretamente, já se possa corrigir emergencialmente qualquer comportamento que advenha de falhas.

No estudo do comportamento da difusão do contaminante, chegou-se à conclusão de que não é exatamente o formato do sistema que dita o espalhamento da pluma no período inicial, mas sim a quantidade de eixos de simetria que tal sistema apresenta. No caso da trincheira triangular retangular isósceles e retangular que possuem apenas um eixo de simetria, o formato da propagação do contaminante resultou num caso elíptico, porém, após um período bem maior de tempo tendeu a formato próximo a de um círculo. Enquanto que a trincheira em formato triângulo retângulo com lados distintos não havia um formato simétrico no início e após certo período de tempo a pluma aproximou a um círculo.

Em relação a distância máxima alcançada da pluma, a área de base do sistema de infiltração, para geometrias sem grandes proporções entre as arestas, tem grande relevância no comportamento da pluma contaminante a partir do momento em que atinge um ponto de “formato estabilizado” até o momento em que o gradiente de concentração não é capaz de gerar modificação significantes no avanço da frente contaminante (formato circular). Porém, o formato geométrico tem grande relevância para o comportamento do estado inicial até o momento em que a pluma adota o comportamento de propagação circular.

A não consideração do gradiente no eixo Z nas análises torna os valores encontrados para cada formato de trincheira e poço maiores do que a situação real, devido a existência de perda de massa no eixo Z gerado pelo transporte vertical. E também, dependendo da profundidade do

sistema de infiltração, o gradiente em Z pode ser grande ou pequeno. Com isso, a análise 2D pode ser considerada um método conservador para previsão de alcance máximo do contaminante devido a não perda de massa naquele nível da seção.

## **5.2. Sugestões para pesquisas futuras**

Baseado nos estudos realizados e necessidades práticas, sugere-se:

- Realizar o estudo com formatos geométricos sem simetria, para estudar o comportamento do avanço da frente úmida contaminada e encontrar os valores das relações baseadas em medidas da geometria utilizada;
- Analisar o princípio deste estudo em elementos 3D e em solos não saturados;
- Estudar o efeito da forma na propagação da frente de umidade de água não contaminada na região não saturada do solo;

## **6. REFERÊNCIA**

BETTES, R. (1996). Infiltration Drainage - Manual of Good Practice. Construção de Pesquisa da Indústria e Associação de Informação. Report 156, © CIRIA. ISBN 0 86017 457 3 ISSN 0305 408X.

BOSCOV GIMENEZ, M. E. (2008). Geotecnia Ambiental. ISBN 978-85-86238-73-4. Oficina de Textos, São Paulo. 248p

BRAGA, B. D. F. (1994). Gerenciamento Urbano Integrado em Ambiente Tropical. In: Seminário de Hidráulica Computacional Aplicada a Problemas de Drenagem Urbana, ABRH, São Paulo, SP, Brasil.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. LELIS, A.C. (2012). Cartilha do Meio Ambiente: Infiltração. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Programa de Pos-Graduação. Ed. UnB. Vol. III. 52p. ISBN 978-85-60313-38-9.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR. G. DE F. N.; LEÃO CARVALHO, E.T. (2012). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Faculdade de Tecnologia. Programa de Pos-Graduação. Universidade de Brasília. Ed. UnB. Vol. IV. 672p. ISBN 978-85-60313-41-9.

CAMAPUM DE CARVALHO, J; LELIS A.C.(2010). Cartilha infiltração. Brasília. Volume II. ISBN 978-85-60313-36-5. Brasília DF. 40p.

DANIEL JÚNIOR, J. J. (2013). Avaliação de uma biorretenção como estrutura sustentável de drenagem urbana. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, RS, 115p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. COORDENAÇÃO GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA. INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - DNIT. (2005). Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem. - 2 ed. - Rio de Janeiro, 133p. IPR – 715

DETAY, M.; DUMOUTIER, N.; HAEFNER, H.; VIGNIER, V. (1994). Incidence de la réalimentation artificielle de nappe sur la qualité de la ressource. In: COLLOQUE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE INTERNACIONAL, 1994, Marseille. HYDROTOP 94. Marseille.

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DE VISEU. Dimensionamento Hidrológico. Disponível em:

<<http://www.estgv.ipv.pt/paginaspessoais/fmartins/Publica%C3%A7%C3%B5es/Tese%20Mestrado/T-CII.pdf>>. Acesso em: 07/02/2015

GAUTIER, A. (1998). Contribution à la connaissance du fonctionnement d'ouvrages d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial urbain. Tese de Doutorado. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 251p

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. (2008). Metodologia para o Dimensionamento de Trincheiras de Infiltração para o Controle do Escoamento Superficial na Origem. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 13 n.2 Abr/Jun 2008, 207-214, 8p

HASEGAWA, T.; NAKANISHI, M.; FUJIURA, S. (1999). Evaluation method of storm water infiltration system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 8., 1999, SYDNEY. Proceedings. Sydney. p.1927-1934

ISHIZAKI, K.; IMBE, M.; NI, G; TAKESHIMA, M. (1996) Background of Rainwater infiltration technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN STORM DRAINAGE, 7. 1996, Hannover. Proceedings. Hannover. p.377-382

LEÃO CARVALHO, E. T. (2013). Avaliação Geotécnica de Poços de Infiltração de Águas Pluviais. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-084/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 316p.

LUCAS, A. H. (2011). Monitoramento e modelagem de um sistema Filtro-Vala-Trincheira de infiltração em escala real. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 161p

MATHEUS, E. (1997). Comportamento de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaio de Filtração Sob Condições Severas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-048A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 121p.

MINNESOTA POLLUTION CONTROL AGENCY. Design criteria for Infiltration trench.

Disponível em:

<[http://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Design\\_criteria\\_for\\_Infiltration\\_trench](http://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Design_criteria_for_Infiltration_trench)>.

Acesso em: 19/11/2014

PIZARRO, M. L. P. (2009). Simulação de fluxo de água e transporte de solutos na zona não-saturada do solo pelo método de elementos finitos adaptativo. Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 193p

REIS, R. P. A; OLICEIRA, L. H.; SALES, M. M. (2008). Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais"

RESTREPO, J. S. 2010. Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 188 /10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 p.

RESTREPO, J. S. 2010. Avaliação da infiltrabilidade de um perfil de solo tropical. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 188 /10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 p.

ROOSE, E. (1977). Erosion et ruissellement em Afrique de l'Ouest. Travaux et documents del'O.R.S.T.O.M., n. 78, Paris.

SCHUELER, T. T., (1987). Controlling Urban Runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Whashington: Metropolitan Whashington Council of Governments, 229p.

SILVA, J.P. (2007). Estudos Preliminares para a Implantação de Trincheiras de Infiltração. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155p.

SILVA, J.P. (2012). Estruturas de Infiltração com Utilização de Materiais Alternativos no Controle de Alagamentos, Inundações e Prevenção de Processos Erosivos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-074/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 215p.

SOUZA, V. C. B. (2002). Estudos Experimentais de Trincheiras de Infiltração no Controle da Geração do Escoamento Superficial, Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal de Rio Grande do Sul – IPH. 2002. Porto Alegre. Rio Grande do Sul. 127p.

URBONAS, B.; STAHERE, P. (1993) Stormwater: best management practices and detention for water wuality, drainage and CSO management. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 447p.

WOLLE, C. M. (1988). Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Canholi

Swaaaa

# APÊNDICES

**APÊNDICE A - SCRIPT DO PROGRAMA MATHEMATICA**

# Análise 2D

## Circular

```
r=0.78;
```

```
iccir2d=Piecewise[{{1,x^2+y^2<=r^2},{0,x^2+y^2>r^2}}];
```

```
Plot3D[iccir2d,{x,-5,5},{y,-5,5},MeshFunctions->{#1&,#2&,#3&},Mesh->{9,9,5},MeshStyle->{Red,Red,Blue},Axes->True,AxesStyle->Bold,AxesLabel->{"Distância (m)","Distância (m)",Rotate["% Contaminante",90 Degree]},AxesStyle->Bold,AxesLabel->{"Distância (m)","Distância (m)",Rotate["% Contaminante",90 Degree]},Boxed->False,PlotLegends->Automatic,PlotRange->All,PlotStyle->Directive[Yellow,Opacity[1]]]
```

## Retangular

```
a=2.36;
```

```
b=2.35;
```

```
icqua2d=Piecewise[{{1,-a/2<=x<=a/2&& -b/2<y<b/2}}];
```

```
Plot3D[icqua2d,{x,-5,5},{y,-5,5},MeshFunctions->{#1&,#2&,#3&},Mesh->{9,9,5},MeshStyle->{Red,Red,Blue},Axes->True,AxesStyle->Bold,AxesLabel->{"Distância (m)","Distância (m)",Rotate["% Contaminante",90 Degree]},Boxed->False,PlotLegends->Automatic,PlotRange->All,PlotStyle->Directive[Yellow,Opacity[1]]]
```

## Triangular Equilátero

```
s=3.14;
```

```
ictri2d=Piecewise[{{1,-(s/2)<=x<=0&& (-s-1)/6*sqrt(3)<=y<=(sqrt(3)s)/3+x*sqrt(3)||s/2>x>0&& (-s-1)/6*sqrt(3)<y<(s*sqrt(3))/3-x*sqrt(3)}}];
```

```

Plot3D[ictri2d, {x, -5, 5}, {y, -5, 5}, MeshFunctions-
>{#1&, #2&, #3&}, Mesh->{9, 9, 5}, MeshStyle->{Red, Red, Blue}, Axes-
>True, AxesStyle->Bold, AxesLabel->{"Distância (m)", "Distância
(m)", Rotate["% Contaminante", 90 Degree]}, Boxed-
>False, PlotLegends->Automatic, PlotRange->All, PlotStyle-
>Directive[Yellow, Opacity[1]]]

```

## Triangular Retângulo

```
ca=2.76;
```

```
co=2.76;
```

```
ictriret2d=Piecewise[{{1, -((2*ca)/3) <= x <= ca/3 && -
(co/3) <= y <= (x + (2ca/3)) * (co/ca) - (co/3)}}];
```

```

Plot3D[ictriret2d, {x, -5, 5}, {y, -5, 5}, MeshFunctions-
>{#1&, #2&, #3&}, Mesh->{9, 9, 5}, MeshStyle->{Red, Red, Blue}, Axes-
>True, AxesStyle->Bold, AxesLabel->{"Distância (m)", "Distância
(m)", Rotate["% Contaminante", 90 Degree]}, Boxed-
>False, PlotLegends->Automatic, PlotRange->All, PlotStyle-
>Directive[Yellow, Opacity[1]]]

```

---

## Malha

```
Needs["NDSolve`FEM`"]
```

```
m=Rectangle[{-5, -5}, {5, 5}];
```

```
m1=ToElementMesh[m, MaxCellMeasure->0.0005];
```

```
m1["Wireframe"]
```

---

## Cálculos

```
Dif=1;
```

## Circular

```
Needs["NDSolve`FEM`"]
```

```

solcir=First@NDSolveValue[{Dif*Laplacian[w[t,x,y],{x,y}]==D[w[
t,x,y],t],w[0,x,y]==iccir2d,w(0,1,0)[t,-
5,y]==0,w(0,1,0)[t,5,y]==0,w(0,0,1)[t,x,-
5]==0,w(0,0,1)[t,x,5]==0},{w},{t,0,5},{x,y}€m1];

tempo1=1;

GraphicsRow[{Plot3D[solcir[tempo1,x,y],{x,y}€m1,MeshFunctions-
>{#1&,#2&,#3&},Mesh->{9,9,5},MeshStyle->{Red,Red,Blue},Axes-
>True,AxesStyle->Bold,AxesLabel->{"Distância (m)","Distância
(m)",Rotate["% Contaminante",90 Degree]},Boxed-
>False,PlotLegends->Automatic,PlotRange->All,PlotStyle-
>Directive[Yellow,Opacity[1]]},ContourPlot[solcir[tempo1,x,y],
{x,y}€m1,MeshFunctions->{#1&,#2&},Mesh->9,ColorFunction-
>(ColorData[{"TemperatureMap","Reverse"}][Rescale[#1,{0,1}]]&),
ColorFunctionScaling->False,PlotRange->{0,1},Frame->True
,FrameLabel->{Style["Distância
(m)",Bold,Black],Style["Distância (m)",Bold,Black]},LabelStyle-
>Directive[Black,Medium],RotateLabel->True,PlotLegends-
>Placed[BarLegend[{Automatic,{0,1}},{0.,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.
6,0.7,0.8,0.9,1.},LegendMarkerSize->150,LegendLabel->"% do
Contaminante"],{After,Top}],ImageSize->{250,250}]]]

```

## Retangular

Needs["NDSolve`FEM`"]

```

solqua=First@NDSolveValue[{Dif*Laplacian[w[t,x,y],{x,y}]==D[w[
t,x,y],t],w[0,x,y]==icqua2d,w(0,1,0)[t,-
5,y]==0,w(0,1,0)[t,5,y]==0,w(0,0,1)[t,x,-
5]==0,w(0,0,1)[t,x,5]==0},{w},{t,0,5},{x,y}€m1];

tempo2=0.1;

```

```

GraphicsRow[{Plot3D[solqua[tempo2,x,y],{x,y}€m1,MeshFunctions-
>{#1&,#2&,#3&},Mesh->{9,9,5},MeshStyle->{Red,Red,Blue},Axes-
>True,AxesStyle->Bold,AxesLabel->{"Distância (m)","Distância

```

```
(m)", Rotate["% Contaminante", 90 Degree]], Boxed-
>False, PlotLegends->Automatic, PlotRange->All, PlotStyle-
>Directive[Yellow, Opacity[1]], ContourPlot[solqua[tempo2, x, y],
{x, y} ∈ m1, MeshFunctions->{#1 &, #2 &}, Mesh->9, ColorFunction-
>(ColorData[{"TemperatureMap", "Reverse"}][Rescale[#1, {0, 1}]] &)
, ColorFunctionScaling->False, PlotRange->{0, 1}, Frame->True
, FrameLabel->{Style["Distância
(m)", Bold, Black], Style["Distância (m)", Bold, Black]}, LabelStyle-
>Directive[Black, Medium], RotateLabel->True, PlotLegends-
>Placed[BarLegend[{Automatic, {0, 1}}, {0., 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.
6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.}, LegendMarkerSize->150, LegendLabel->"% do
Contaminante"], {After, Top}], ImageSize-> {250, 250}]]]
```

## Triangular Equilátero

Needs["NDSolve`FEM`"]

```
soltri=First@NDSolveValue[{Dif*Laplacian[w[t, x, y], {x, y}]==D[w[
t, x, y], t], w[0, x, y]==ictri2d, w(0,1,0)[t, -
5, y]==0, w(0,1,0)[t, 5, y]==0, w(0,0,1)[t, x, -
5]==0, w(0,0,1)[t, x, 5]==0}, {w}, {t, 0, 5}, {x, y} ∈ m1];
```

```
tempo3=0.1;
```

```
GraphicsRow[{Plot3D[soltri[tempo3, x, y], {x, y} ∈ m1, MeshFunctions-
>{#1 &, #2 &, #3 &}, Mesh->{9, 9, 5}, MeshStyle->{Red, Red, Blue}, Axes-
>True, AxesStyle->Bold, AxesLabel->{"Distância (m)", "Distância
(m)", Rotate["% Contaminante", 90 Degree]], Boxed-
>False, PlotLegends->Automatic, PlotRange->All, PlotStyle-
>Directive[Yellow, Opacity[1]], ContourPlot[soltri[tempo3, x, y],
{x, y} ∈ m1, MeshFunctions->{#1 &, #2 &}, Mesh->9, ColorFunction-
>(ColorData[{"TemperatureMap", "Reverse"}][Rescale[#1, {0, 1}]] &)
, ColorFunctionScaling->False, PlotRange->{0, 1}, Frame->True
, FrameLabel->{Style["Distância
(m)", Bold, Black], Style["Distância (m)", Bold, Black]}, LabelStyle-
>Directive[Black, Medium], RotateLabel->True, PlotLegends-
```

```
>Placed[BarLegend[{Automatic,{0,1}},{0.,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.},LegendMarkerSize->150, LegendLabel->"% do Contaminante"],{After,Top}], ImageSize-> {250,250}]]]
```

## Triangular Retângulo

Needs["NDSolve`FEM`"]

```
soltriret=First@NDSolveValue[{Dif*Laplacian[w[t,x,y],{x,y}]==D[w[t,x,y],t],w[0,x,y]==ictriret2d,w(0,1,0)[t,-5,y]==0,w(0,1,0)[t,5,y]==0,w(0,0,1)[t,x,-5]==0,w(0,0,1)[t,x,5]==0},{w},{t,0,5},{x,y}∈m1];
```

tempo4=0.1;

```
GraphicsRow[{Plot3D[soltriret[tempo4,x,y],{x,y}∈m1,MeshFunctions->{#1&,#2&,#3&},Mesh->{9,9,5},MeshStyle->{Red,Red,Blue},Axes->True,AxesStyle->Bold,AxesLabel->{Style["Distância (m)",Bold,Black],Style["Distância (m)",Bold,Black],Rotate[Style["% do Contaminante",Bold,Black],90 Degree]}},Boxed->False,PlotLegends->Automatic,PlotRange->All,PlotStyle->Directive[Yellow,Opacity[1]]],ContourPlot[soltriret[tempo4,x,y],{x,y}∈m1,MeshFunctions->{#1&,#2&},Mesh->9,ColorFunction->(ColorData[{"TemperatureMap","Reverse"}][Rescale[#1,{0,1}]]&),ColorFunctionScaling->False,PlotRange->{0,1},Frame->True,FrameLabel->{Style["Distância (m)",Bold,Black],Style["Distância (m)",Bold,Black]},LabelStyle->Directive[Black,Medium],RotateLabel->True,PlotLegends->Placed[BarLegend[{Automatic,{0,1}},{0.,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.},LegendMarkerSize->150, LegendLabel->Style["% do Contaminante",Bold,Black]},{After,Top}], ImageSize-> {250,250}]]]
```

## **APÊNDICE B - IMAGENS DAS ANÁLISES**

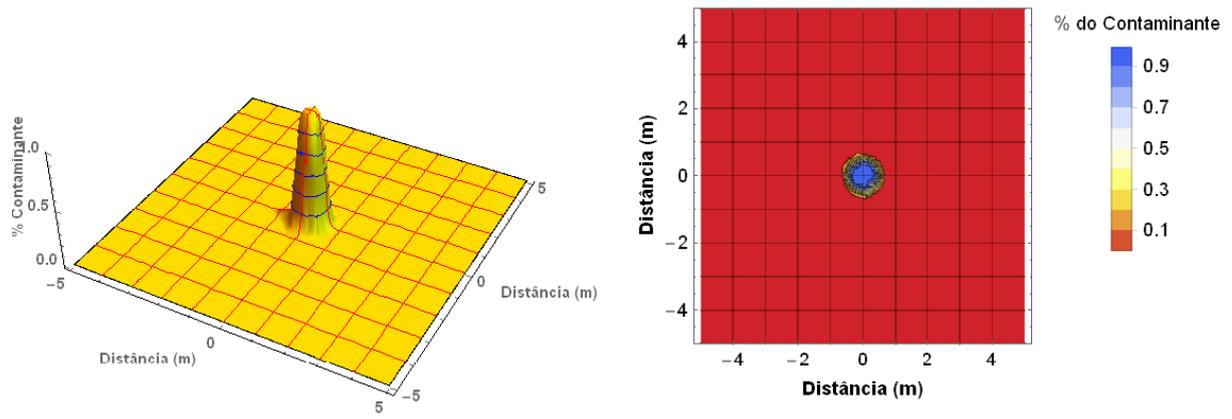


Figura 6.1 – Circular com Raio 0,5m e tempo 0,005

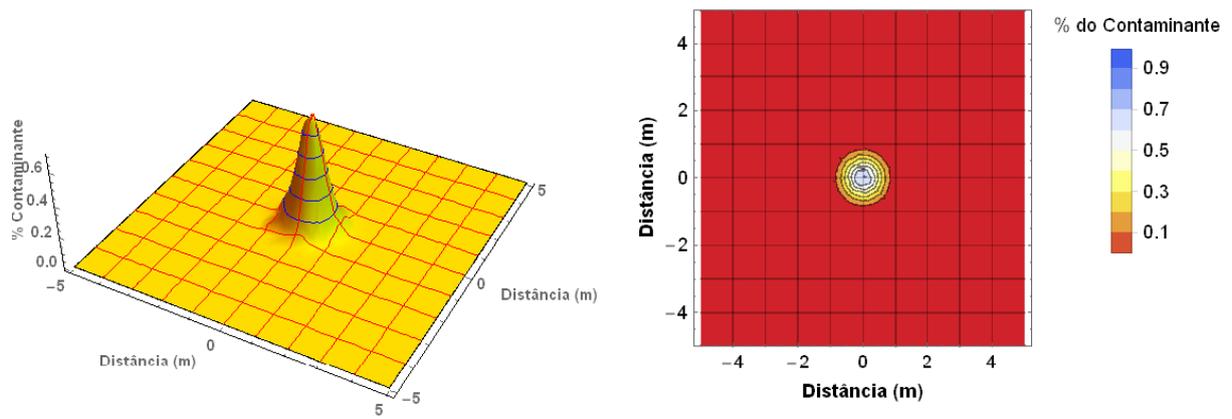


Figura 6.2 – Circular com Raio 0,5m e tempo 0,05

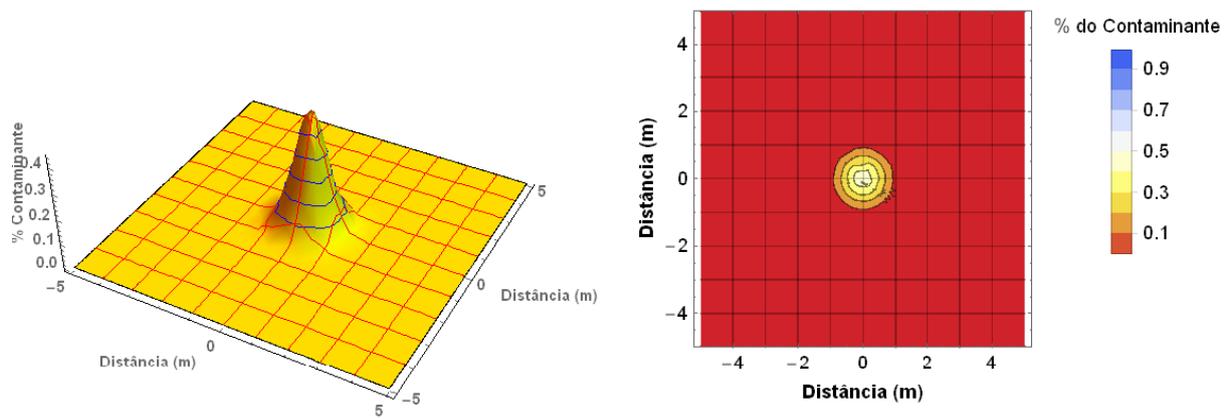


Figura 6.3 – Circular com Raio 0,5m e tempo 0,1

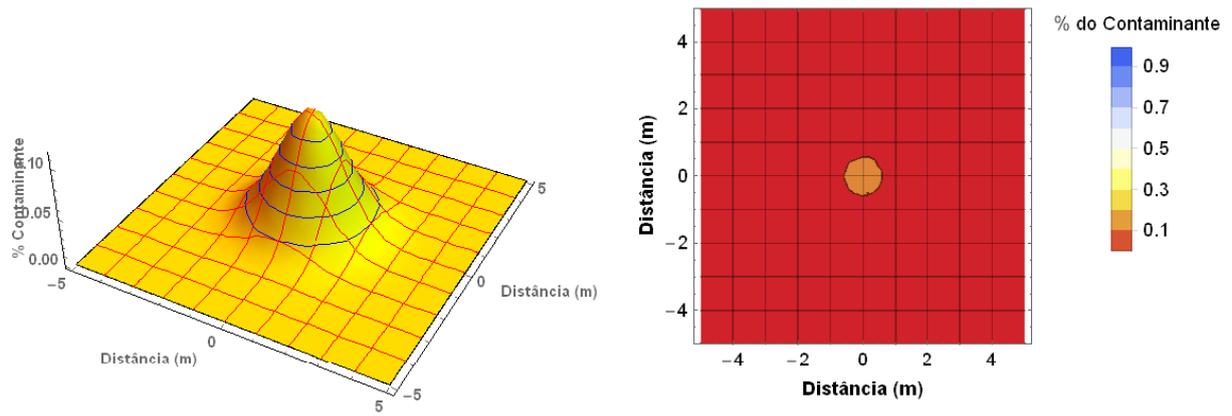


Figura 6.4– Circular com Raio 0,5m e tempo 0,5

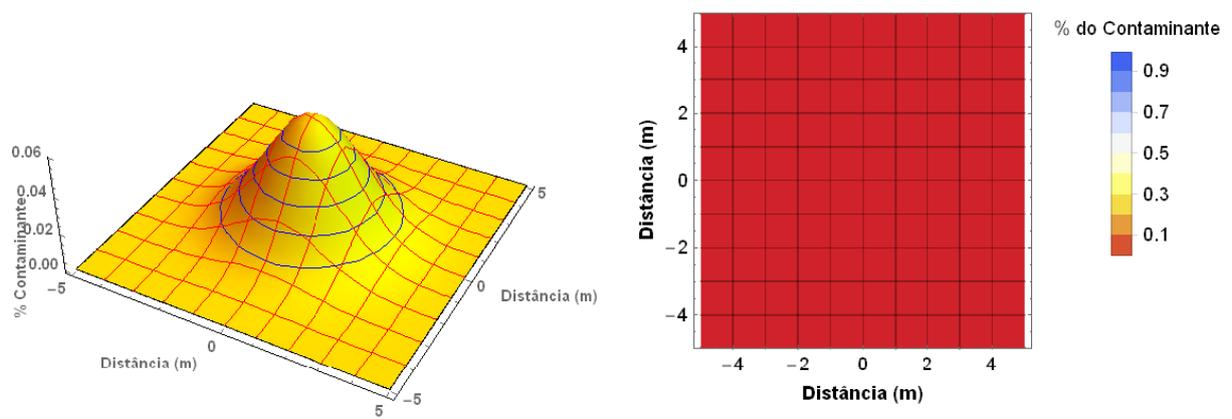


Figura 6.5 – Circular com Raio 0,5m e tempo 1

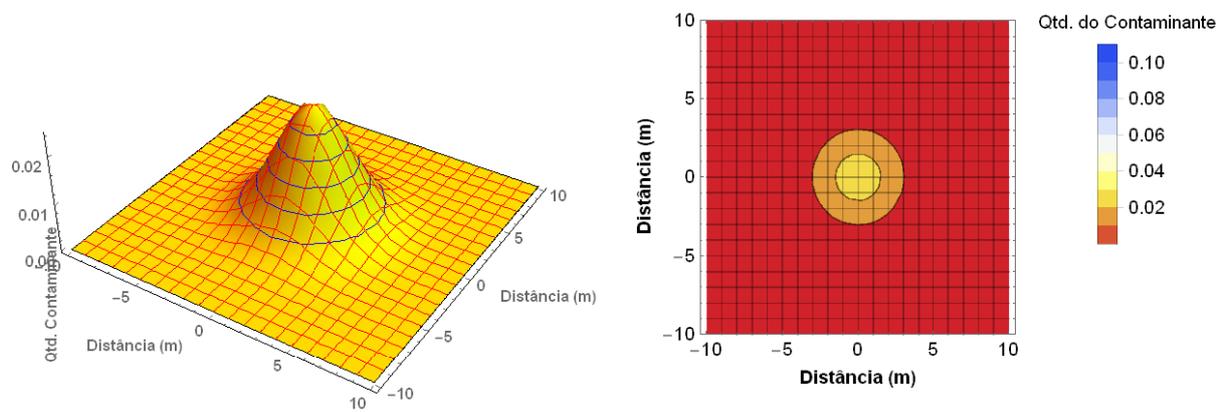


Figura 6.6 – Circular com Raio 0,5m e tempo 2,5

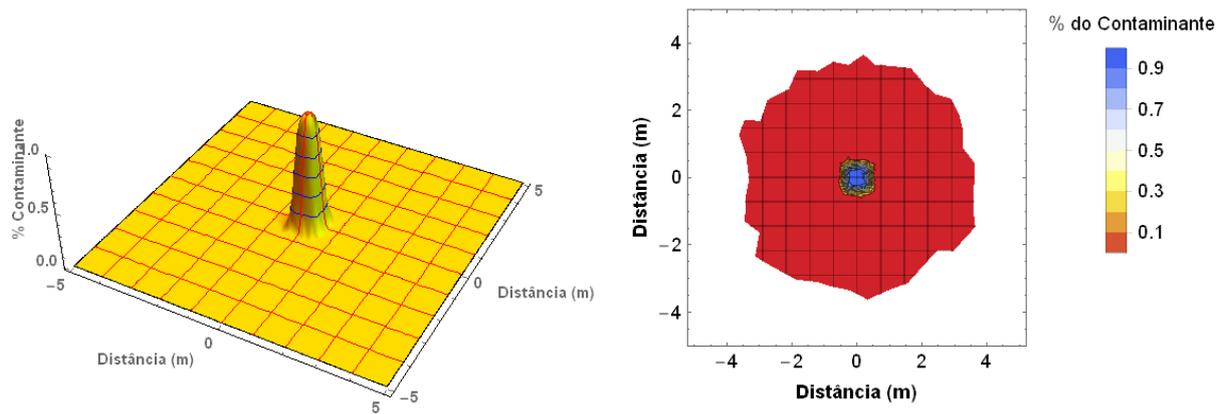


Figura 6.7 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,005

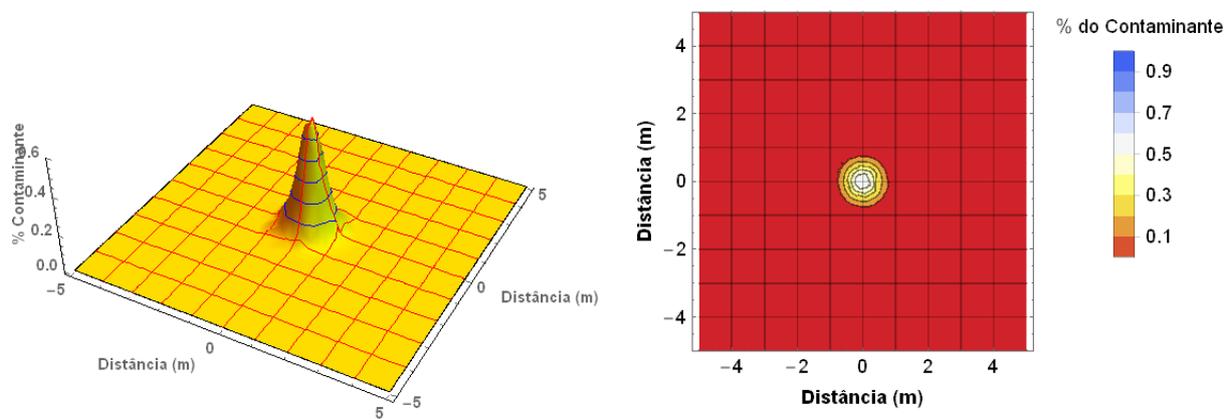


Figura 6.8 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,05

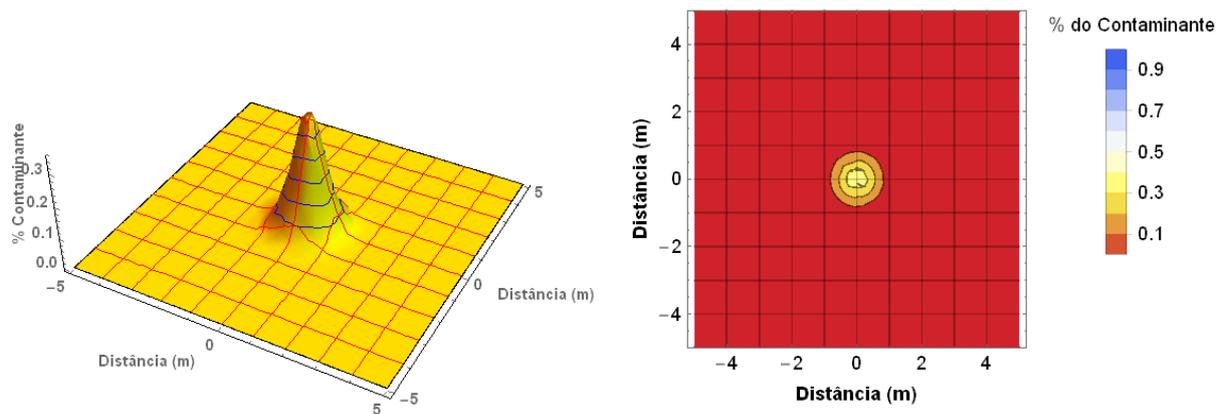


Figura 6.9 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,1

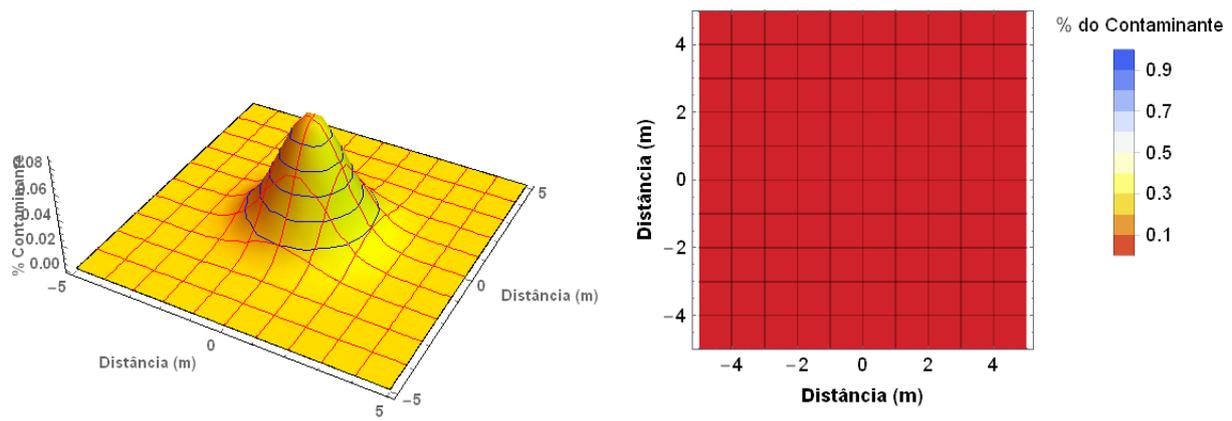


Figura 6.10 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 0,5

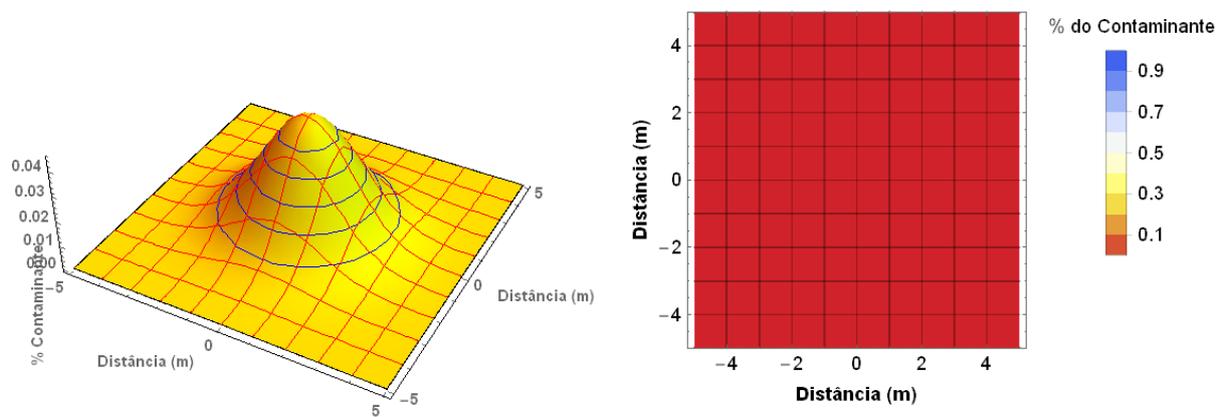


Figura 6.11 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 1

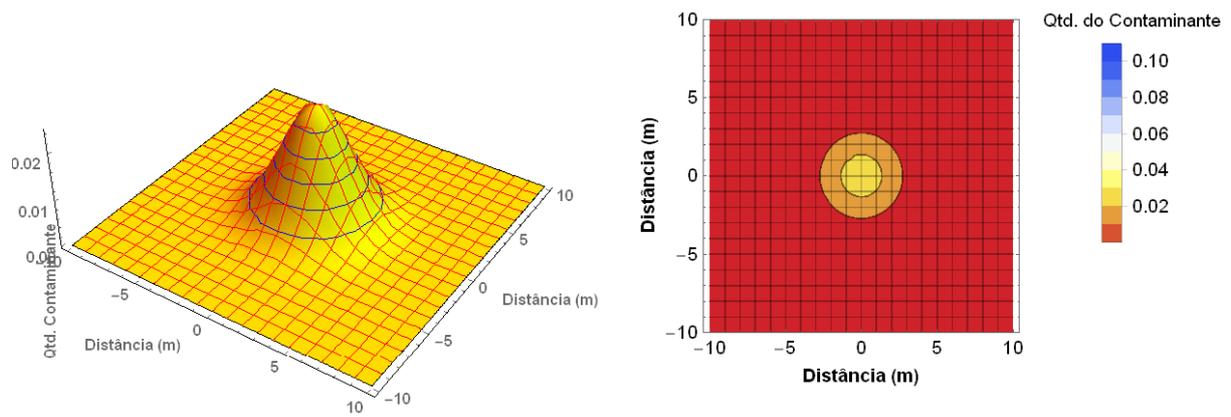


Figura 6.12 – Retangular 0,78 x 0,78 m e tempo 2

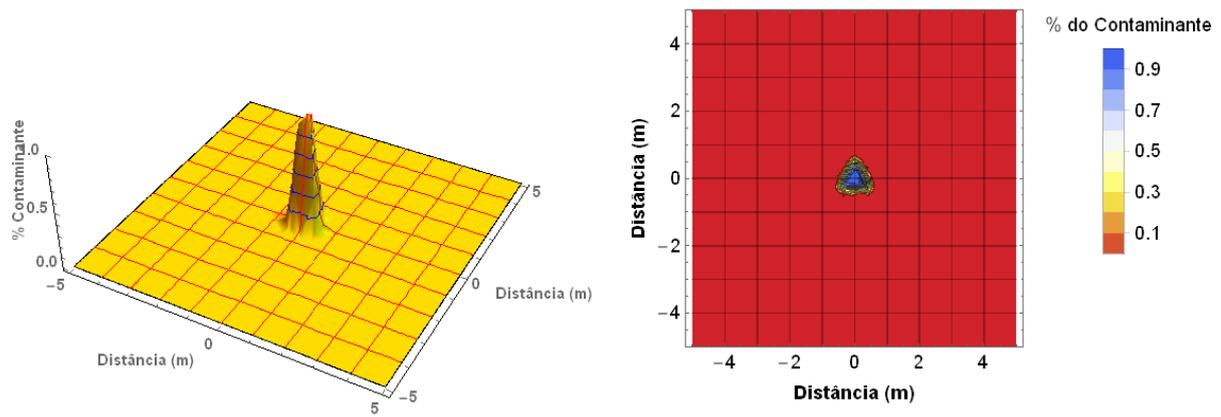


Figura 6.13 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,005

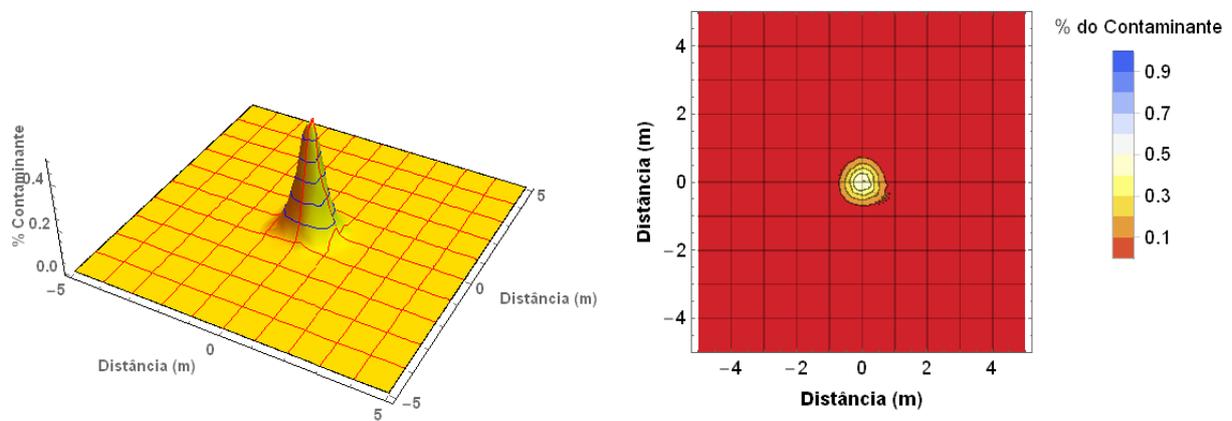


Figura 6.14 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,05

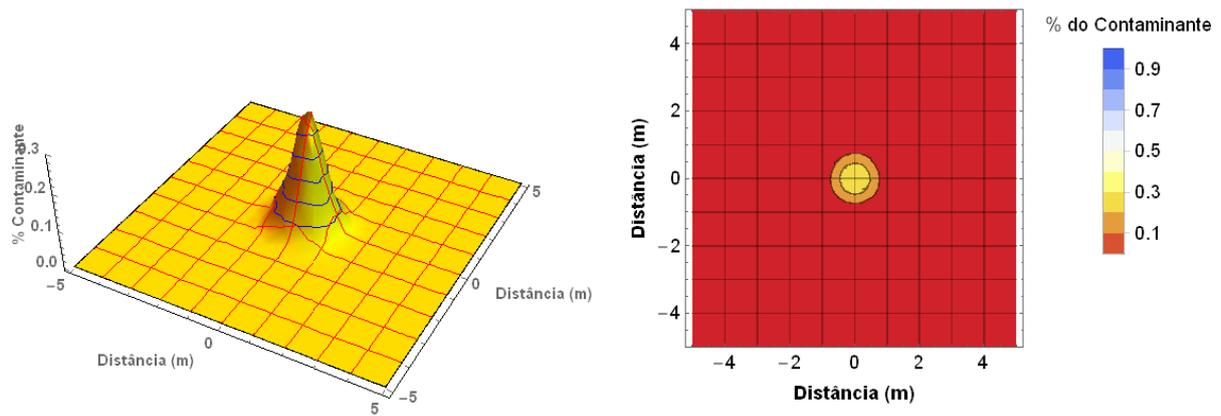


Figura 6.15 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,1

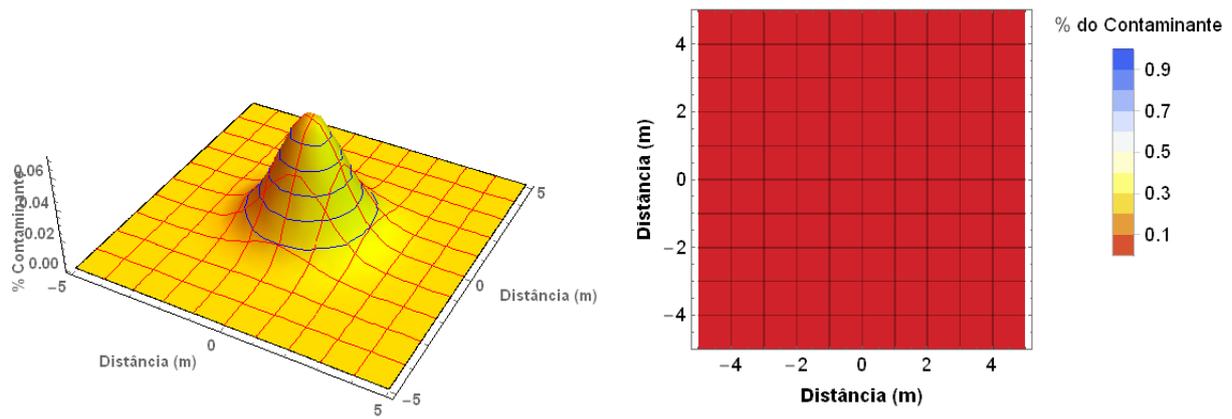


Figura 6.16 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 0,5

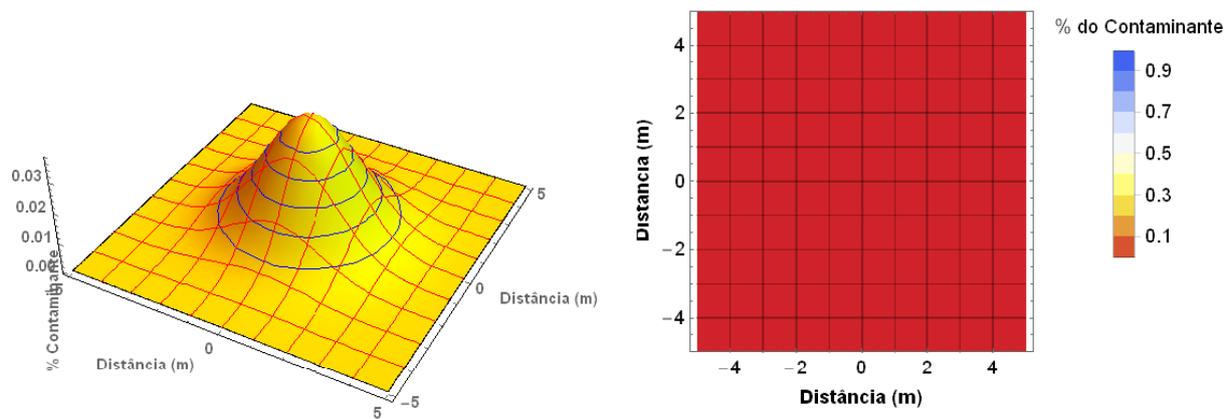


Figura 6.17 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 1

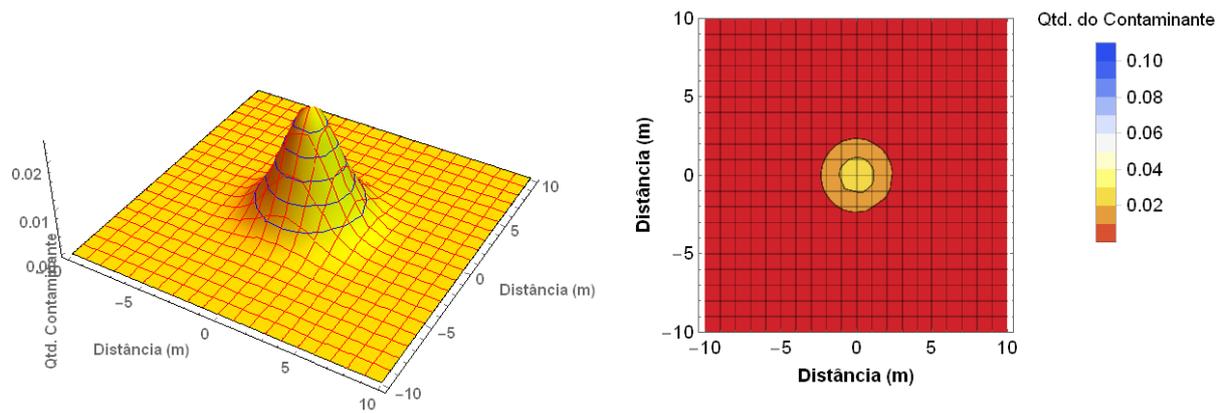


Figura 6.18 – Triangular equilátero com lados 1,05 m e tempo 1,5

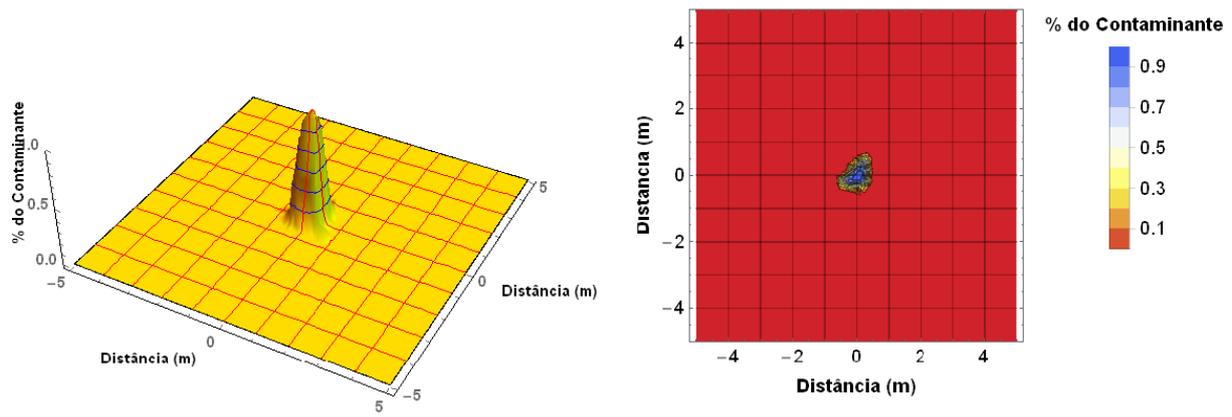


Figura 6.19 – Triângulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,005

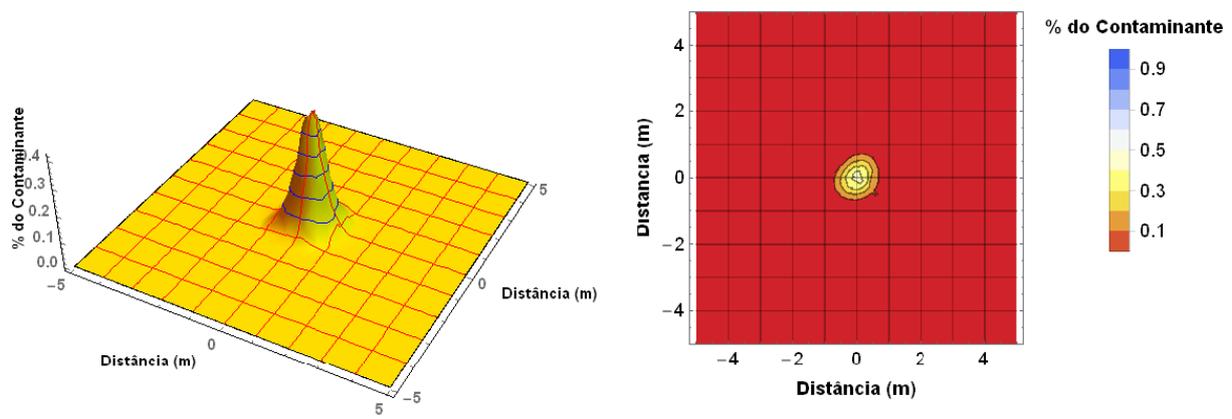


Figura 6.20 – Triângulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,05

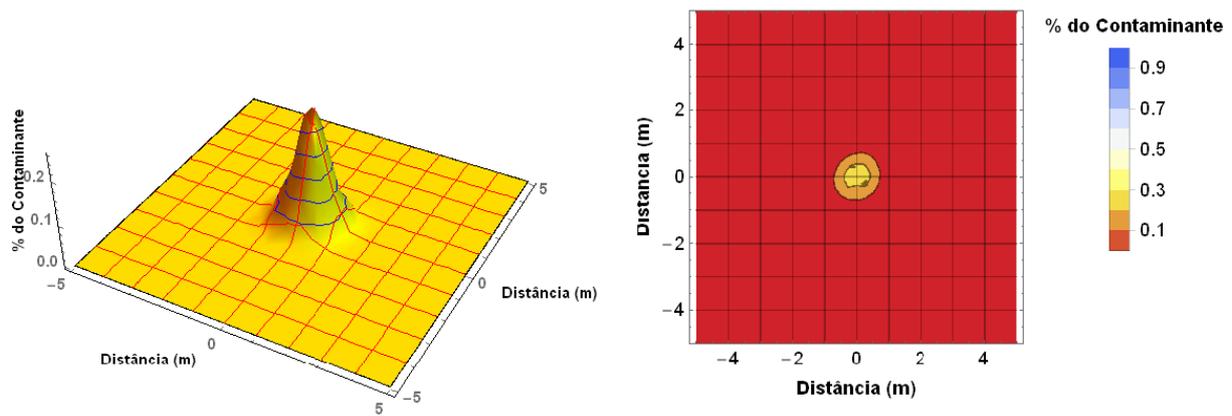


Figura 6.21 – Triângulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,1

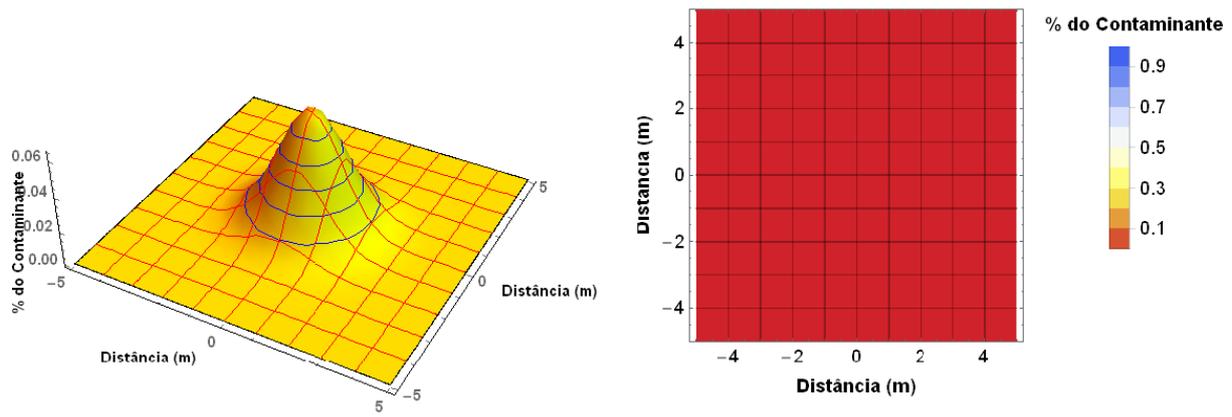


Figura 6.22 – Triângulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 0,5

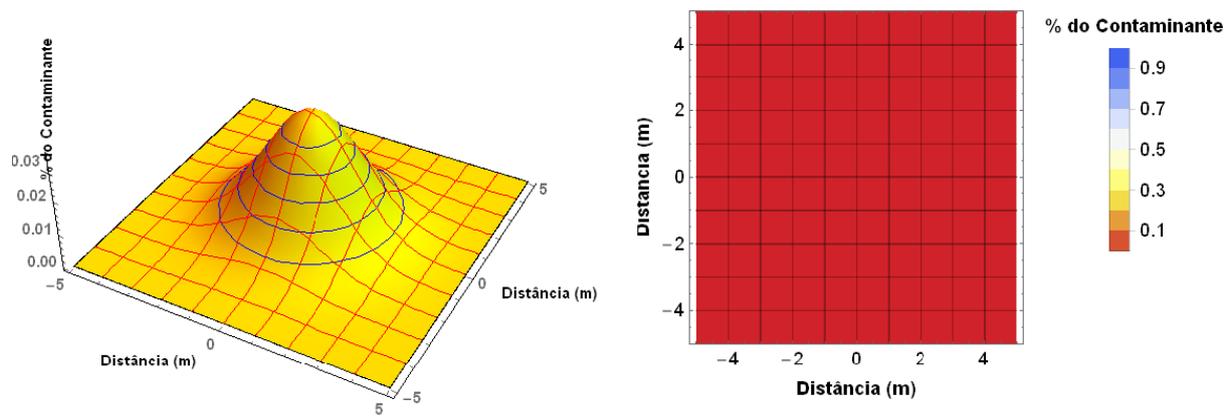


Figura 6.23 – Triângulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 1

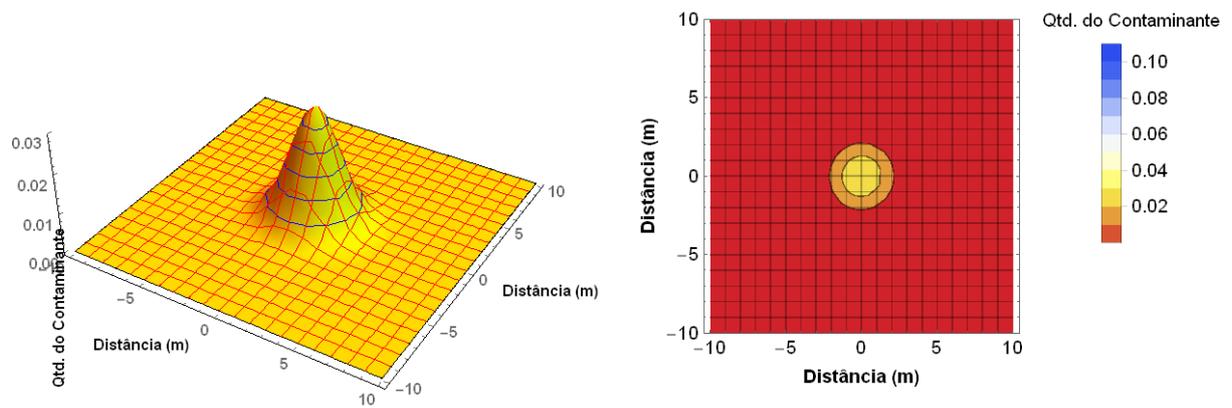


Figura 6.24 – Triângulo retângulo com catetos 0,92 m e tempo 1

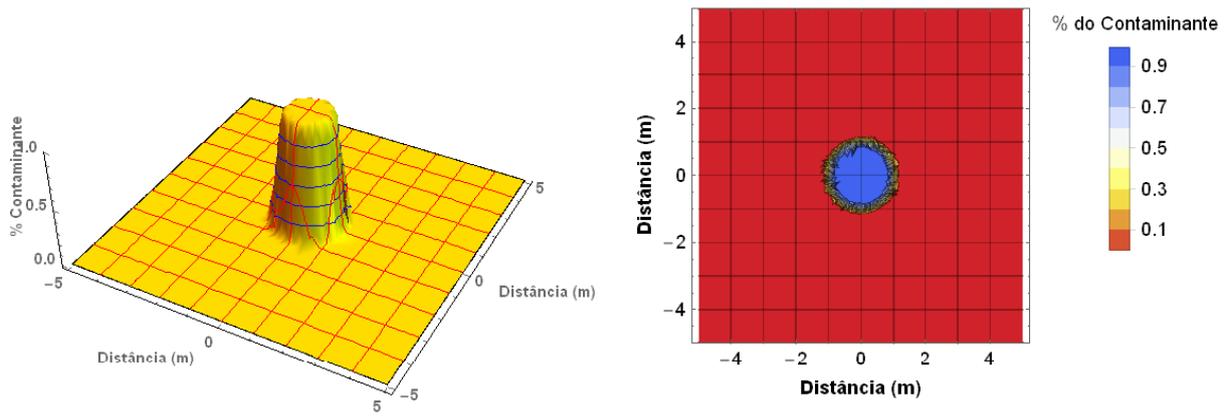


Figura 6.25 – Circular com Raio 1m e tempo 0,005

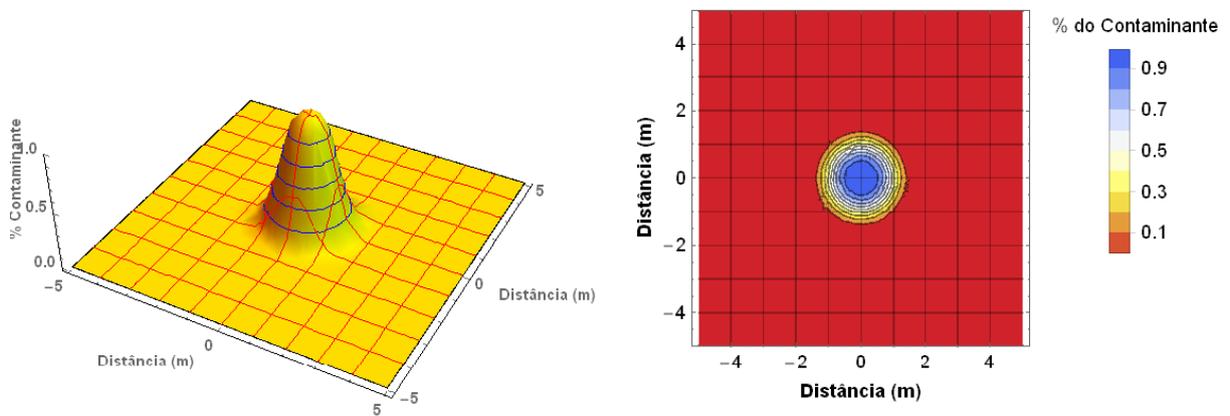


Figura 6.26 – Circular com Raio 1m e tempo 0,05

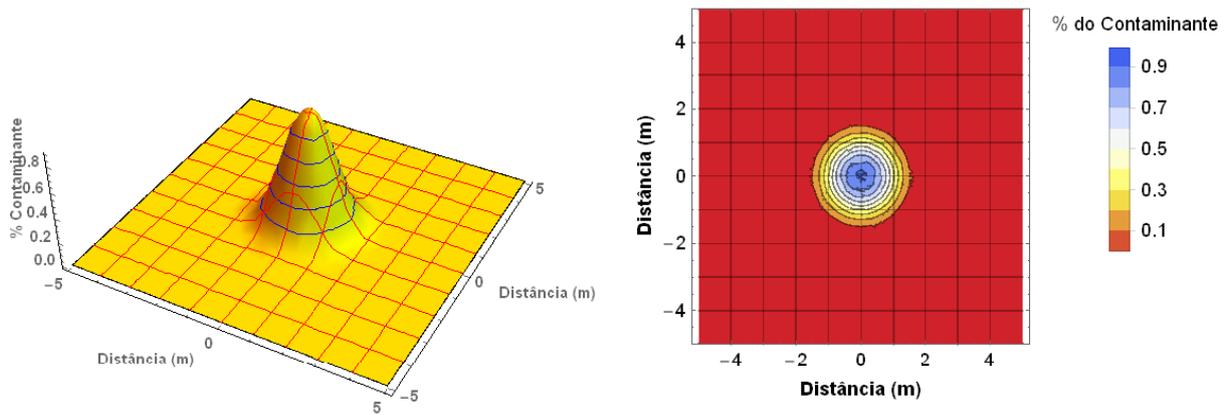


Figura 6.27 – Circular com Raio 1m e tempo 0,1

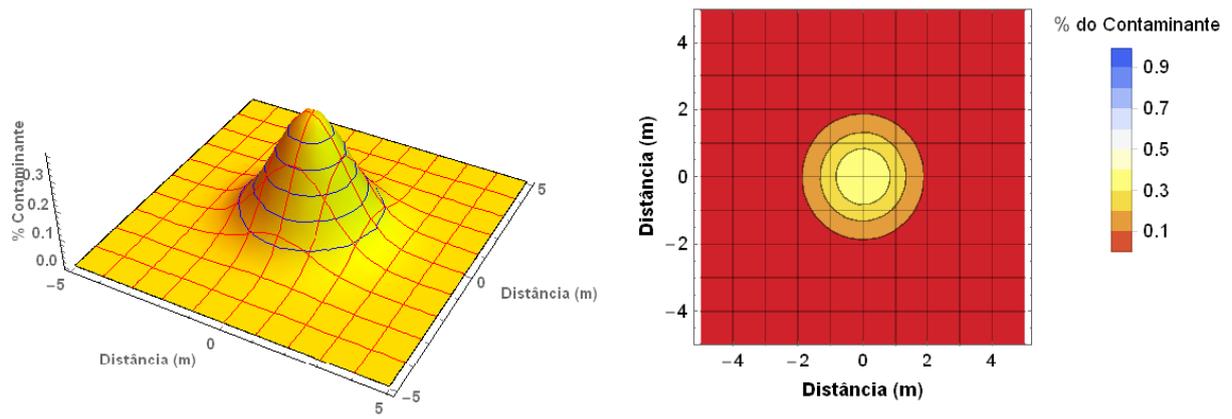


Figura 6.28 – Circular com Raio 1m e tempo 0,5

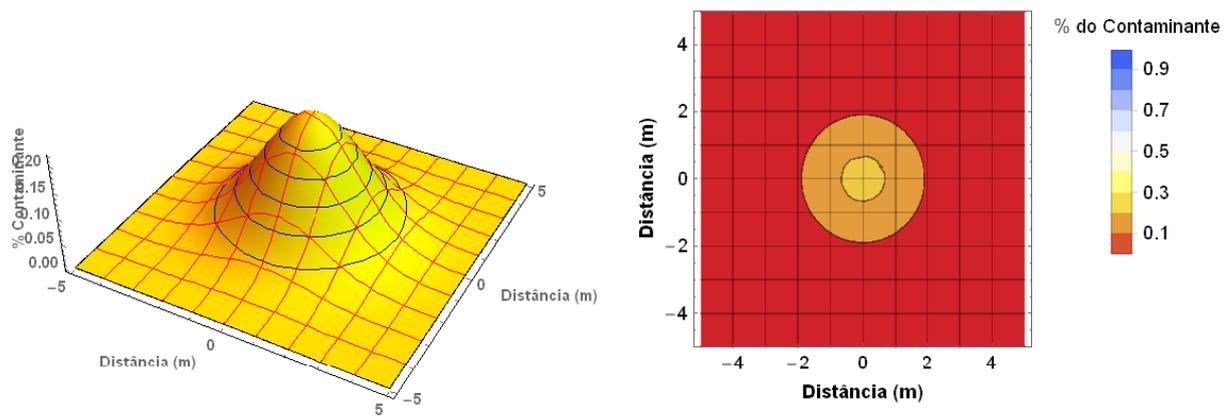


Figura 6.29 – Circular com Raio 1m e tempo 1

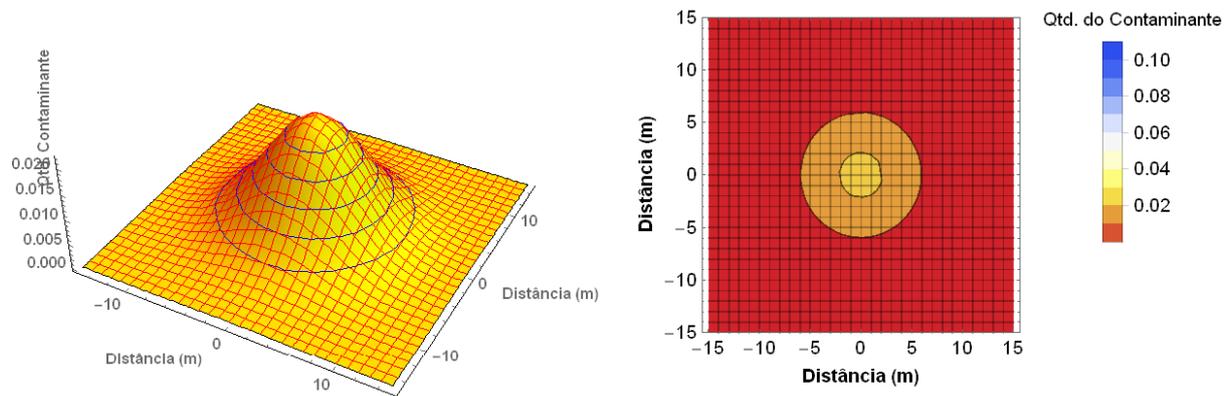


Figura 6.30– Circular com Raio 1m e tempo 11

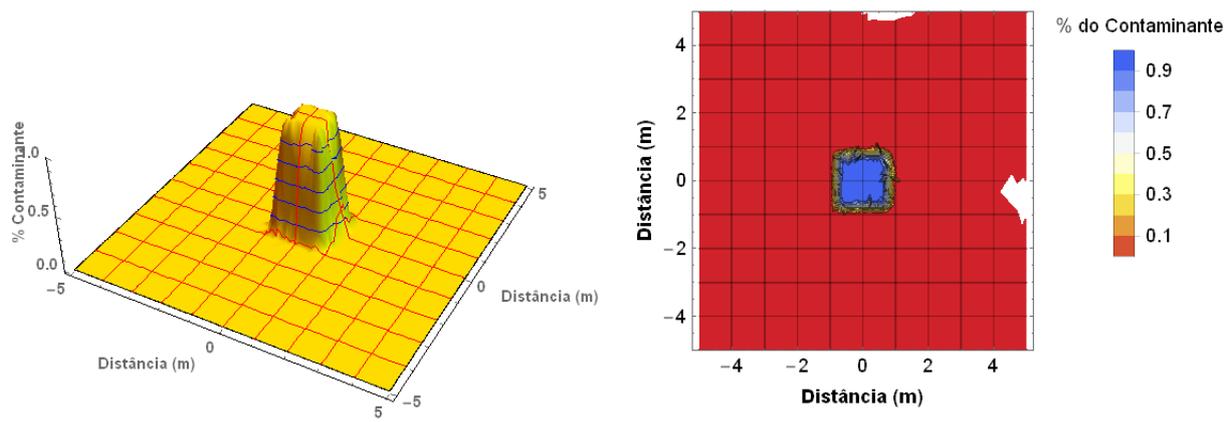


Figura 6.31 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,005

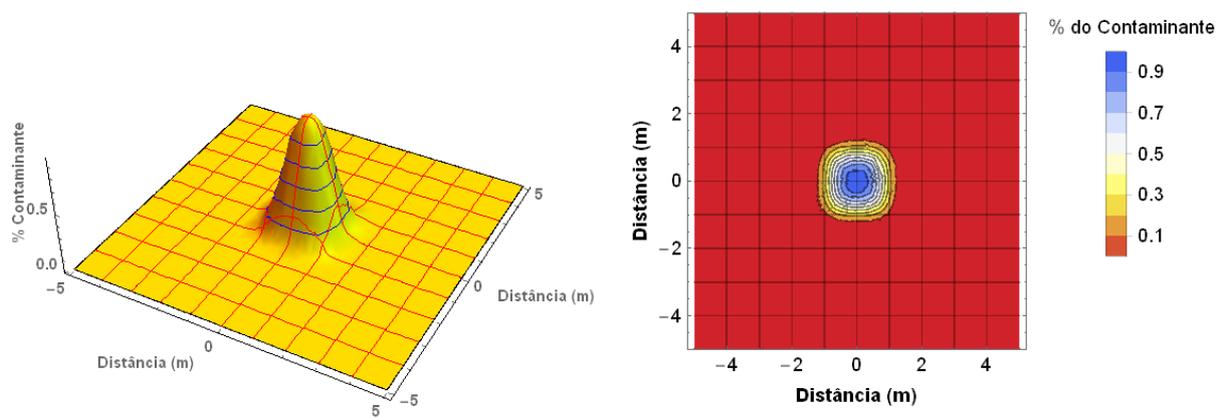


Figura 6.32 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,05

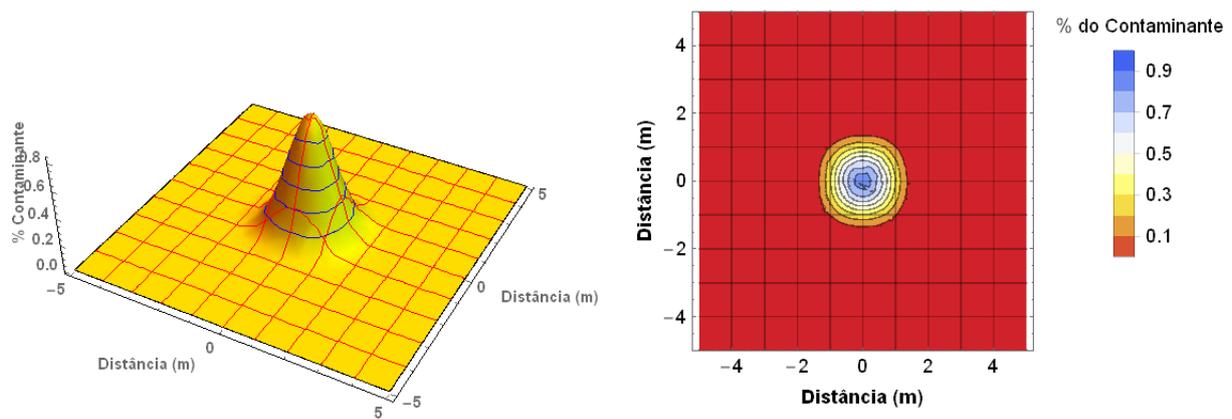


Figura 6.33 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,1

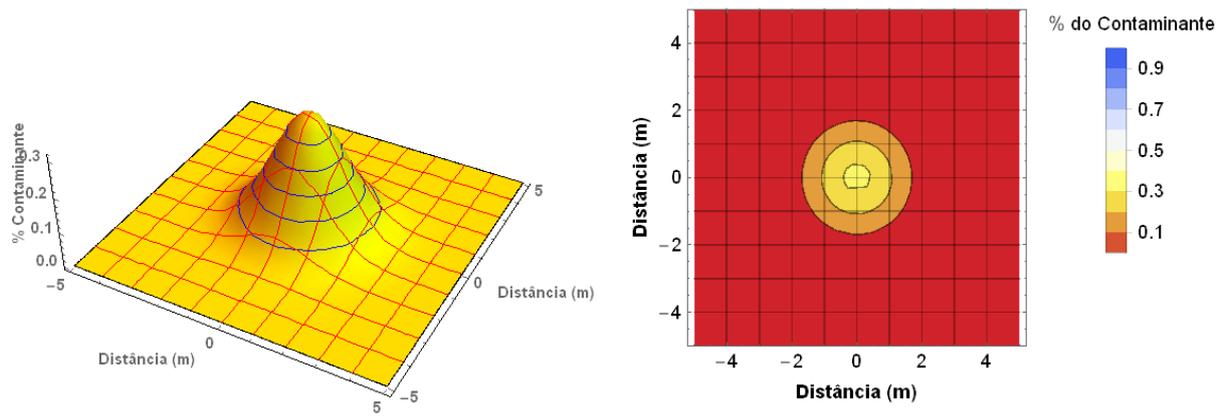


Figura 6.34 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 0,5

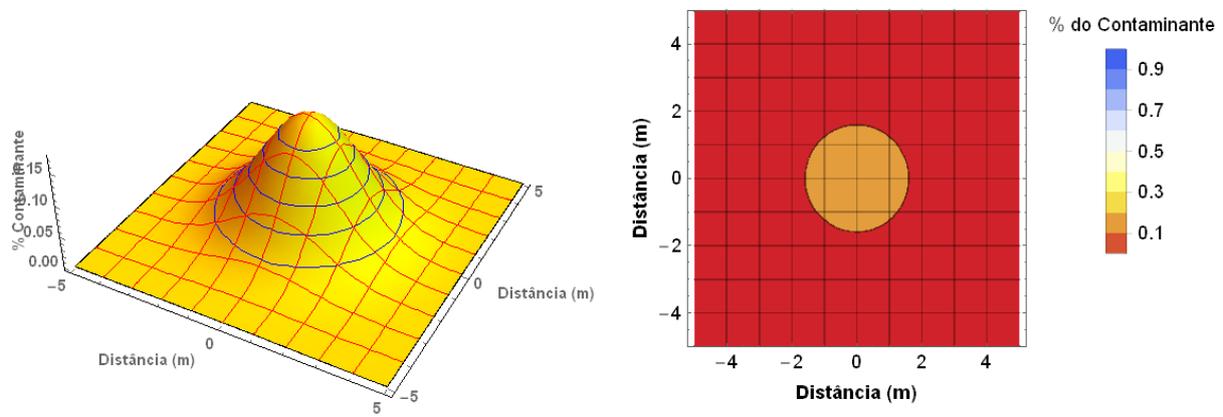


Figura 6.35 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 1

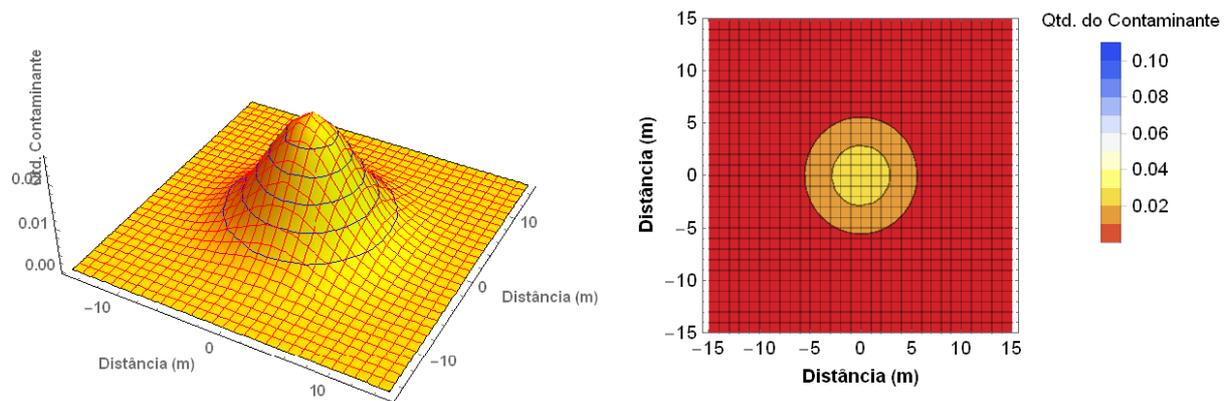


Figura 6.36 – Retangular 1,57 x 1,57 m e tempo 8

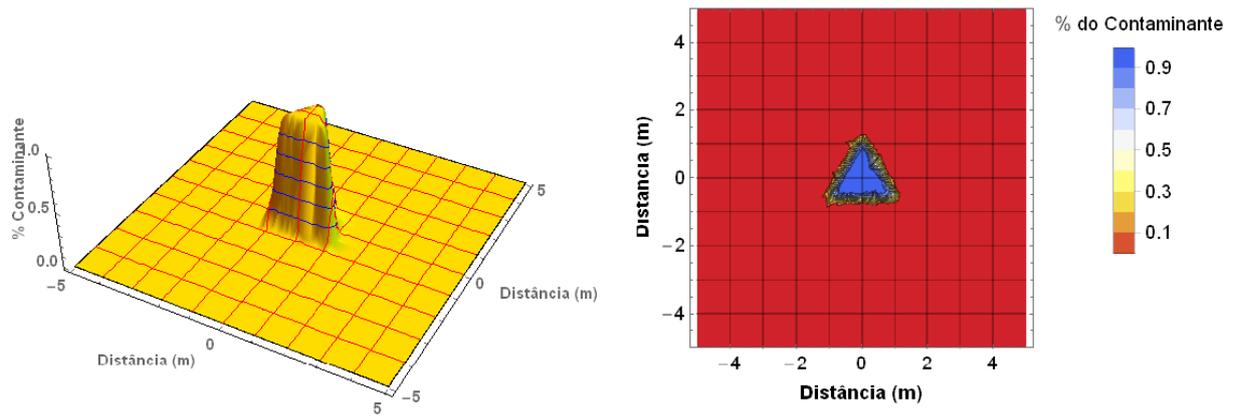


Figura 6.37 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,005

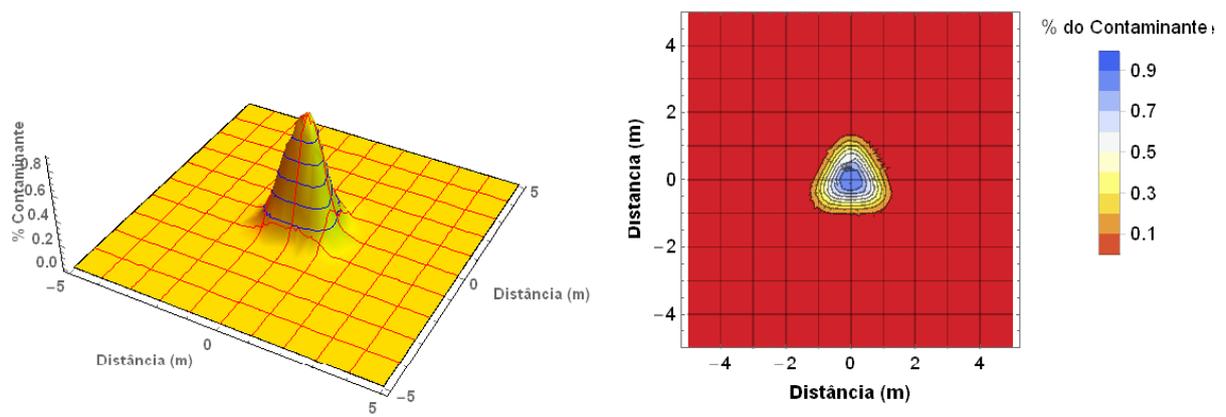


Figura 6.38 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,05

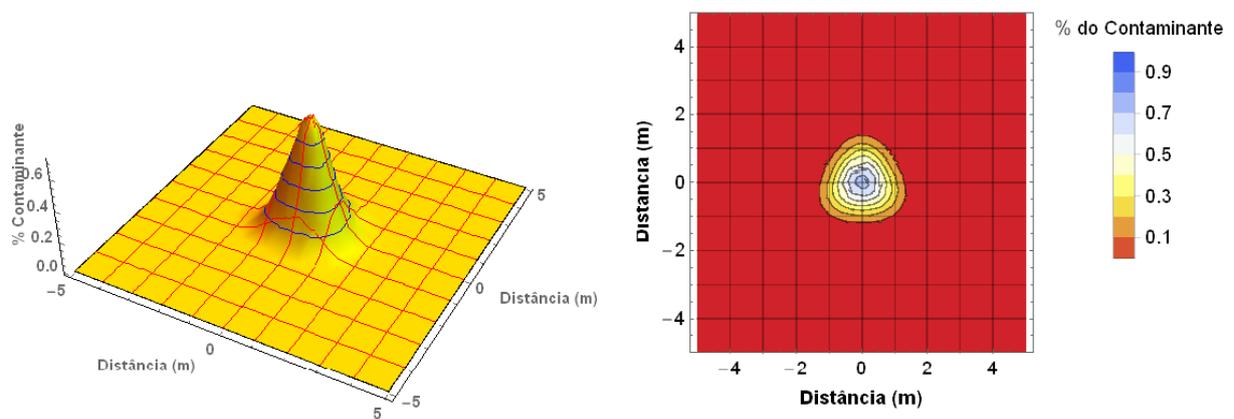


Figura 6.39 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,1

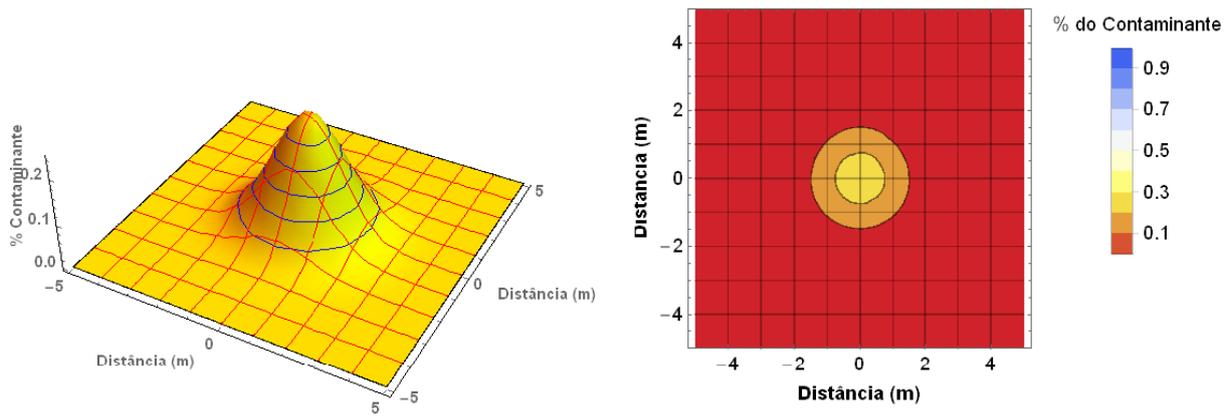


Figura 6.40 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 0,5

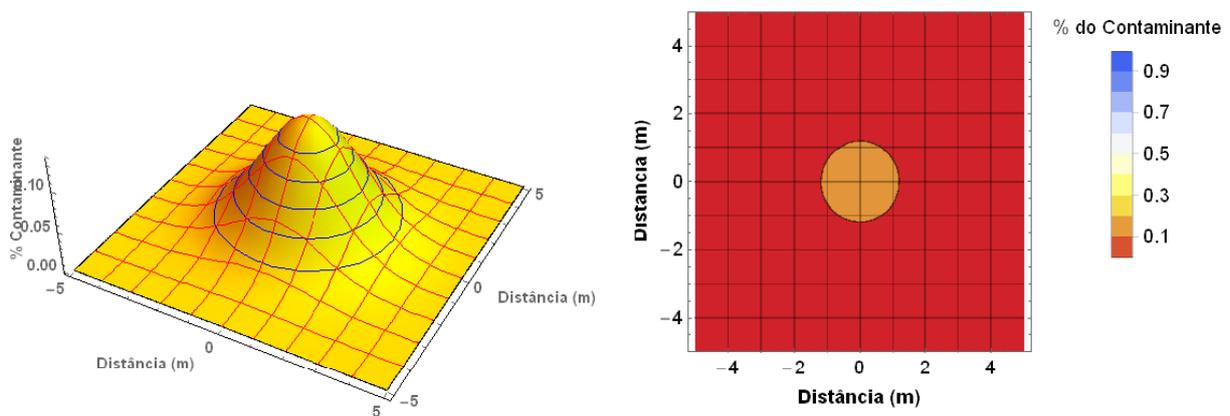


Figura 6.41 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 1

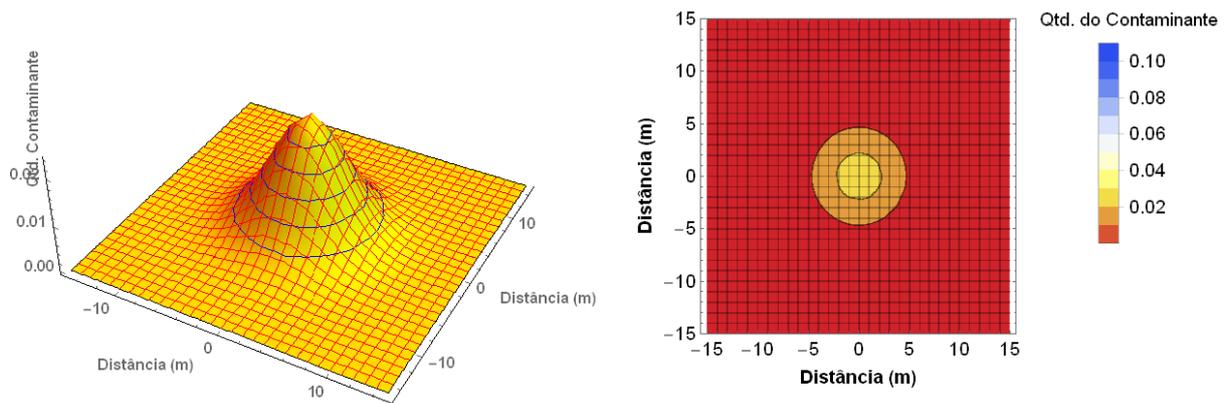


Figura 6.42 – Triangular equilátero com lados 2,09 m e tempo 6

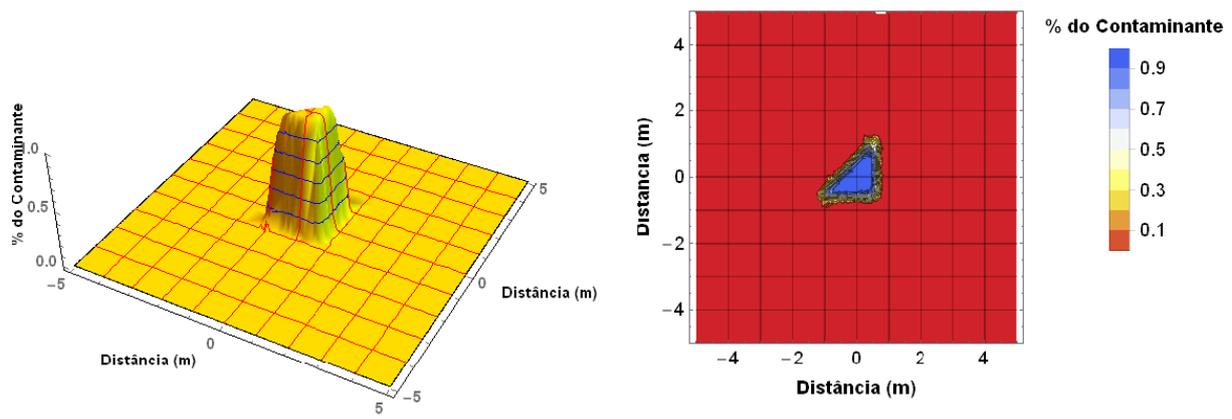


Figura 6.43 – Triângulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,005

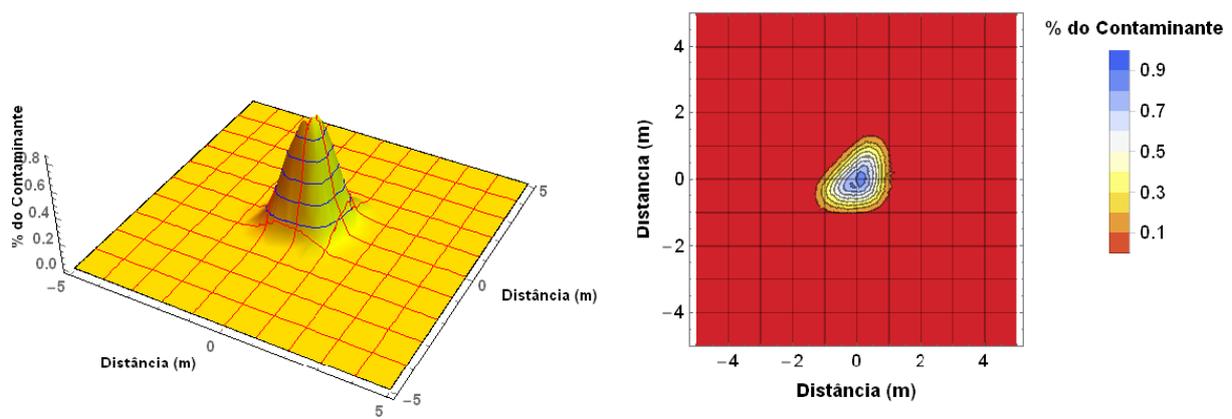


Figura 6.44 – Triângulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,05

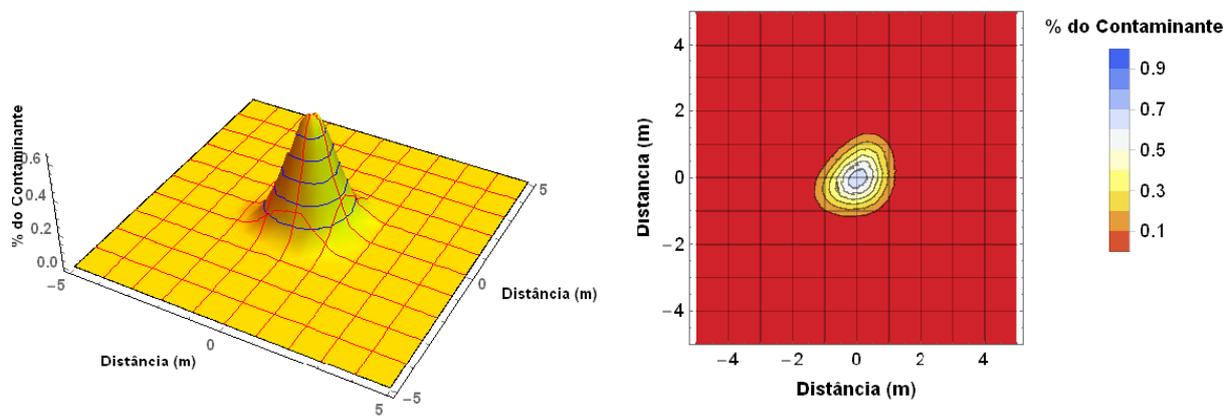


Figura 6.45 – Triângulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,1

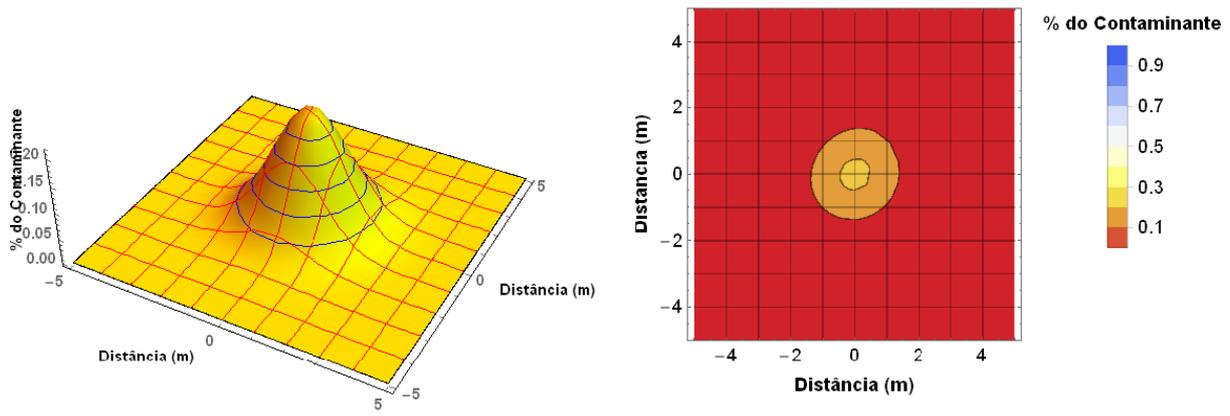


Figura 6.46 – Triângulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 0,5

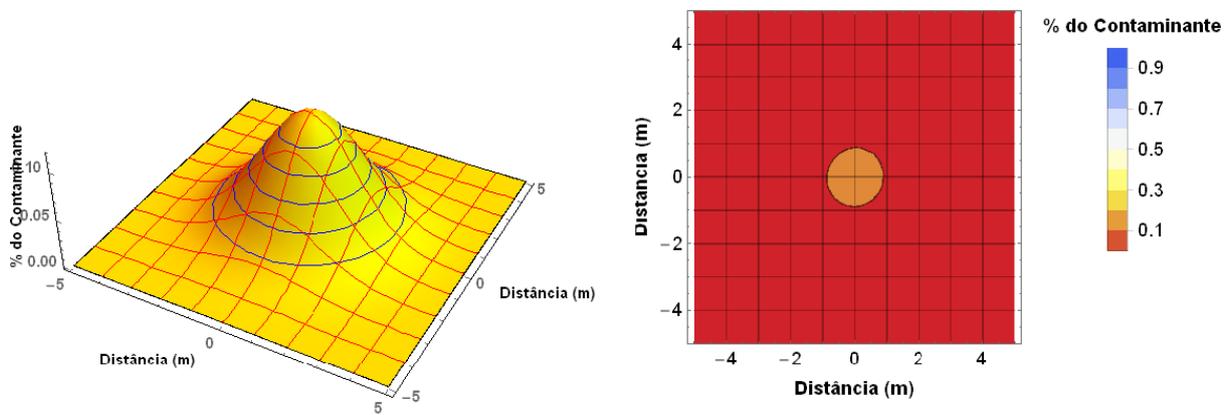


Figura 6.47 – Triângulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 1

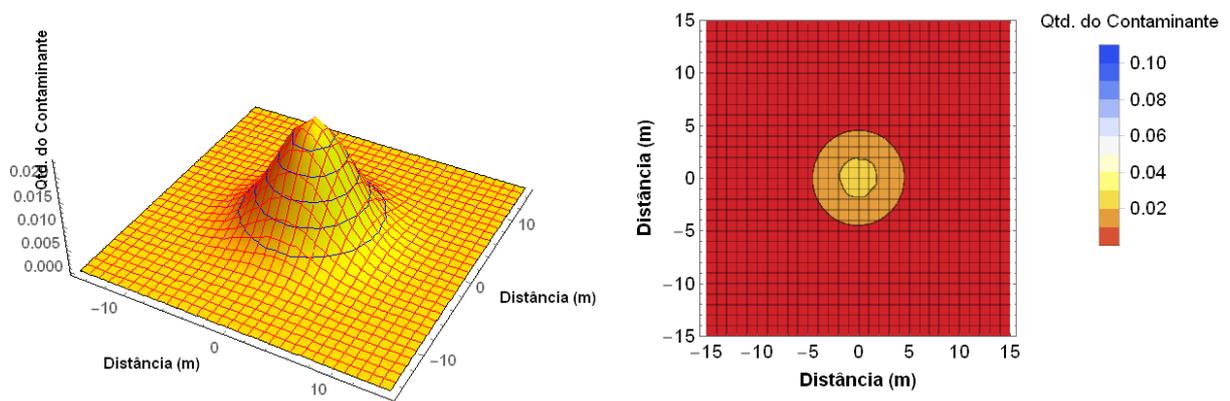


Figura 6.48 – Triângulo retângulo com catetos 1,84 m e tempo 1

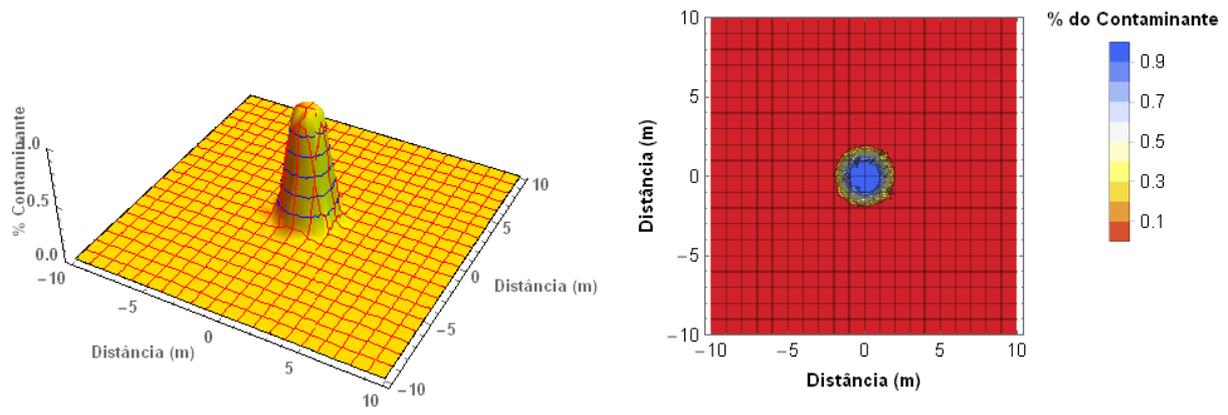


Figura 6.49 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 0,05

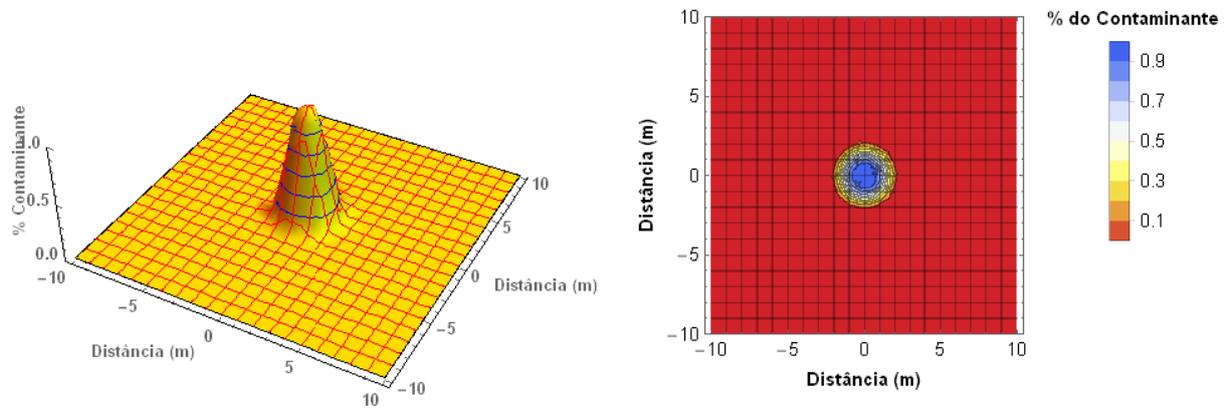


Figura 6.50 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 0,1

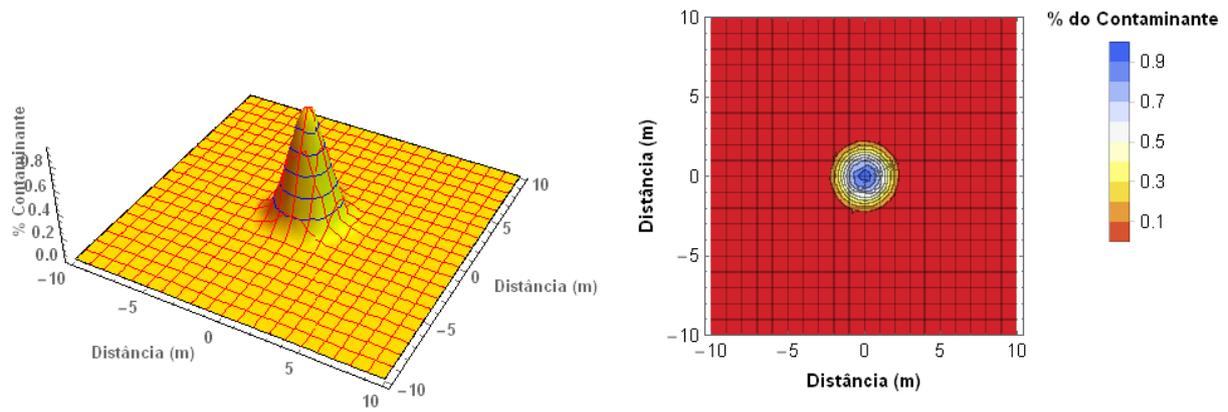


Figura 6.51 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 0,2

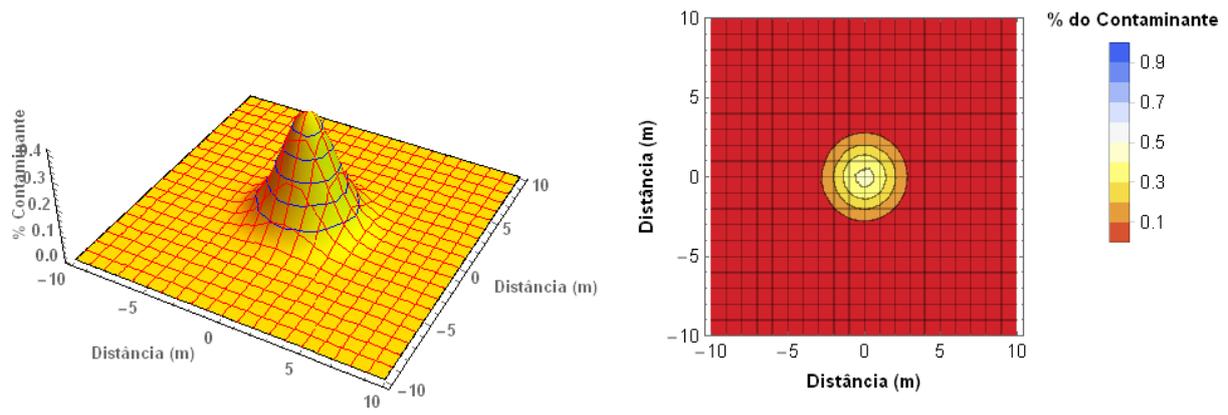


Figura 6.52 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 1

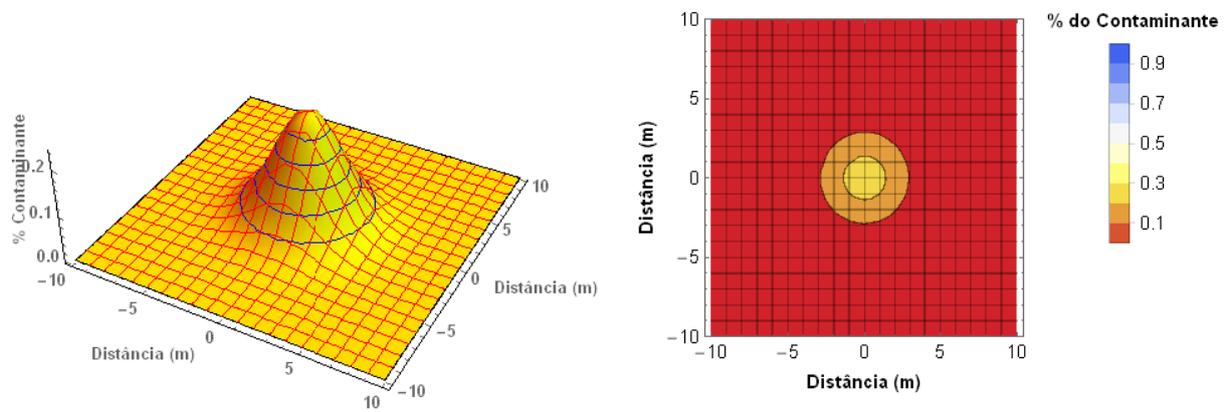


Figura 6.53 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 2

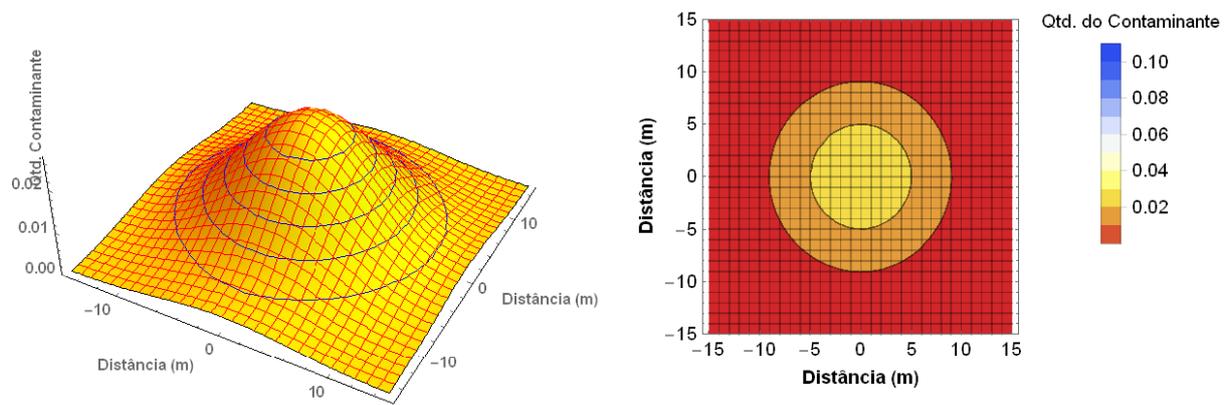


Figura 6.54 – Circular com Raio 1,5 m e tempo 20

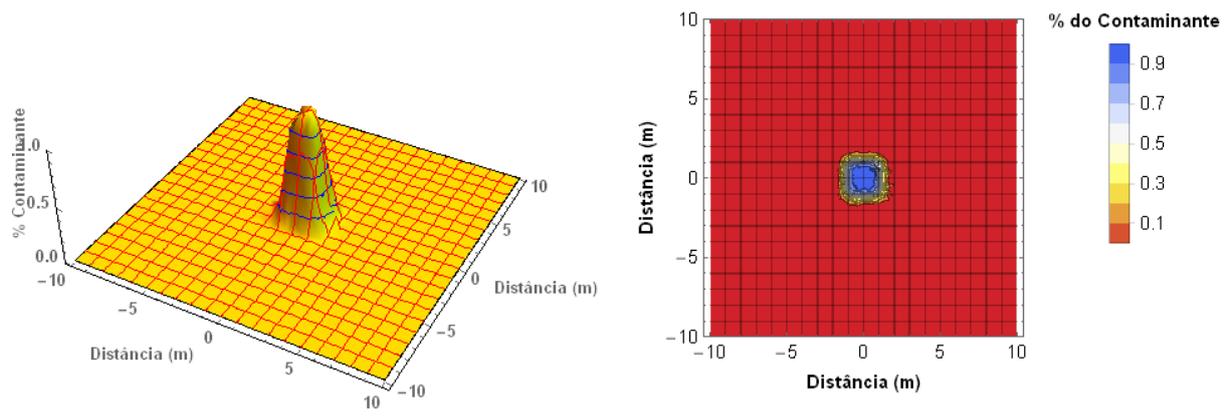


Figura 6.55 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 0,05

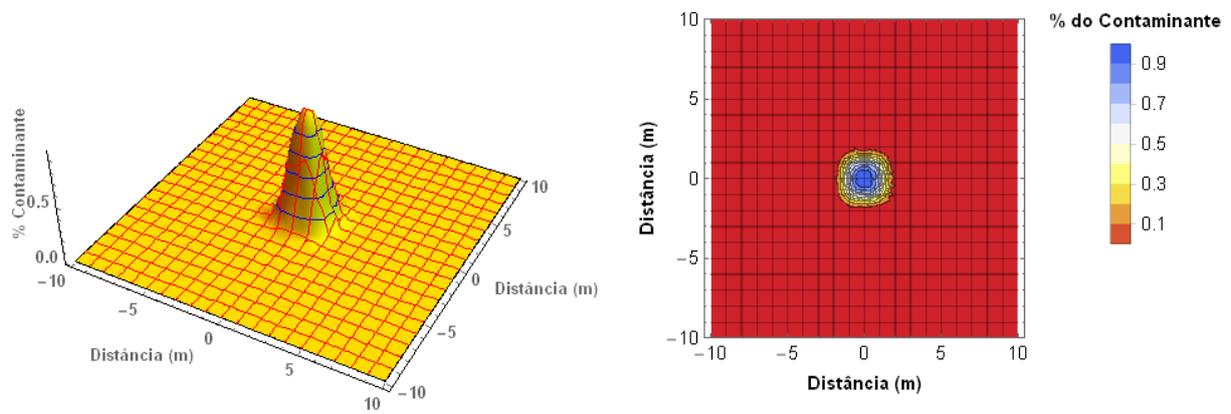


Figura 6.56 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 0,1

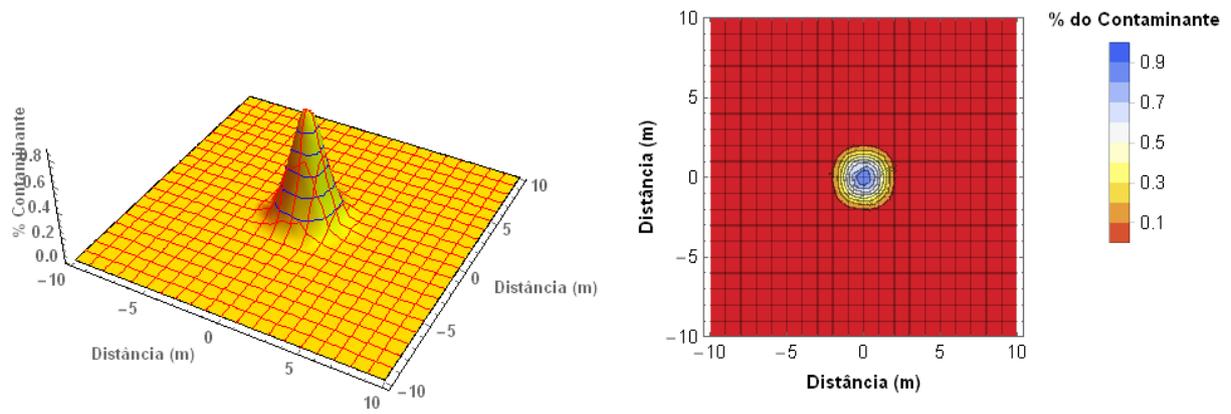


Figura 6.57 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 0,2

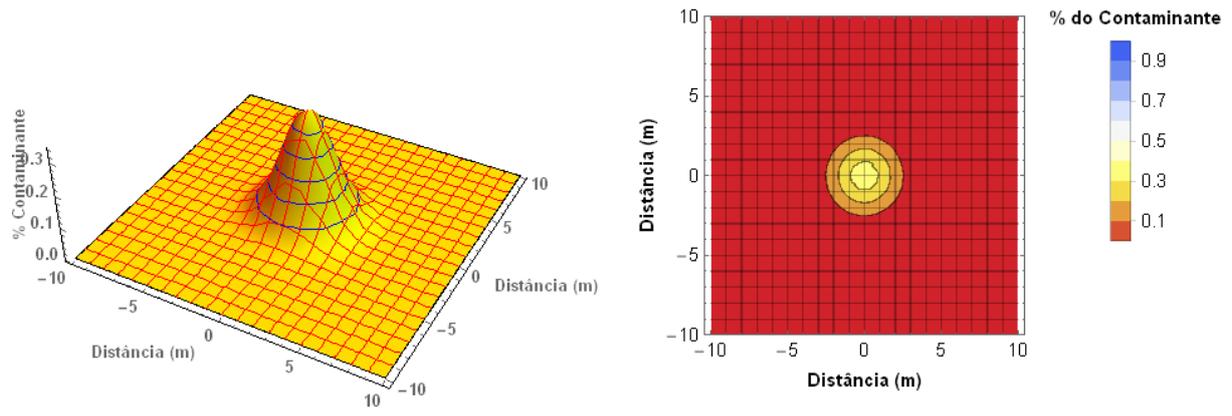


Figura 6.58 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 1

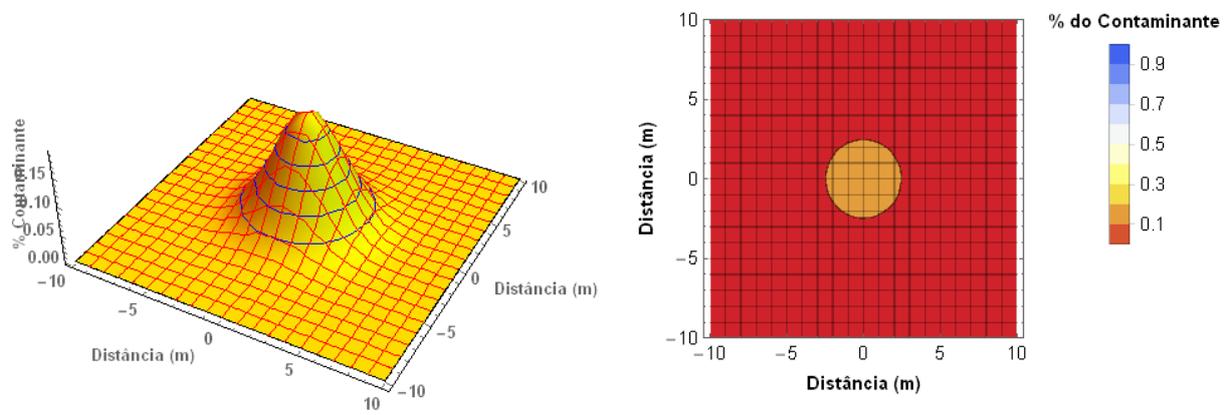


Figura 6.59 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 2

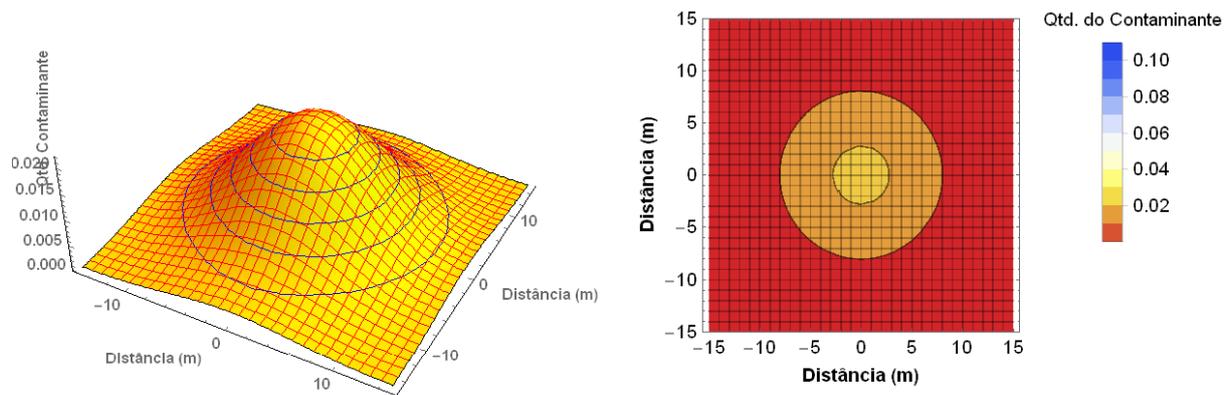


Figura 6.60 – Retangular 2,36 x 2,36 m e tempo 20

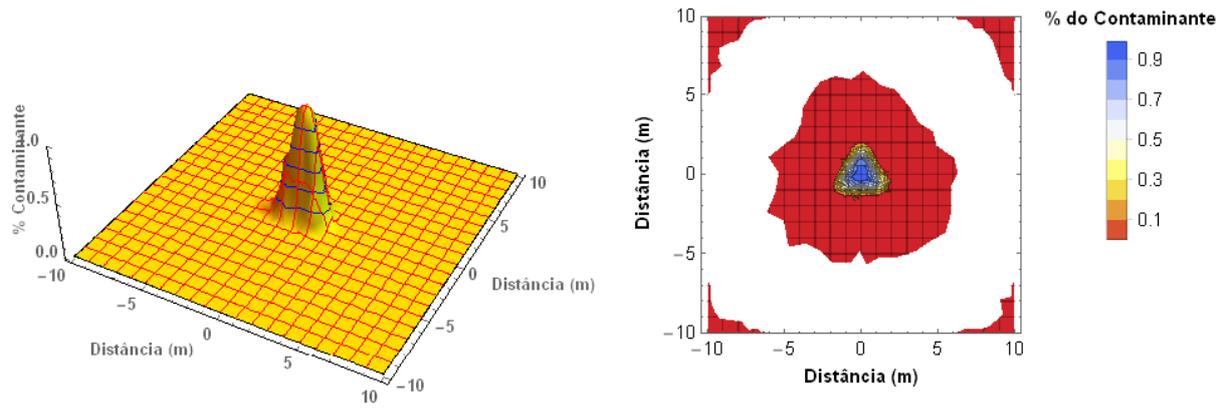


Figura 6.61 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 0,05

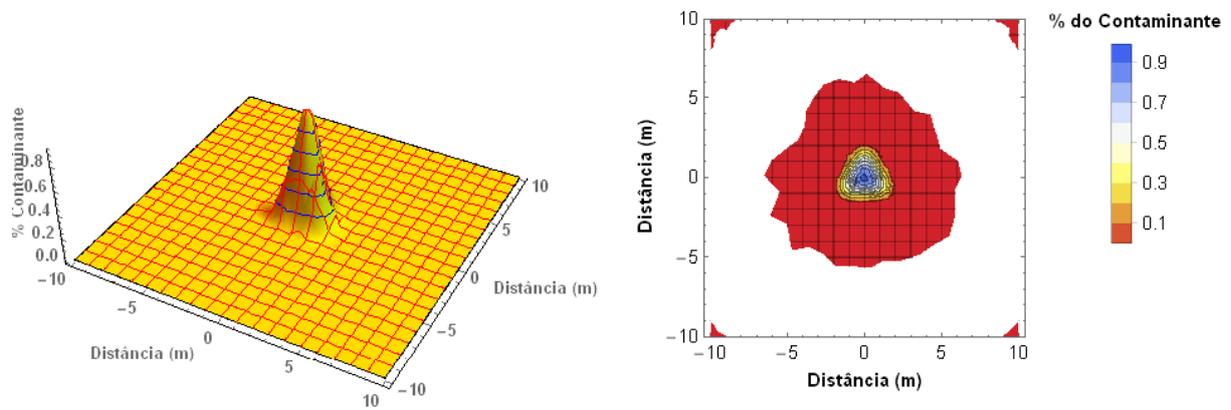


Figura 6.62 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 0,1

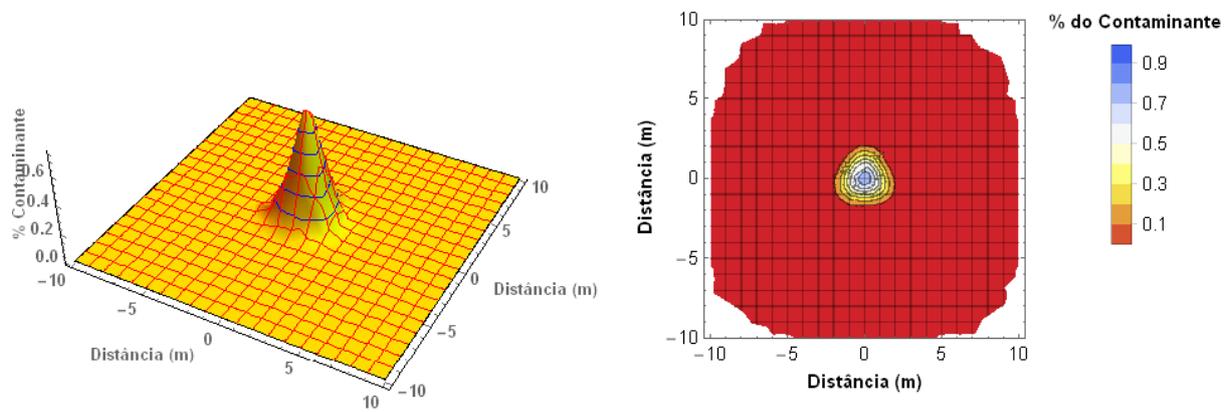


Figura 6.63 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 0,2

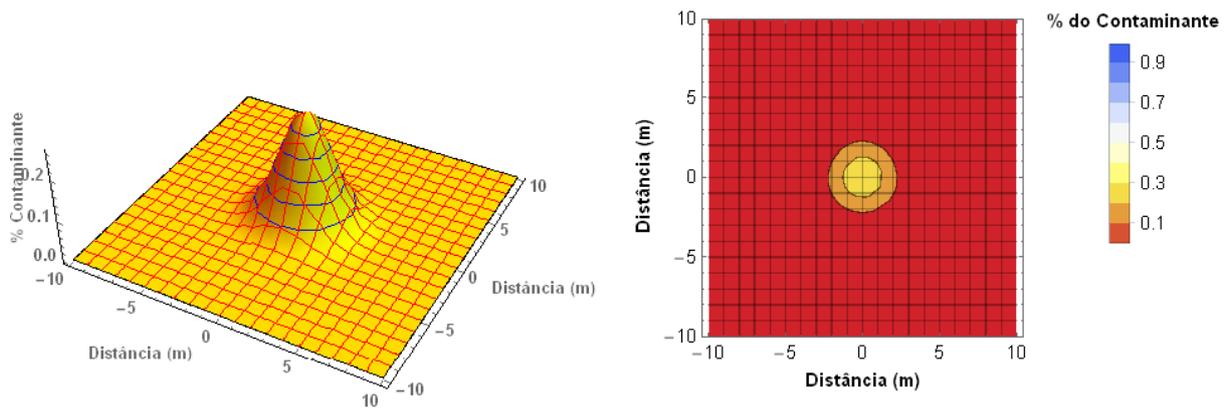


Figura 6.64 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 1

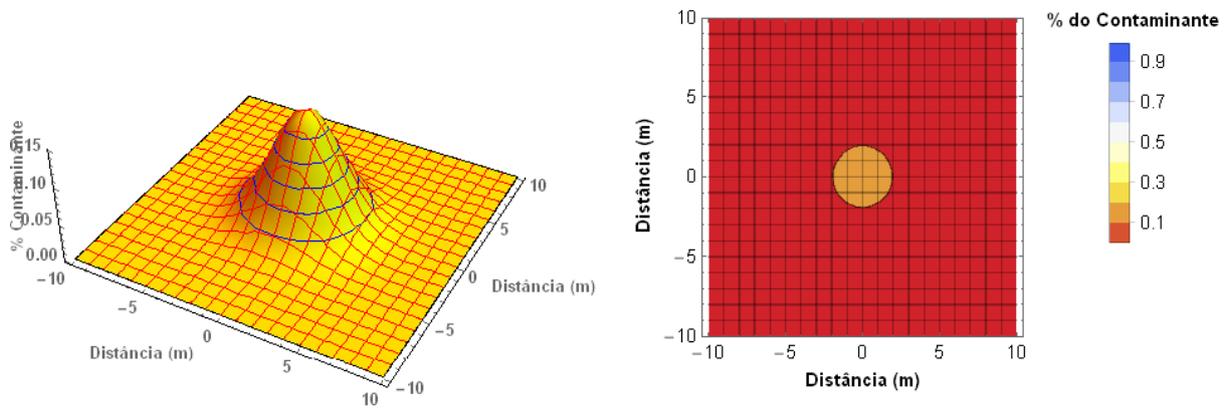


Figura 6.65 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 2

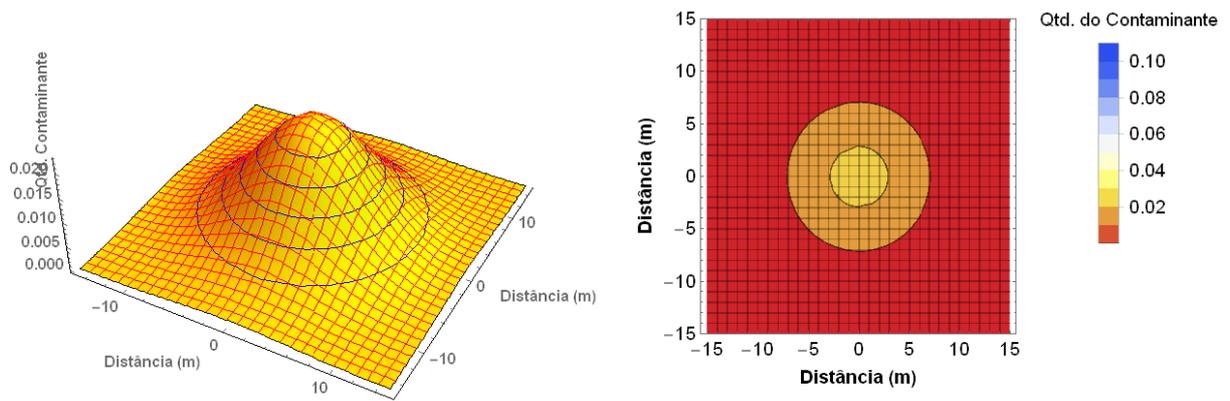


Figura 6.66 – Triangular equilátero com lados 3,14 m e tempo 2

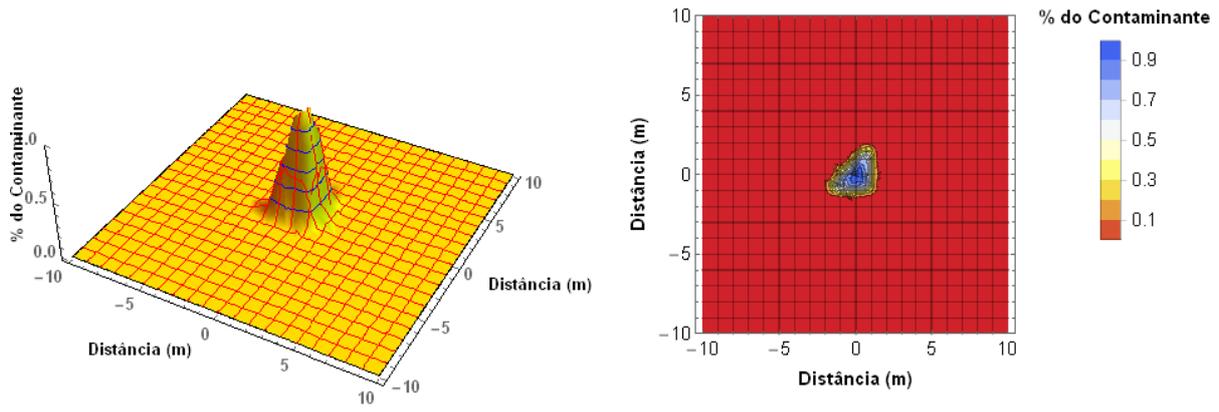


Figura 6.67 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 0,05

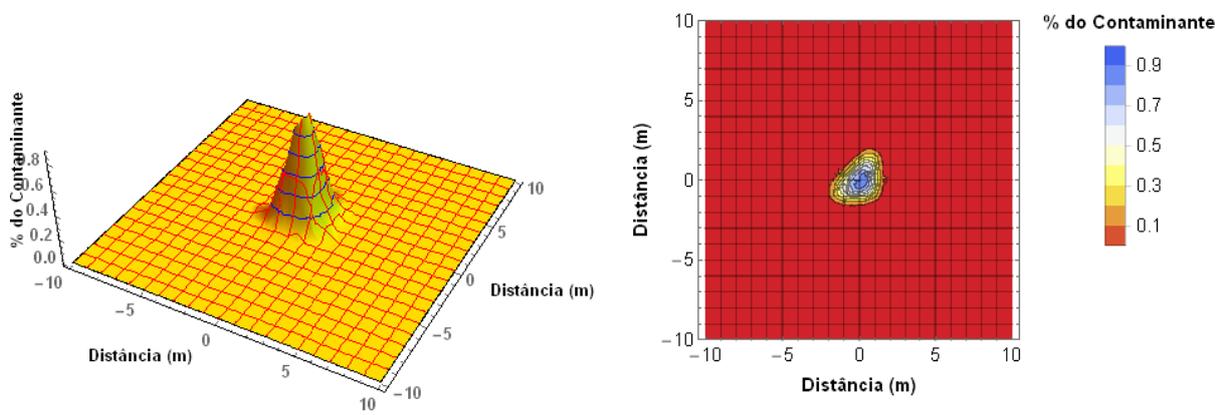


Figura 6.68 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 0,1

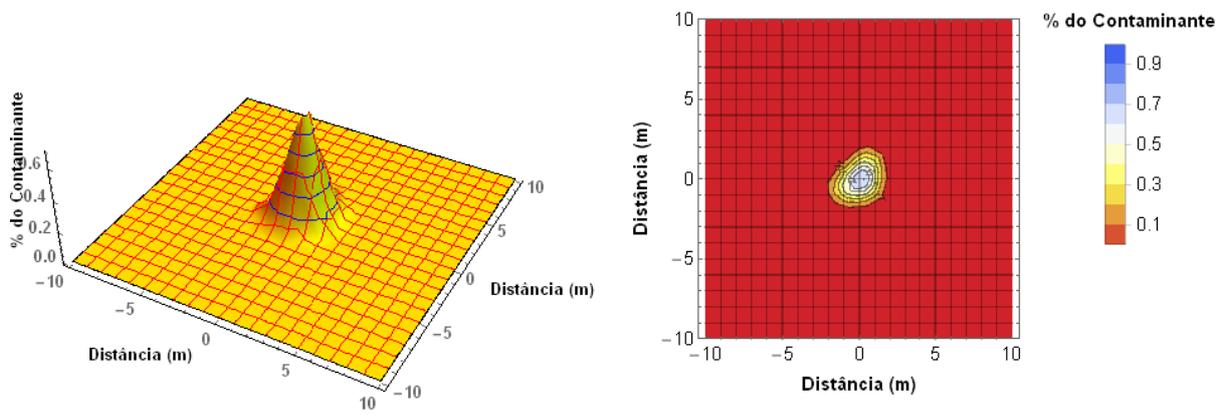


Figura 6.69 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 0,2

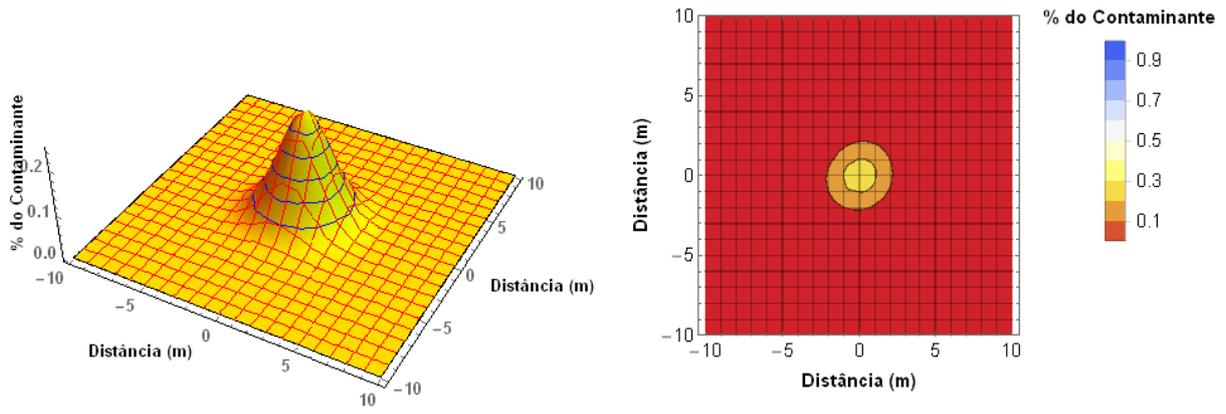


Figura 6.70 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 1

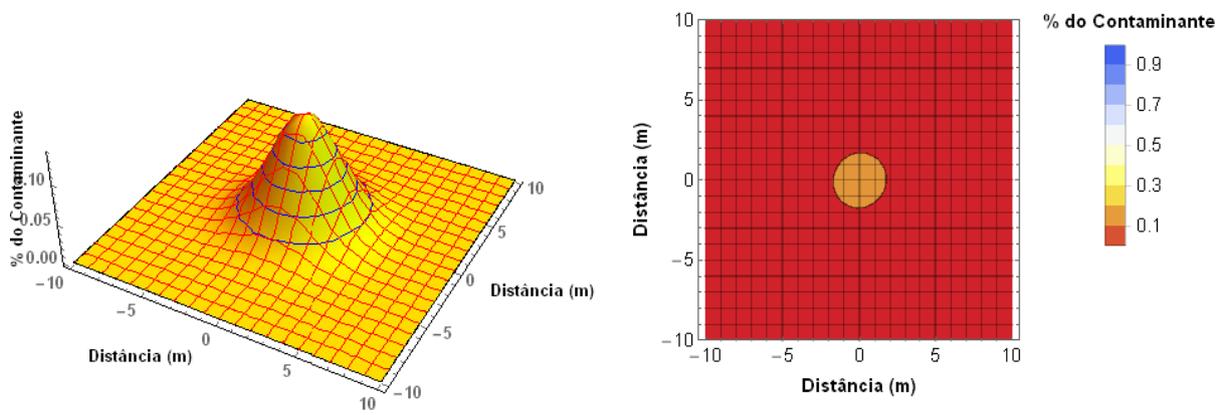


Figura 6.71 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 2

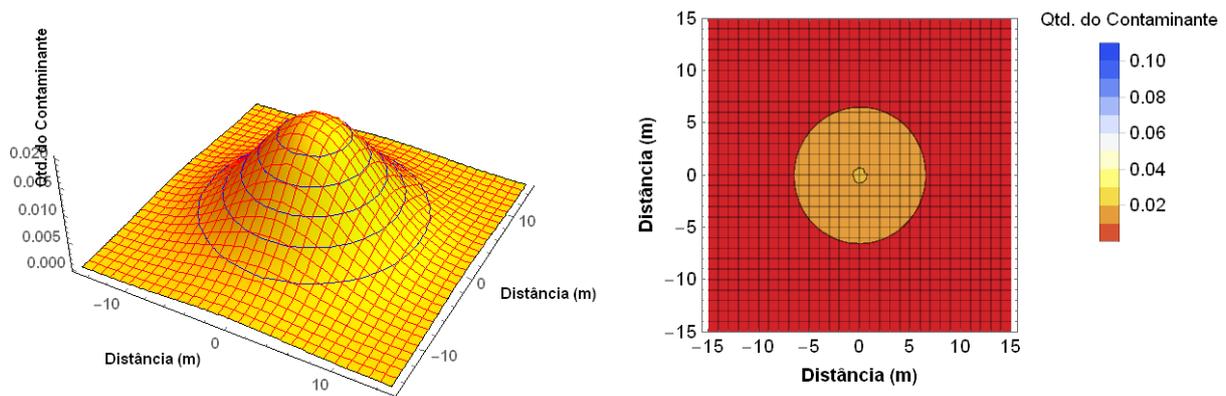


Figura 6.72 – Triângulo retângulo com catetos 2,76 m e tempo 15

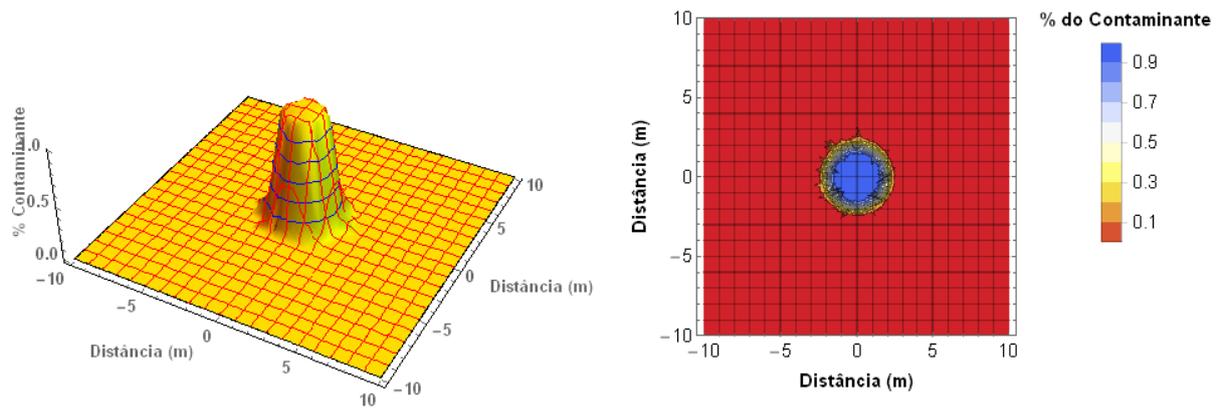


Figura 6.73 – Circular com Raio 2 m e tempo 0,05

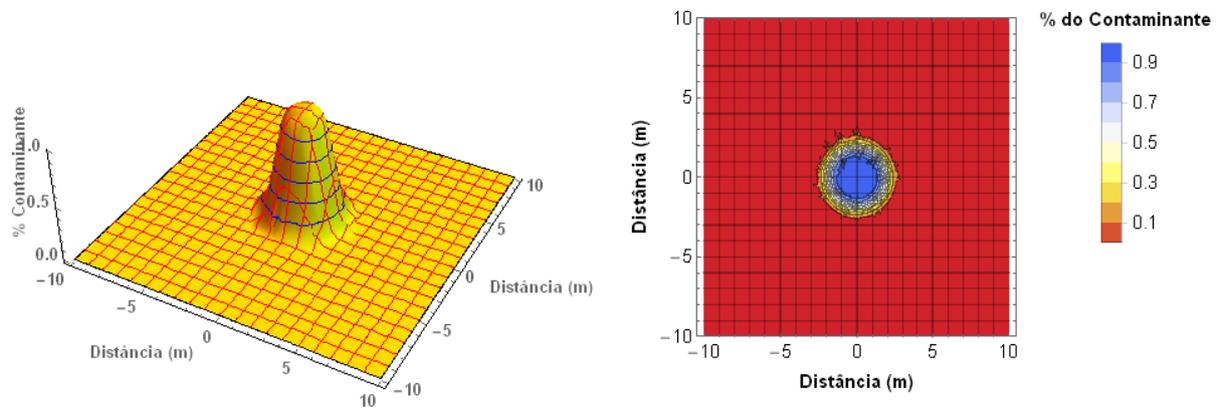


Figura 6.74 – Circular com Raio 2 m e tempo 0,1

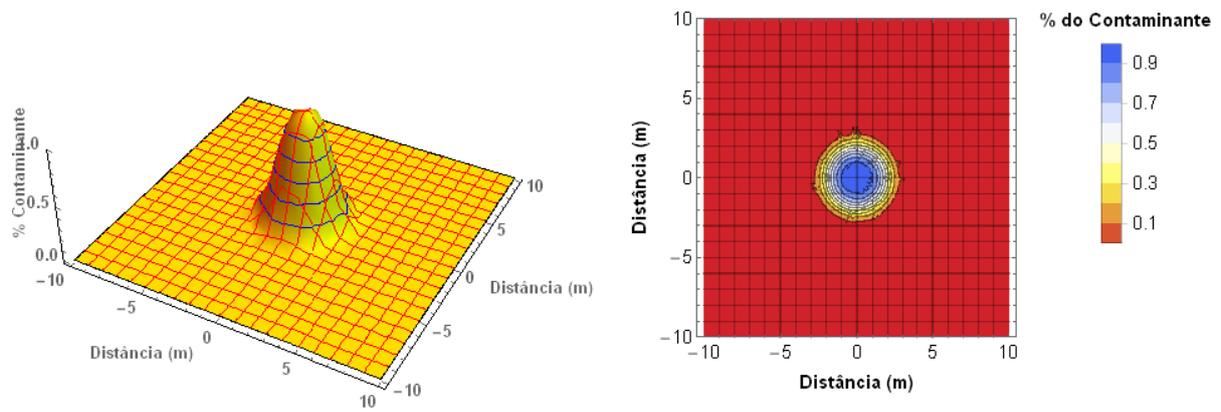


Figura 6.75 – Circular com Raio 2 m e tempo 0,2

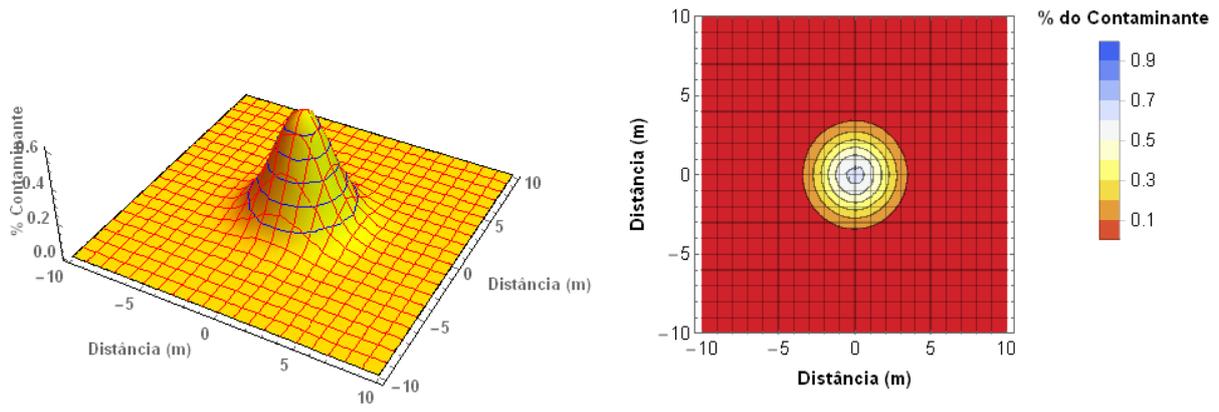


Figura 6.76 – Circular com Raio 2 m e tempo 1

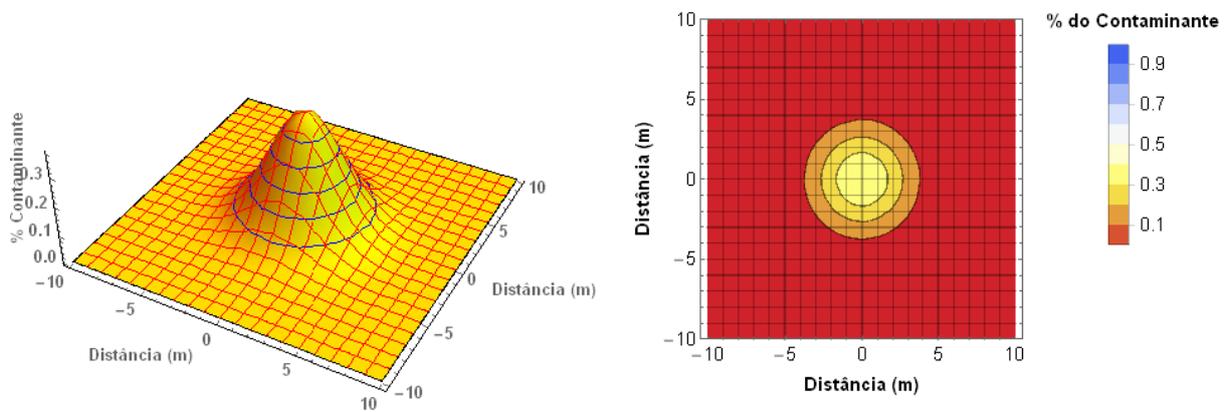


Figura 6.77 – Circular com Raio 2 m e tempo 2

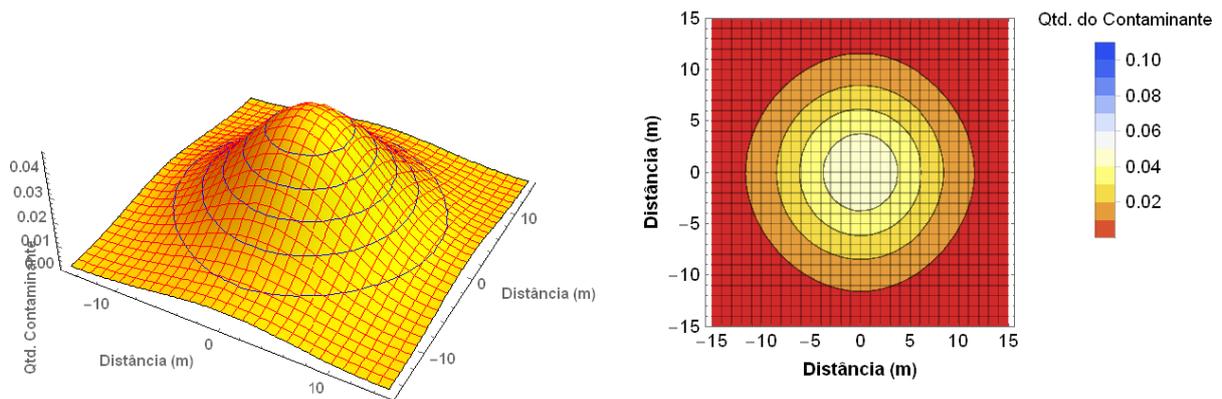


Figura 6.78 – Circular com Raio 2 m e tempo 20

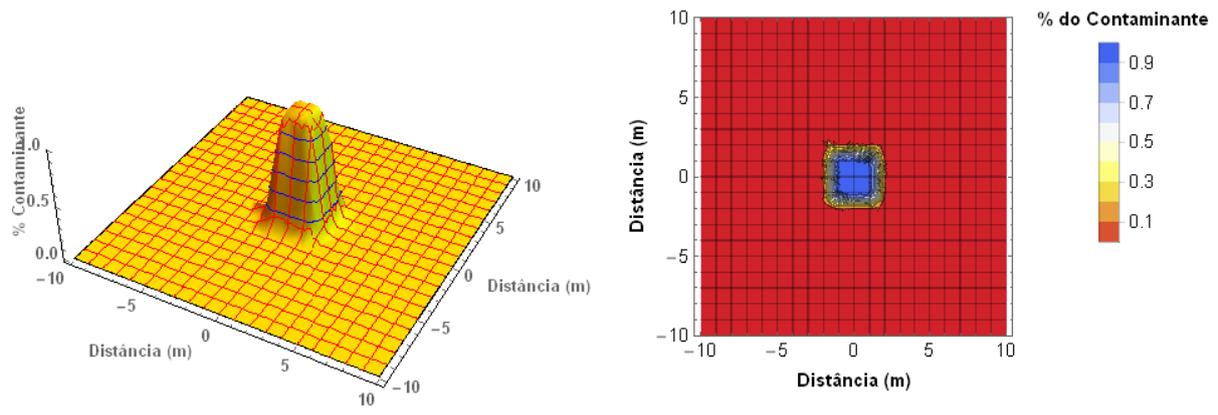


Figura 6.79 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 0,05

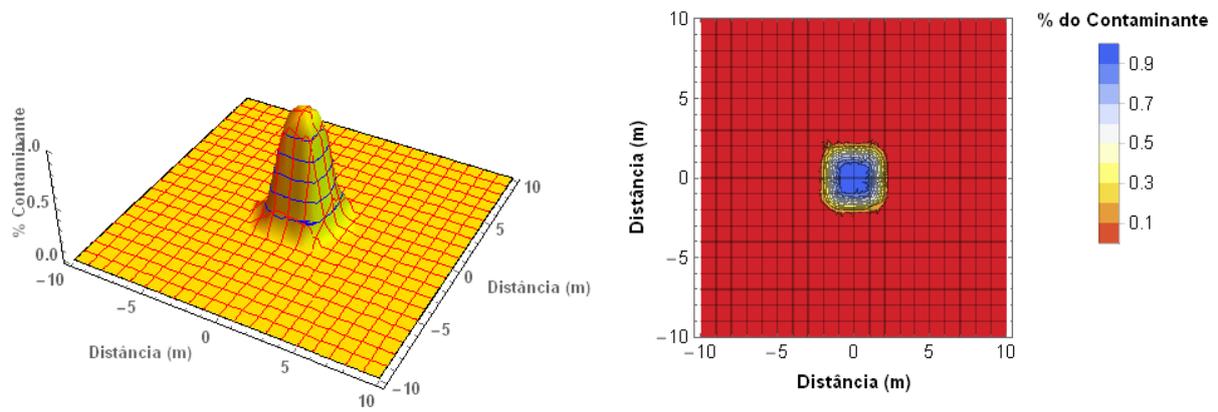


Figura 6.80 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 0,1

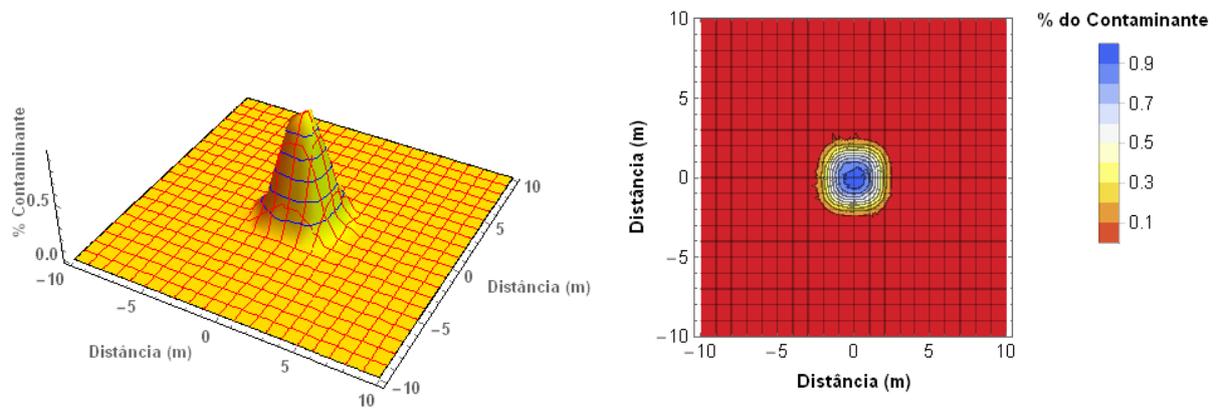


Figura 6.81 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 0,2

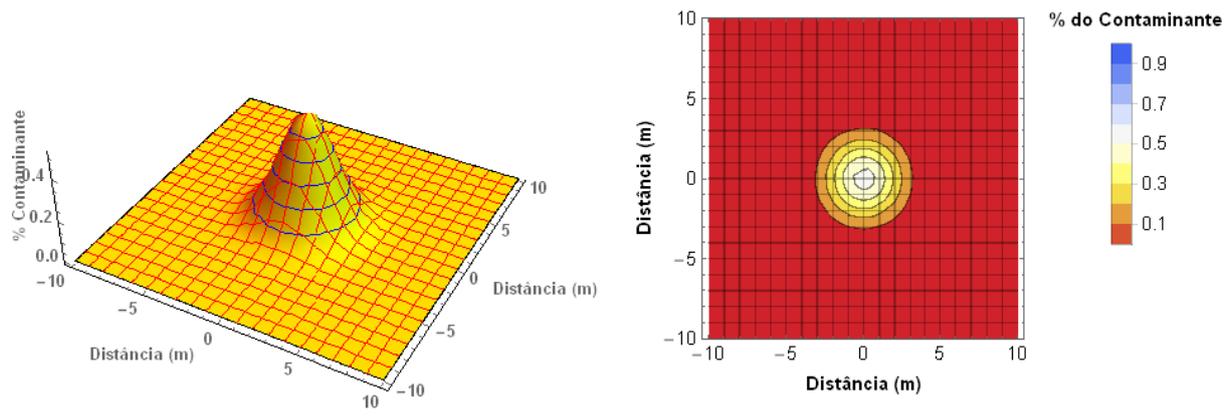


Figura 6.82 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 1

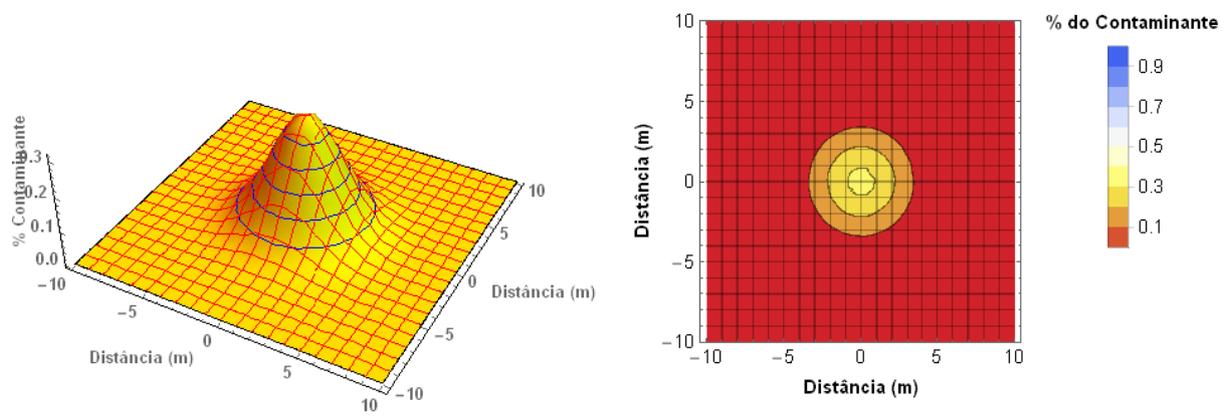


Figura 6.83 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 2

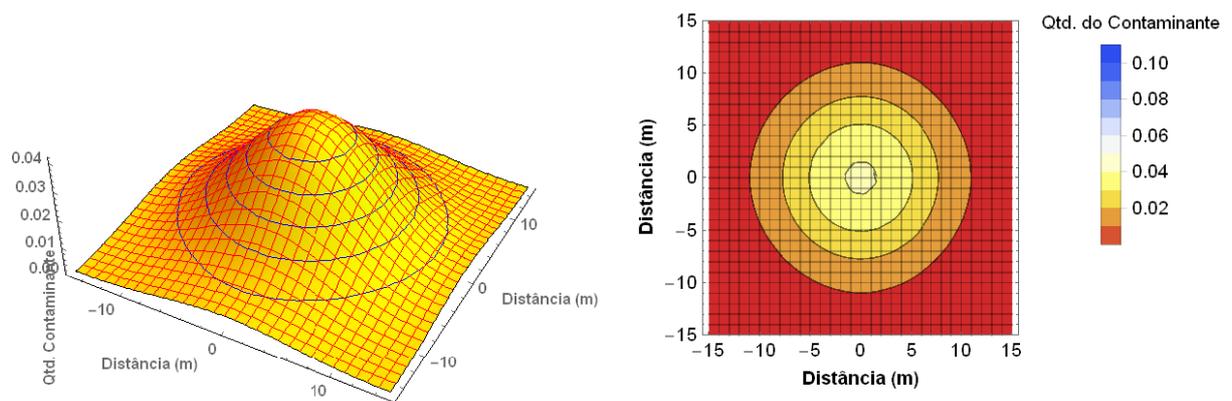


Figura 6.84 – Retangular 3,14 x 3,14 m e tempo 20

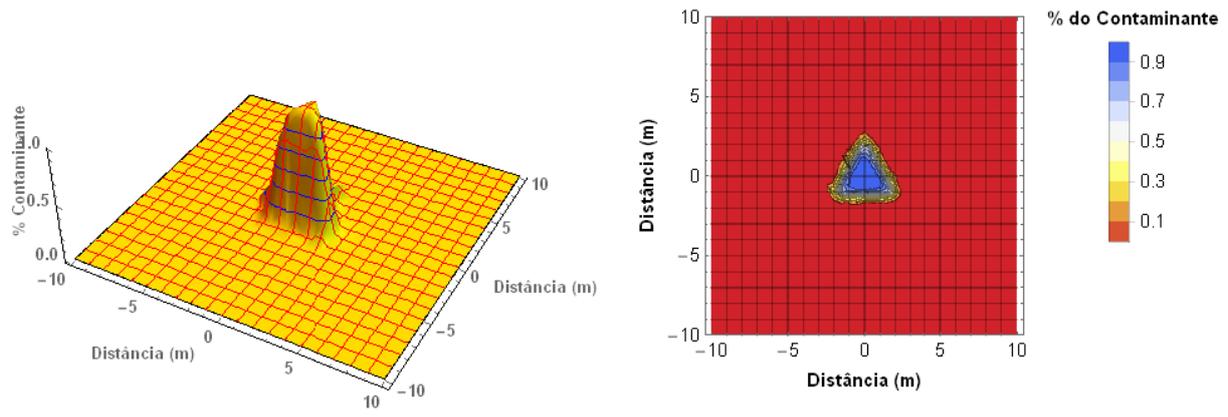


Figura 6.85 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 0,05

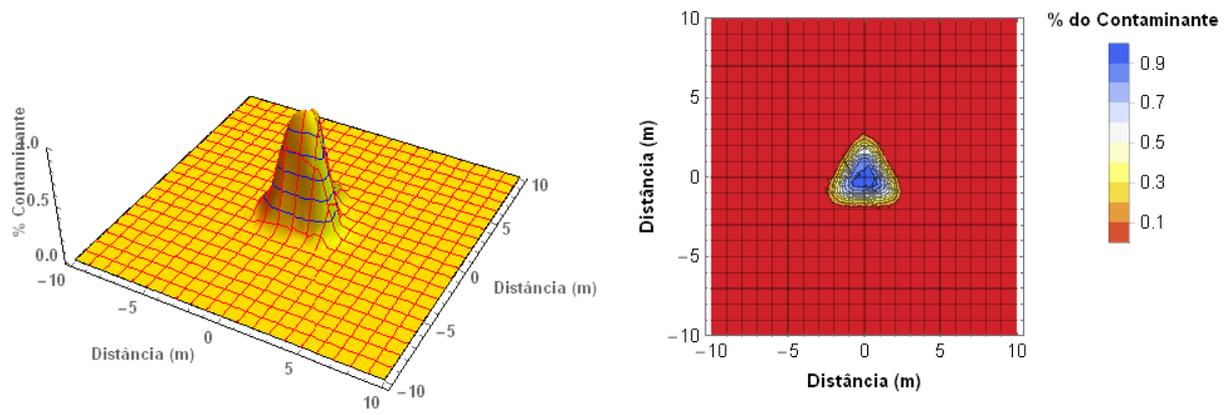


Figura 6.86 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 0,1

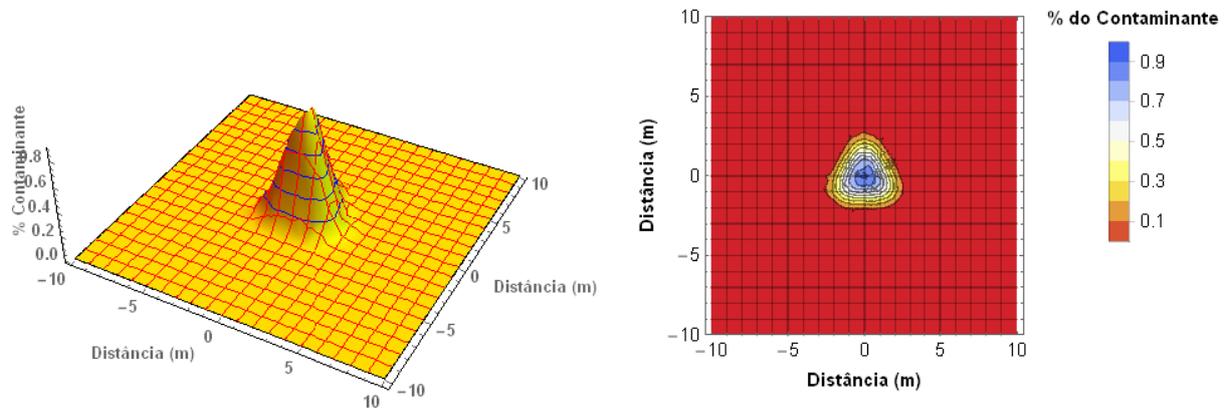


Figura 6.87 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 0,2

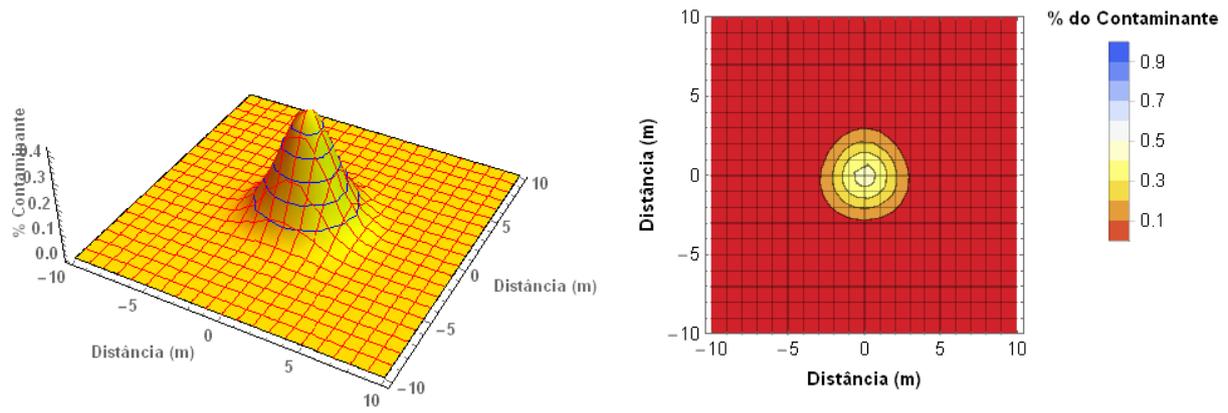


Figura 6.88 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 1

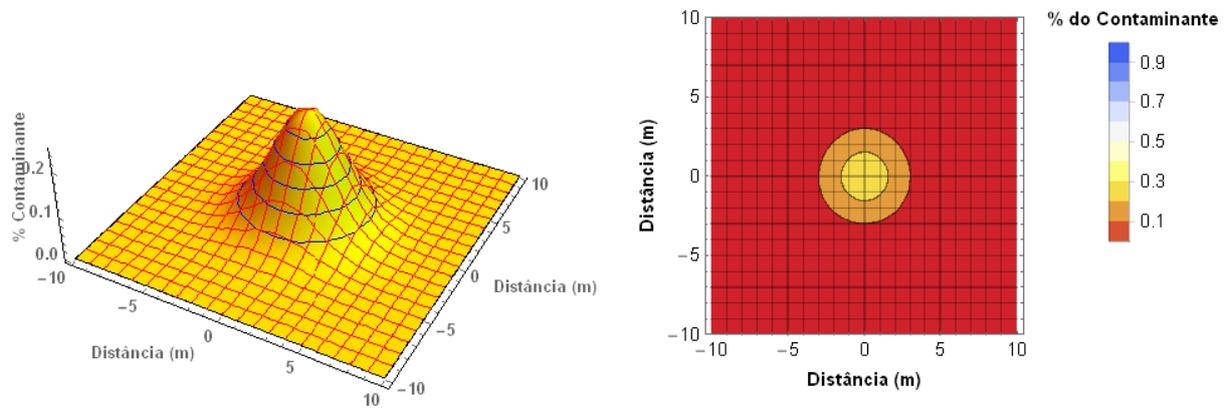


Figura 6.89 – Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 2

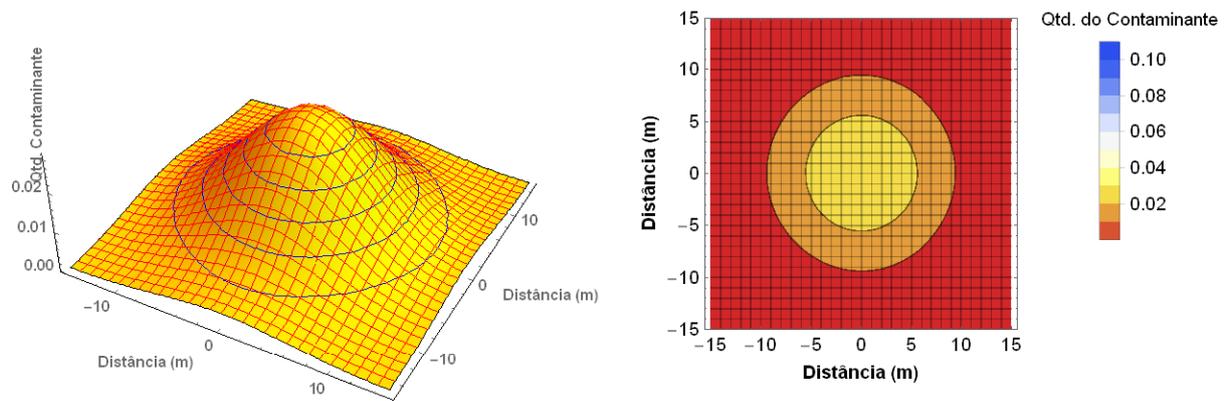


Figura 6.90 - Triangular equilátero com lados 4,19 m e tempo 20

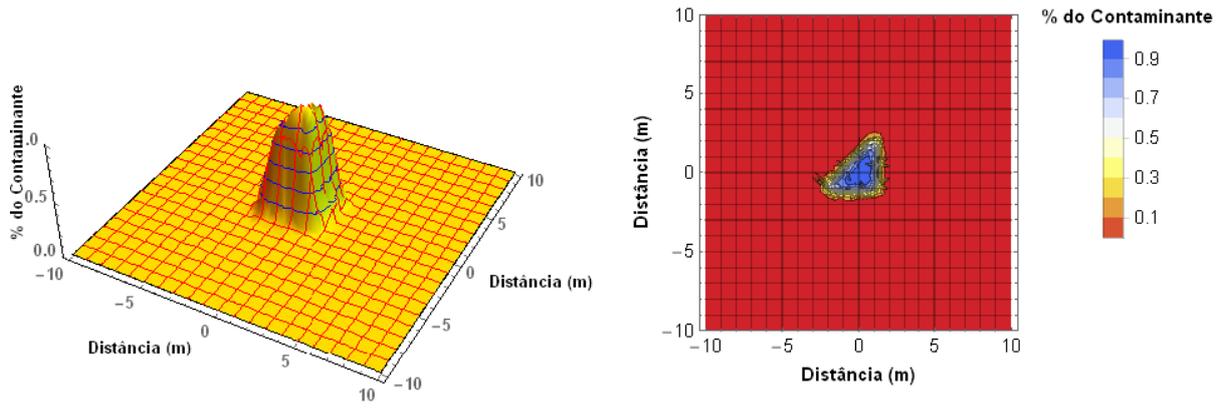


Figura 6.91 – Triângulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 0,05

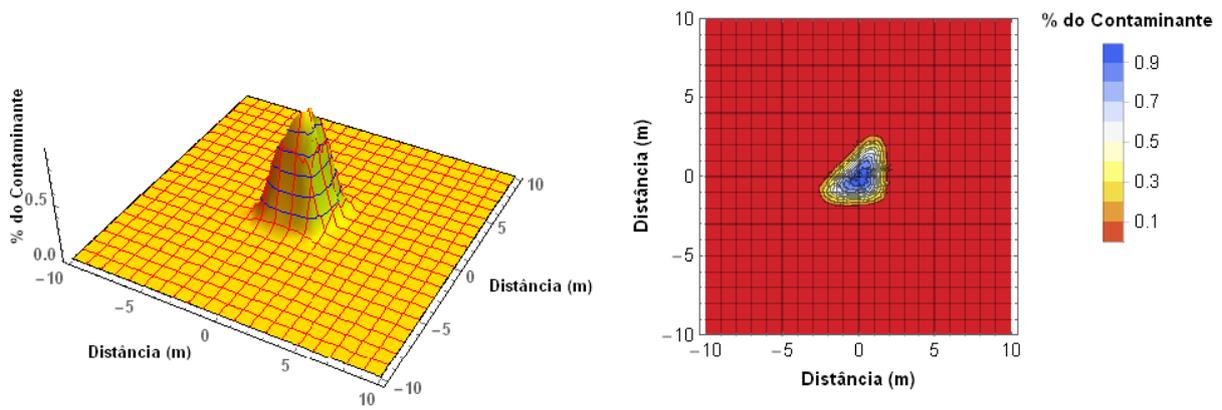


Figura 6.92 – Triângulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 0,1

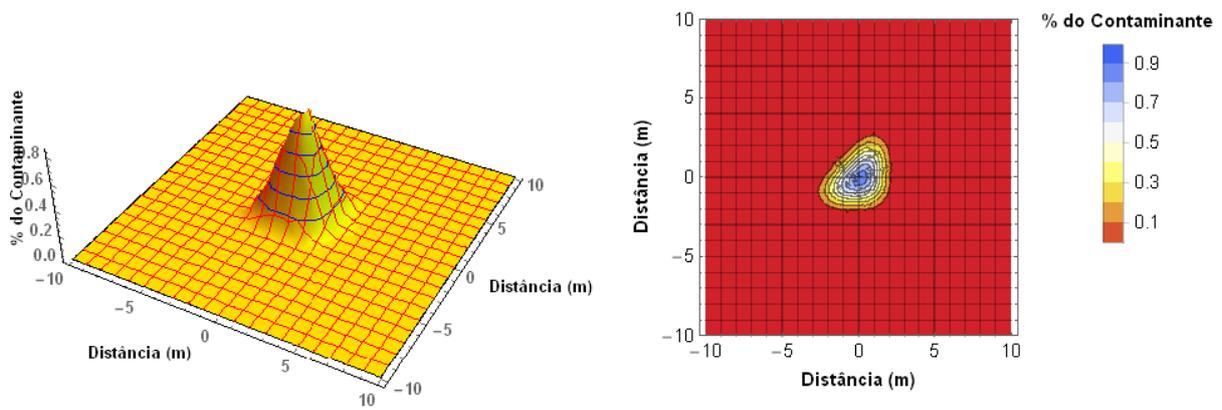


Figura 6.93 – Triângulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 0,2

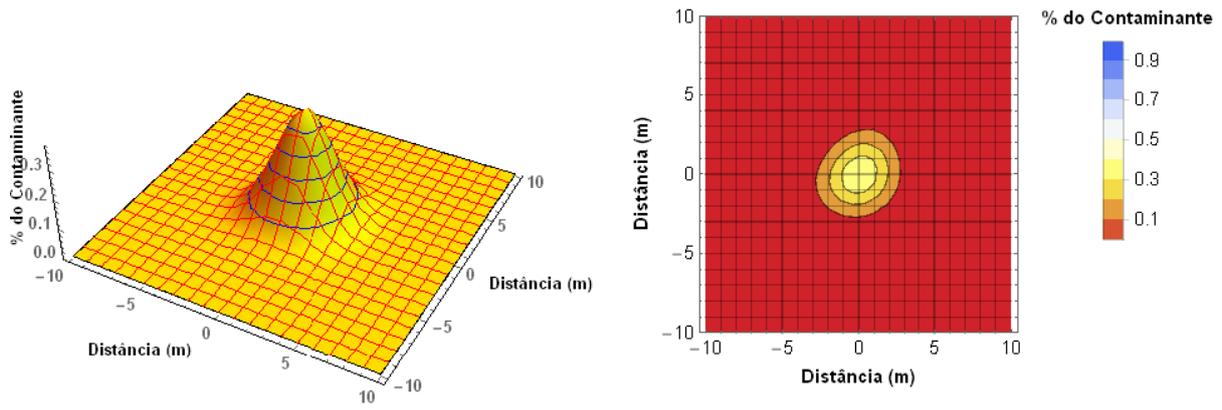


Figura 6.94 – Triângulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 1

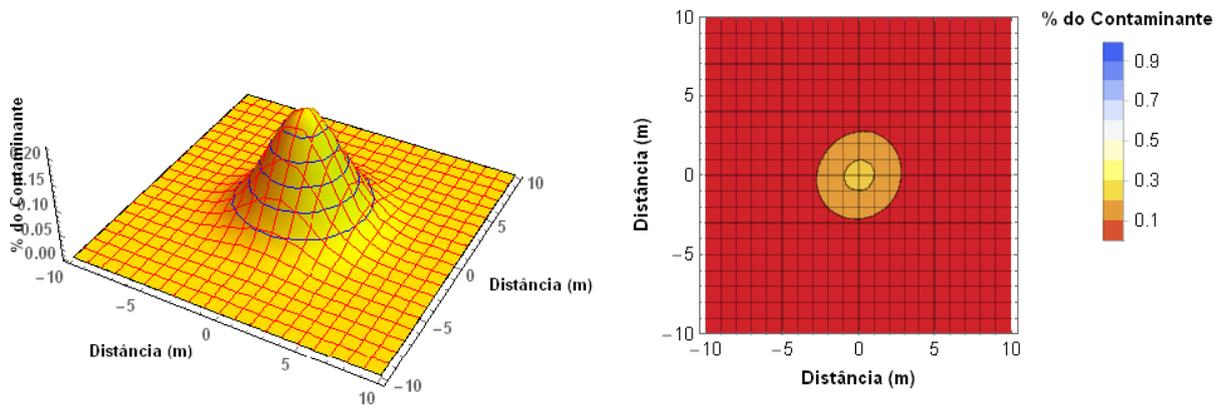


Figura 6.95 – Triângulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 2

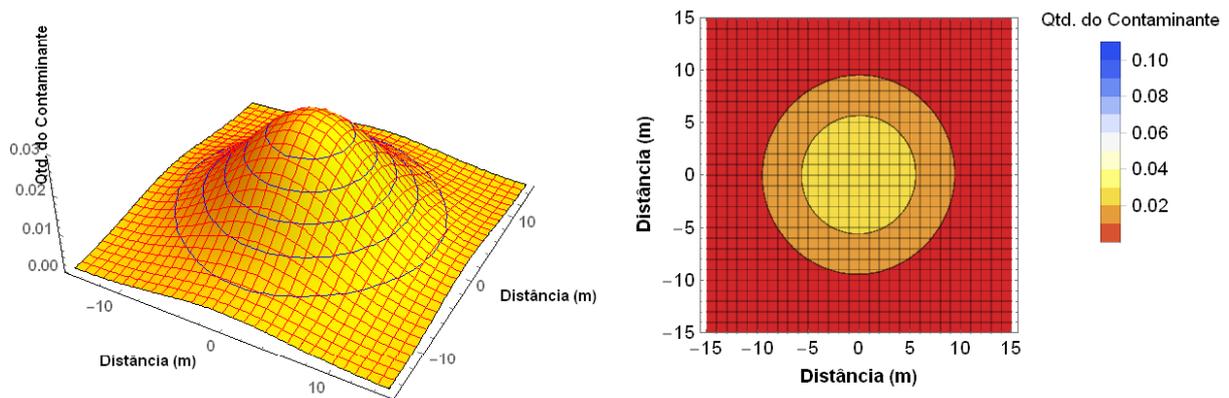


Figura 6.96 – Triângulo retângulo com catetos 3,68 m e tempo 2

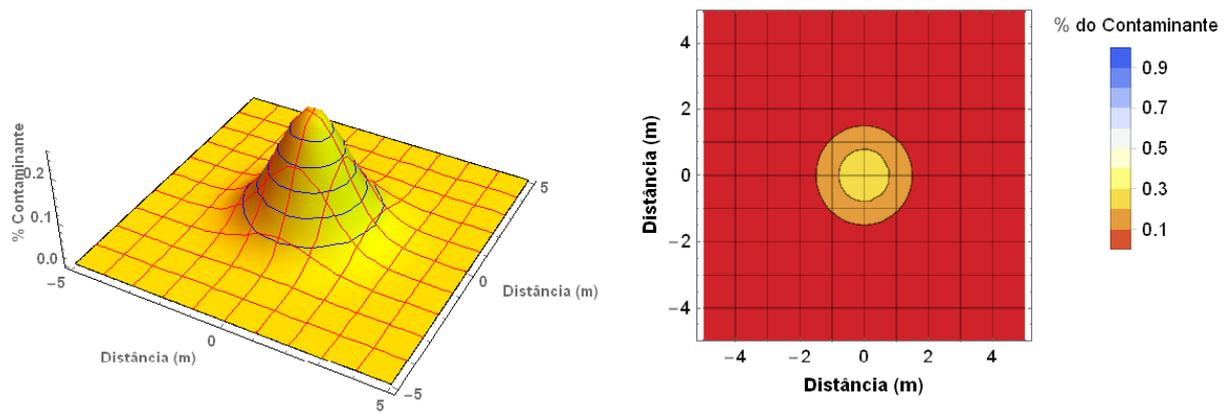


Figura 6.97 – Circular com Raio 0,78m e tempo 0,5

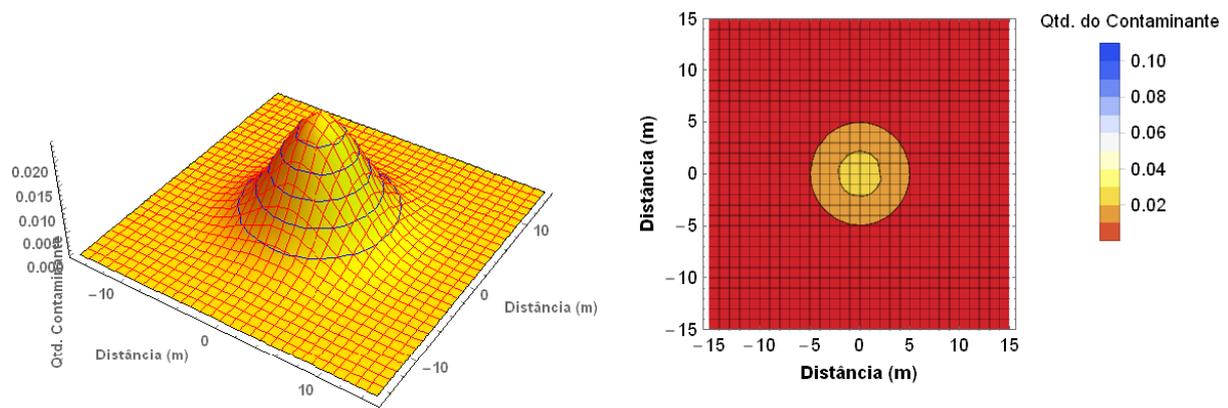


Figura 6.98 – Circular com Raio 0,78m e tempo 7

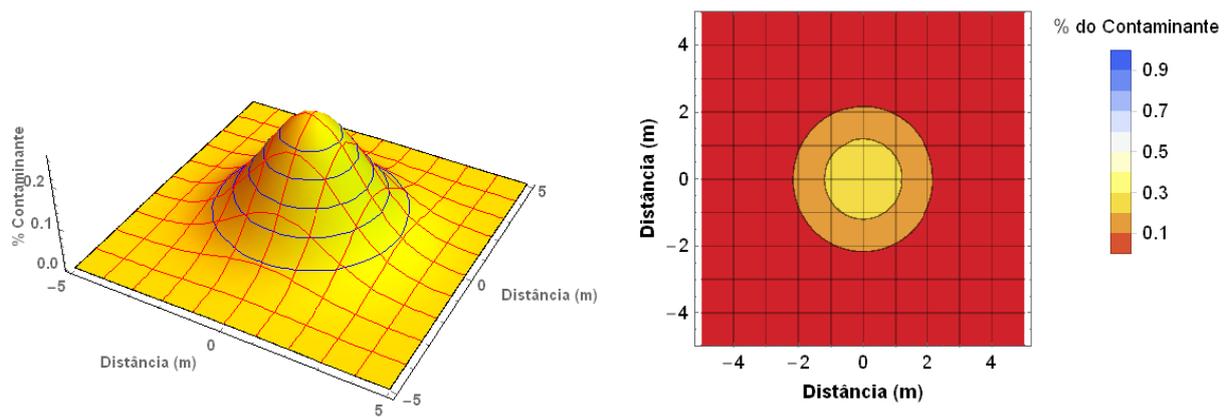


Figura 6.99 – Retangular 2,0 x 2,0 m e tempo 1

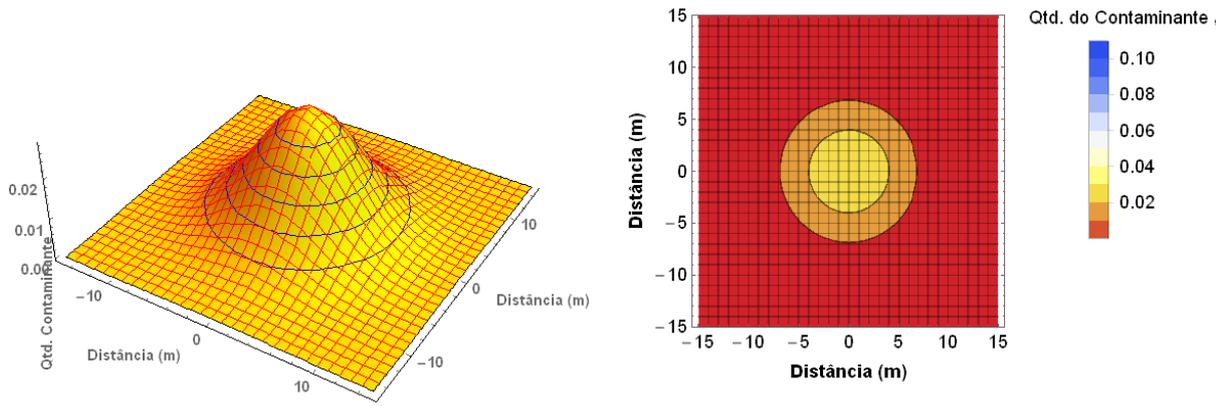


Figura 6.100 – Retangular 2,0 x 2,0 m e tempo 11

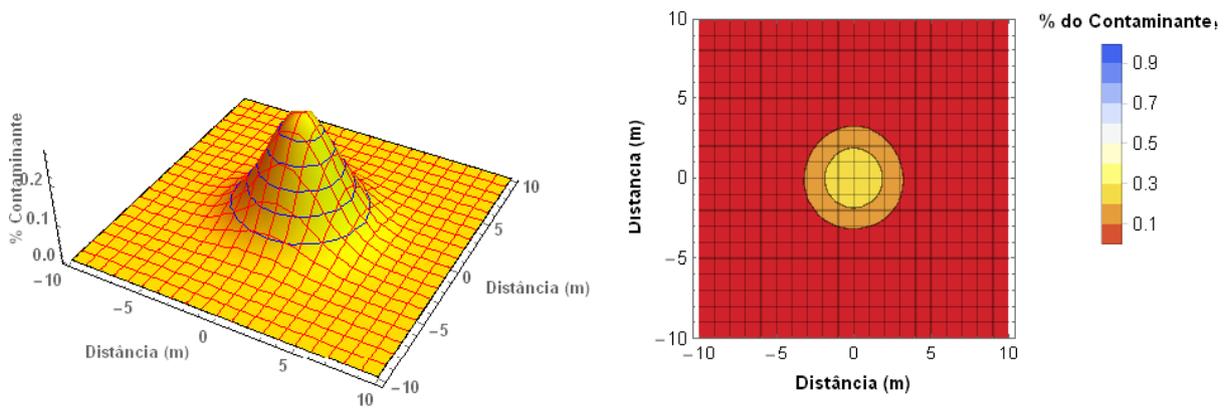


Figura 6.101– Triangular equilátero com lados 4,5 m e tempo 2

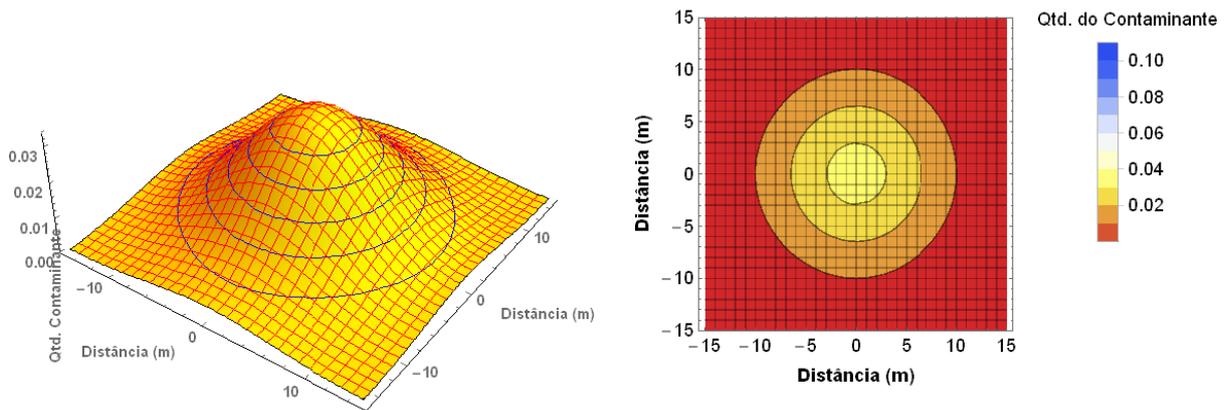


Figura 6.102 – Triangular equilátero com lados 4,5 m e tempo 20

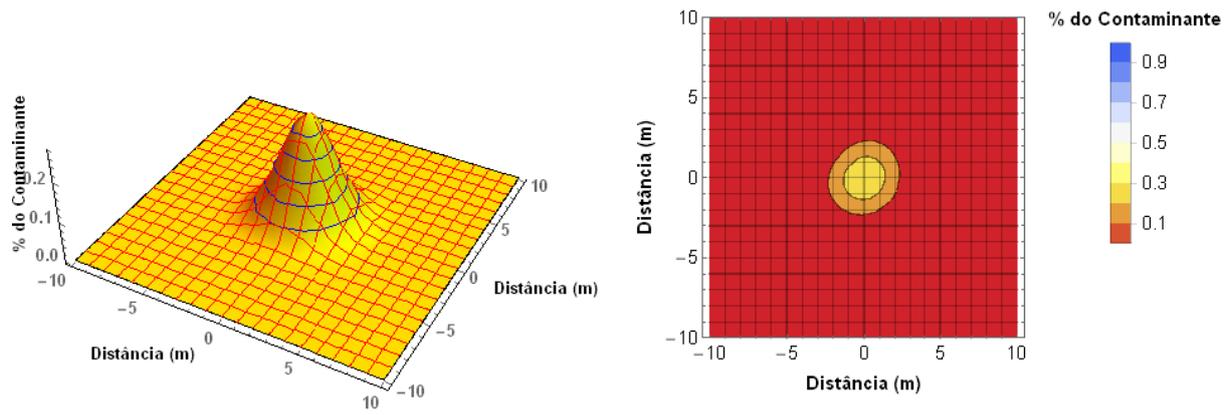


Figura 6.103 – Triângulo retângulo com catetos 3,0 m e tempo 1

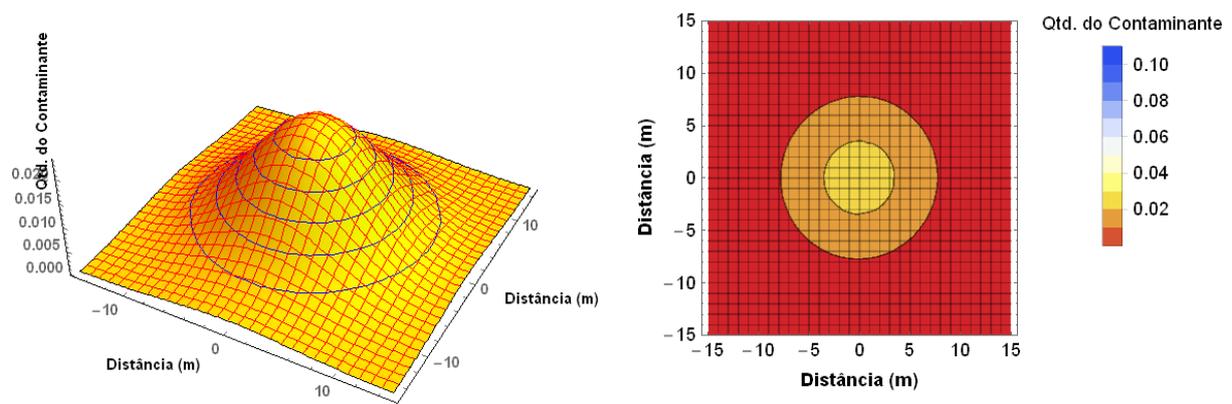


Figura 6.104 – Triângulo retângulo com catetos 3,0 m e tempo 17