

Alexandro Gularte Schäfer

**UM BANCO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL PARA O
MONITORAMENTO E MODELAGEM DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO
CONTEXTO DO PLANEJAMENTO URBANO**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Doutor em Engenharia Civil
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ruth Emília
Nogueira
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Cláudia
Robbi Sluter

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schäfer, Alexandro Gularte

Um banco de dados espaço-temporal para o monitoramento e modelagem do escoamento superficial em bacias hidrográficas no contexto do planejamento urbano [tese] / Alexandro Gularte Schäfer ; orientadora, Ruth Emília Nogueira ; co-orientadora, Cláudia Robbi Sluter. - Florianópolis, SC, 2012.
229 p. ; 21cm

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. SIG. 3. modelagem de dados espaço-temporal. 4. ordenamento territorial. 5. gestão das águas pluviais. I. Nogueira, Ruth Emília. II. Sluter, Cláudia Robbi. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Alexandro Gularte Schäfer

**UM BANCO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL PARA O
MONITORAMENTO E MODELAGEM DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM BACIAS HIDROGRÁFICAS NO
CONTEXTO DO PLANEJAMENTO URBANO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 24 de agosto de 2012.

Prof. Roberto Caldas de Andrade Pinto, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Ruth Emília Nogueira, Dr.^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Lia Caetano Basto, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Dora Maria Orth, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Adriana Marques Rosseto, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Davidson Martins Moreira, Dr.
Universidade Federal da Fronteira Sul

Prof.^a Luciene Stamato Delazari, Dr.^a
Universidade Federal do Paraná

Este trabalho é dedicado às minhas
filhas Júlia, Luíza e Pietra.

AGRADECIMENTOS

À professora Ruth Nogueira, pela orientação, pelo apoio, pela amizade desde a época do mestrado e pelas conversas que foram fundamentais não só para a conclusão da pesquisa, mas também para o meu desenvolvimento pessoal, profissional e intelectual.

À professora Cláudia Robbi Sluter, por ter me apresentado à questão da modelagem espaço-temporal em SIG, e por ter co-orientado este trabalho.

Aos membros da banca, pelas colocações e sugestões que contribuíram para o aperfeiçoamento desta pesquisa.

Ao amigo Cláudio Dias (Claudinho), pela indicação que me possibilitou uma experiência profissional única.

Aos antigos professores e depois colegas da FURG, Waldir Pinto e Cezar Bastos, pelas conversas que me incentivaram a seguir a carreira acadêmica.

À Mari, pela simpatia, competência e constante boa vontade.

À Dorothea, pelo Yoga, pelas conversas e pelo incentivo.

À Rutinéia, por ter me recebido tão bem e pelo auxílio quanto à aplicação do método SCS-CN.

Ao Ronaldo Oliveira, pelo auxílio com algumas figuras presentes na tese.

À Karine Reis Ferreira, pelo auxílio inicial no entendimento de bancos de dados.

À Angélica Nunes, por ceder os mapas de cobertura superficial do terreno e o mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Atuba.

Ao André Mendonça, pelo auxílio inicial com bancos de dados espaciais e com o gvSIG.

Aos profissionais da SUDHERSA, em especial à Jaqueline Souza e à Olga Pollati.

À UNIPAMPA pela licença concedida na fase de conclusão do trabalho.

À minha família, pelo apoio.

À Júlia, Luíza e Pietra, por existirem.

À Larissa, pela compreensão e por ter assumido todos os cuidados com nossa casa, e com nossa filha, no longo período em que eu fiquei absorto no desenvolvimento da pesquisa.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de um banco de dados espaço-temporal (BDET) que permita verificar o impacto das alterações nas características de uma bacia hidrográfica no escoamento superficial direto. O ponto central da pesquisa é o desenvolvimento/adaptação de métodos e técnicas para a incorporação da dimensão temporal em bancos de dados espaciais. Para tanto, foram consideradas as seguintes questões: a) a necessidade de levar em consideração a drenagem, no processo de planejamento do uso e ocupação do solo; b) a necessidade de considerar a bacia hidrográfica como unidade de planejamento territorial e gerenciamento dos recursos hídricos e c) o fato de os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) atuais serem estáticos e apresentarem limitações no que diz respeito à representação e à manipulação da dimensão temporal dos dados, o que restringe sua aplicabilidade em analisar a dinâmica das alterações que ocorrem em uma bacia hidrográfica e a estimativa do seu impacto no escoamento superficial direto. A modelagem conceitual foi realizada utilizando-se as técnicas do modelo entidade-relacionamento (E-R), com base na análise semântica das variáveis envolvidas na verificação das características de uma bacia hidrográfica e na estimativa do escoamento superficial direto. A organização das alterações que ocorrem ao longo do tempo nas características da bacia hidrográfica foi efetuada a partir de uma abordagem com base no tempo. Para a estrutura de armazenamento das entidades espaço-temporais, utiliza-se a abordagem com base em objeto. Foram desenvolvidas as consultas para realizar a recuperação dos dados e para a quantificação das características de bacias hidrográficas. O método do número de curva do National Resources Conservation Service (NRCS), ou método SCS-CN, foi aplicado para estimar o escoamento superficial direto. Uma aplicação piloto foi realizada, para validar o modelo lógico e verificar a integridade do BDET. A área de estudo foi a bacia hidrográfica do rio Atuba, na região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. Esta bacia sofreu um grande processo de urbanização e atualmente é considerada a segunda bacia mais urbanizada da região. A aplicação piloto permitiu constatar que o BDET projetado atende aos requisitos e responde às consultas definidos na pesquisa, consistindo em uma tecnologia capaz de auxiliar na gestão das águas pluviais e no ordenamento territorial.

Palavras-chave: SIG, modelagem de dados espaço-temporal, bacia hidrográfica, ordenamento territorial, gestão das águas pluviais.

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a spatio-temporal database to check the impact of changes in the characteristics of a watershed in runoff. The focus of this research was the development and adaptation of methods and techniques to incorporate the temporal dimension in spatial databases. Thus, we considered the following questions: i) the need to consider the drainage in the process of planning the land use; ii) the need to consider watershed as the unit of planning and management and iii) the fact that Geographic Information Systems (GIS) are currently static and that present limitations regarding the representation and manipulation of the temporal dimension of data, which restricts their applicability to examine the dynamic changes that occur in a watershed and the estimated impact on runoff. The conceptual modeling was performed using the techniques of entity-relationship (ER), based on the semantic analysis of the variables involved in testing the characteristics of a watershed, and on the runoff estimation. The organization of the changes that occur over time in the characteristics of the watershed was made based on a time-based approach. For the storage structure of spatiotemporal entities, we used the object-based approach. Queries were developed to perform alphanumeric, spatial, temporal and spatiotemporal data and to quantify the characteristics of the watersheds. The SCS-CN method was applied to estimate the runoff. A pilot test was conducted to validate the logical model and to verify the integrity of BDET. The study area was the Atuba river watershed in the metropolitan region of Curitiba, Parana. This basin has undergone a major process of urbanization and is currently considered the second most urbanized watershed in the region. The pilot test found that the BDET designed meets the requirements and responds to queries defined in the survey, being a tool to assist in the management of stormwater and land use.

Keywords: GIS, spatio-temporal data modeling, watershed, land management, stormwater management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas temporais.....	39
Figura 2 - Oito possíveis mudanças espaço-temporais de um objeto geográfico.	43
Figura 3 - Retratos sequenciais representando a expansão urbana em uma área rural.....	46
Figura 4 - Composição espaço-temporal de expansão urbana.	47
Figura 5 - Avanço de ocupação urbana representado a partir do modelo Estado Inicial com Emendas.....	48
Figura 6 - Elementos primários e estrutura básica do ESTDM.....	50
Figura 7 - Exemplo de modelo objeto espaço-temporal com átomos espaço-temporais.	51
Figura 8 - Estrutura hierárquica de eventos, processos e estados.....	53
Figura 9 - Representação conceitual do Modelo Temporal com Base em Entidade.....	55
Figura 10 - Aspectos relacionados à gestão integrada de recursos hídricos.....	64
Figura 11 - Alterações no ciclo hidrológico associadas à impermeabilização da superfície.	66
Figura 12 - Características do balanço hídrico quantitativo resultante da transformação de uma área rural para urbana.	67
Figura 13 - Evolução operacional de SIG.	76
Figura 14 - Níveis de acoplamento de SIG e modelos hidráulicos ou hidrológicos	77
Figura 15: Duas possibilidades de integração entre SIG e modelos de simulação ambiental	78
Figura 16: Fluxograma do método de pesquisa	79
Figura 17: A bacia hidrográfica do rio Atuba discretizada em URHs	82
Figura 18: As fases envolvidas no desenvolvimento do Banco de Dados Espaço-Temporal (BDET).....	92
Figura 19: Etapas envolvidas na verificação das características da bacia hidrográfica e na estimativa do escoamento superficial direto. TI é a taxa de impermeabilização.....	101
Figura 20: O processo de verificação das alterações nas características da bacia hidrográfica e de estimativa de seu impacto no escoamento superficial direto.	104
Figura 21: Diagrama da bacia hidrográfica.....	108
Figura 22: Diagrama de eventos.	111
Figura 23: Diagrama de verificação e simulação das características da bacia hidrográfica e estimativa do escoamento superficial direto.	113
Figura 24: Armazenamento de dados espaciais estáticos.....	115
Figura 25: Armazenamento de dados espaço-temporais cujos atributos não variam com o tempo.	116
Figura 26: Armazenamento de dados espaço-temporais.....	117
Figura 27: Diagrama do projeto lógico – bacia hidrográfica	118

Figura 28: Diagrama do projeto lógico – eventos e simulações.	119
Figura 29: Quatro possibilidades de alterações em um objeto ao longo de um determinado período de tempo.	124
Figura 30: Localização da bacia hidrográfica do rio Atuba.	131
Figura 31: Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Atuba/PR-Brasil (adaptado de Nunes, 2007).	133
Figura 32: Mapa de cobertura superficial do terreno da bacia hidrográfica do rio Atuba do ano de 1962 (adaptado de Nunes, 2007).	137
Figura 33: Mapa de cobertura superficial do terreno da bacia hidrográfica do rio Atuba do ano de 2000 (adaptado de Nunes, 2007).	138
Figura 34: Tabela cst_st.	150
Figura 35: Tabela cst_gm.	151
Figura 36: Tabela cst_at.	151
Figura 37: Visão com todas as instâncias da entidade CST, válidas entre 01/01/1962 e 31/12/1999.	152
Figura 38: Janela de configuração dos parâmetros de conexão do gvSIG com o banco de dados.	153
Figura 39: Visualização da consulta referente à cobertura superficial do terreno no gvSIG.	154
Figura 40: Grupos hidrológicos de solos na bacia hidrográfica do rio Atuba e suas respectivas geometrias.	155
Figura 41: Mapa dos grupos hidrológicos de solos na bacia hidrográfica do rio Atuba.	156
Figura 42: Tabelas que armazenam os estados da entidade cst (a) e zona_pd (b).	157
Figura 43: Tabela mud_cst.	158
Figura 44: Tabela mud_zpd.	158
Figura 45: Tabela mud_solos.	158
Figura 46: Mudanças na cobertura superficial do terreno entre 10/10/1980 e 10/10/2005.	158
Figura 47: Tabela evento.	159
Figura 48: Origem e data de ocorrência do evento '1'.	159
Figura 49: Estado anterior e posterior à ocorrência do evento um.	160
Figura 50: Tabela veri_simula.	162
Figura 51: Parâmetros e entidades envolvidos da verificação e simulação 'um'.	162
Figura 52: Taxa de impermeabilização média na bacia hidrográfica.	166
Figura 53: Mapa de alterações na classe 'edificado com muitas sup. livres', entre os cenários de 1962 e de 2000.	169
Figura 54: Mapa de alterações na classe 'campos e áreas verdes', entre os cenários de 1962 e de 2000.	170
Figura 55: Visão com o cálculo das áreas referentes à classe 'edificado com muitas superfícies livres'.	171
Figura 56: Visão com o cálculo das áreas referentes à classe 'campos e áreas verdes'.	171

Figura 57: Mapa da impermeabilização no cenário de 2000 com relação ao cenário de plano diretor.	177
Figura 58: Zonas que apresentam, no cenário de 2000, taxa de impermeabilização superior a 90% da prevista no cenário de plano diretor.	178
Figura 59: CN ponderado na bacia hidrográfica do Rio Atuba.	182
Figura 60: Mapa da distribuição espacial do escoamento superficial direto no cenário de 1962.	184
Figura 61: Mapa da distribuição espacial do escoamento superficial direto no cenário de 2000.	185
Figura 62: Mapa de alterações no escoamento superficial direto entre os cenários de 1962 e de 2000.	189
Figura 63: Evolução do volume de escoamento superficial (VES) nas áreas referentes a cada município.	190
Figura 64: Mapa do escoamento superficial direto do cenário de 2000, com relação ao cenário de plano diretor.	197
Figura 65: As cinco zonas de uso e ocupação do solo que apresentaram o maior aumento no VES entre os cenários de 1962 e de 2000.	198
Figura 66: Área total ocupada na bacia, por tipo de cobertura superficial do terreno.	199
Figura 67: Volume de escoamento superficial, por tipo de cobertura superficial do terreno.	200
Figura 68: Relação entre o aumento na impermeabilização e o aumento no volume de escoamento superficial, por grupo hidrológico de solos.	202
Figura 69: Relação entre o aumento da impermeabilização e o aumento no volume de escoamento superficial, por município.	203

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos SGBDs segundo a dimensão temporal.	41
Quadro 2 - Tipos de dados para aplicações espaço-temporais.	44
Quadro 3 - Principais funções de um SIG temporal.	45
Quadro 4: Armazenamento de dados sem representação espacial.	115
Quadro 5: Operações utilizadas na verificação das características da bacia hidrográfica e na estimativa do escoamento superficial direto.	123
Quadro 6: Consultas temporais.	125
Quadro 7: Operações envolvidas na verificação das mudanças em um objeto.	126
Quadro 8: <i>Script</i> para verificação da validade e correção de geometrias.	139
Quadro 9: Classes de cobertura superficial do terreno e porcentagem de impermeabilização. Fonte: Adaptado de NUNES (2007).	140
Quadro 10: Classes de solos existentes na bacia hidrográfica do rio Atuba e classificação quanto ao grupo hidrológico.	141
Quadro 11: Zonas de uso e ocupação do solo presentes na bacia hidrográfica do rio Atuba.	143
Quadro 12: <i>Script</i> das consultas para a quantificação das alterações na cobertura superficial do terreno entre 1962 e 2000.	164
Quadro 13: <i>Script</i> das consultas para a determinação das alterações na classe 'edificado com muitas superfícies livres' entre os cenários de 1962 e de 2000.	167
Quadro 14: <i>Script</i> das consultas para o cálculo da taxa de impermeabilização média em cada zona de uso e ocupação do solo.	173
Quadro 15: Taxa de impermeabilização média (TI) em cada zona de uso e ocupação do solo e situação da impermeabilização nos cenários de 1962 e 2000, com relação ao cenário de plano diretor (TI "cenário"/TI PD).	174
Quadro 16: <i>Script</i> das consultas para o cálculo do CN ponderado para a bacia hidrográfica.	179
Quadro 17: <i>Script</i> das consultas para o cálculo do escoamento superficial direto nos cenários de 1962 e de 2000.	182
Quadro 18: <i>Script</i> das consultas para os cálculos de volume de escoamento superficial direto.	186
Quadro 19: Classificação das áreas com relação às alterações no escoamento superficial direto entre os cenários de 1962 e 2000.	188
Quadro 20: <i>Script</i> da consulta para a verificação das alterações no escoamento superficial direto entre os cenários de 1962 e 2000.	188
Quadro 21: Volume de Escoamento Superficial (VES) por zona de uso e ocupação do solo.	194
Quadro 22: Alterações na urbanização, na impermeabilização e no volume de escoamento superficial entre os cenários de 1962 e de 2000.	204

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do rio Atuba.....	130
Tabela 2: Valores de CN para $\lambda=0,20$	147
Tabela 3: Valores de CN para $\lambda=0,05$	148
Tabela 4: Quantificação das classes de cobertura superficial do terreno nos cenários de 1962 e de 2000.....	165
Tabela 5: Evolução da taxa de impermeabilização (TI) nas áreas pertencentes a cada município.....	172
Tabela 6: Relação entre o aumento da taxa de urbanização (TU) e o aumento da taxa de impermeabilização (TI).	172
Tabela 7: Variação no volume de escoamento superficial (VES) acumulado na bacia hidrográfica entre os cenários considerados.	187
Tabela 8: Alteração no volume de escoamento superficial (VES).....	191
Tabela 9: Volume de escoamento superficial nos cenários de 1962 e de 2000 com relação ao cenário de pré-desenvolvimento.	192
Tabela 10: Volume de escoamento superficial nos cenários de 1962 e de 2000 com relação ao cenário de plano diretor.	192
Tabela 11: Quantificação do aumento e da redução do VES entre os cenários de 1962 e 2000.	193
Tabela 12: Impermeabilização (TI) e volume de escoamento superficial (VES) de acordo com o grupo hidrológico de solos (GHS), nos locais onde houve aumento no escoamento superficial direto, entre os cenários de 1962 e de 2000.	201

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMC	Antecedent Moisture Condition
ANA	Agência Nacional de Águas
ARC	Antecedent Runoff Condition
BTE	Bitemporal Elements
CAD	Computer Aided Design
CN	Curve Number (Número de Curva ou Curva Número)
COMEC	Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba
CST	Cobertura Superficial do Terreno
DDL	Data Definition Language
DEP	Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre
DML	Data Manipulation Language
EPA	United States Environmental Protection Agency
ESTDM	Event-based Spatio-Temporal Data Model
FBTM	Feature-Based Temporal Model
GEM	Geospatial Event Model
GHS	Grupo Hidrológico de Solos
GNSS	Global Navigation Satellite System
HST-DMS	Hybrid Spatio-Temporal Data Model and Structure
IAP	Instituto das Águas do Paraná
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ISO	International Standard Organization
MDET	Modelo de Dados Espaço-Temporal
NBR	Norma Brasileira
NRCS	Natural Resources Conservation Service
OOGEMORPH	Object-Oriented Geomorphology Data model
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
RMC	Região Metropolitana de Curitiba
SAD 69	South America Datum 1969
SAIF	Spatial Archive and Interchange Format
SCS	Soil Conservation Service
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SGBD-OO	Sistema Gerenciador de Banco de Dados Orientados-a-Objeto
SGBD-OR	Sistema Gerenciador de Banco de Dados Relacional
SGBD-R	Sistema Gerenciador de Banco de Dados

	Relacional
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SQL	Structured Query Language
STC	Space-Time Composite
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
TI	Taxa de Impermeabilização
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
USDA	United States Department of Agriculture
UTM	Sistema de projeção universal transversal de mercator
VES	Volume de Escoamento Superficial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 JUSTIFICATIVA.....	28
1.2 OBJETIVOS	32
1.2.1 Objetivo geral.....	32
1.2.2 Objetivos específicos.....	32
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	32
2 REVISÃO DE LITERATURA	35
2.1 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) COM CARACTERÍSTICAS TEMPORAIS	35
2.1.1 Representação de Dados em Sistemas de Informações Geográficas	35
2.1.2 A dimensão temporal em Sistemas de Informações Geográficas	38
2.1.3 Estágios no desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas Temporais	41
2.1.4 Semântica dos dados espaço-temporais.....	42
2.1.5 Funções de aplicações de um Sistema de Informações Geográficas com características temporais	44
2.1.6 Modelos para representação de dados espaço-temporais em Sistemas Informações Geográficas	45
2.1.6.1 Modelo Retratos Sequenciais	46
2.1.6.2 Modelo Composição Espaço-Temporal	47
2.1.6.3 Modelo Estado Inicial com Emendas	48
2.1.6.4 Abordagem com Base em Eventos ou no Tempo.....	49
2.1.6.4.1 Modelo de Dados Espaço-Temporal com Base em Eventos	49
2.1.6.5 Abordagem com Base em Objeto, Entidade, Identidade, Processo ou Atividade.....	50
2.1.6.5.1 Modelo Objeto Espaço-Temporal	51

2.1.6.5.2 Modelo de três domínios proposto por Yuan	52
2.1.6.6 Modelo Temporal com Base em Entidade	54
2.1.6.7 Abordagem combinada/integrada	55
2.1.6.8 Abordagem Orientada a Evento	56
2.1.6.9 Considerações finais acerca dos modelos de dados espaço-temporais	56
2.1.7 Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados (SGBD).....	57
2.1.8 Modelo Entidade-Relacionamento (E-R).....	60
2.2 GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS	62
2.2.1 Sistema sustentável de drenagem urbana	62
2.2.2 Gestão integrada das águas urbanas	63
2.2.3 Impacto do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico	65
2.2.4 Modelagem do Impacto das alterações em bacias hidrográficas no escoamento superficial direto.....	68
2.2.4.1 Método do número de curva do antigo serviço de conservação dos solos dos Estados Unidos (método SCS-CN)	68
2.2.4.1.1 Coeficiente de abstração inicial	70
2.2.4.1.2 Classificação hidrológica dos solos	71
2.2.4.1.3 Condições de escoamento antecedentes à aplicação do método SCS-CN.....	73
2.2.4.1.4 Observações finais acerca do método SCS-CN	73
2.3 INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E MODELOS DE SIMULAÇÃO AMBIENTAL..	74
3 MÉTODO	79
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	80
3.1.1 Indicadores das características da bacia hidrográfica e do escoamento superficial direto em um cenário	80
3.1.2 Variação espaço-temporal das características de uma bacia hidrográfica e seus impactos no escoamento superficial	87
3.2 DESENVOLVIMENTO DO BANCO DE DADOS	91

3.2.1 Levantamento e análise dos requisitos	93
3.2.2 Modelagem conceitual	93
3.2.3 Escolha do SBGD.....	93
3.2.4 Projeto lógico	94
3.2.5 Projeto físico	95
3.2.6 Desenvolvimento das consultas.....	96
3.2.7 Implementação do banco de dados – projeto piloto	96
4 DESENVOLVIMENTO DO BANCO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL	99
4.1 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS	99
4.2 MODELAGEM CONCEITUAL	100
4.3 PROJETO LÓGICO.....	114
4.4 PROJETO FÍSICO	121
4.5 DESENVOLVIMENTO DAS CONSULTAS	122
5 PROJETO PILOTO.....	129
5.1 ÁREA DE ESTUDO	129
5.1.1 Parâmetros morfométricos	130
5.1.2 Clima e precipitação.....	130
5.1.3 Solos.....	132
5.1.4 Documentos, dados e produtos cartográficos.....	134
5.2 CENÁRIOS DE ANÁLISE.....	136
5.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	139
5.3.1 Cobertura superficial do terreno.....	140
5.3.2 Municípios e zonas de uso e ocupação do solo	142
5.3.3 Número de curva (CN).....	147
5.3.4 Inserção dos dados no BDET	148

5.4 REALIZAÇÃO DE TESTES E VERIFICAÇÃO DAS FUNCIONALIDADES DO BANCO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL.....	149
5.4.1 Aspectos gerais do Banco de Dados Espaço-Temporal (BDET) 149	
5.4.1.1 Recuperação de dados.....	149
5.4.1.2 Estados e mudanças das entidades.....	157
5.4.1.3 Eventos.....	159
5.4.1.4 Verificações e simulações.....	160
5.4.2 Simulação de análise das características da bacia hidrográfica do rio Atuba/Pr-Brasil e estimativas do escoamento superficial direto	163
5.4.2.1 Verificação das características da bacia hidrográfica.....	163
5.4.2.1.1 Verificação das características da bacia hidrográfica em cada município e zona de uso e ocupação do solo no interior da bacia do Atuba.....	171
5.4.2.2 Estimativa do escoamento superficial direto na bacia hidrográfica.....	179
5.4.2.2.1 Estimativa do escoamento superficial direto em cada município e zona de uso e ocupação do solo no interior da bacia do Atuba.....	190
5.4.2.3 Relação entre as alterações na cobertura superficial do terreno e as alterações no escoamento superficial direto.....	199
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	207
6.1 QUANTO AO DESENVOLVIMENTO DO BDET.....	207
6.1.1 Quanto à integração do SIG a um modelo de simulação.....	208
6.1.2 Com relação aos softwares utilizados.....	208
6.2 SOBRE A APLICAÇÃO À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ATUBA/PR-BRASIL.....	209
6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	211
REFERÊNCIAS.....	213

1 INTRODUÇÃO

A explosão populacional e o crescimento urbano acelerado das últimas décadas vêm causando um profundo impacto ambiental e socioeconômico. As mudanças na cobertura superficial do terreno relacionadas à ocupação humana, que variam espacialmente e ocorrem em diferentes níveis de intensidade ao longo do tempo, afetam vários componentes do ciclo hidrológico, direta ou indiretamente. A urbanização em uma bacia hidrográfica leva ao aumento da área de superfície impermeável e à diminuição da capacidade de infiltração. Os principais impactos decorrentes da impermeabilização sobre o sistema de drenagem são a ampliação do pico de vazão de cheias, a antecipação no tempo de resposta dessa vazão máxima e o aumento do volume de escoamento superficial, o que pode levar ao aumento na incidência de inundações e à poluição dos recursos hídricos.

Para controlar ou minimizar os impactos sobre os recursos hídricos gerados por este processo, faz-se necessária a articulação de sua gestão com a gestão territorial. Essa articulação deve ocorrer dentro de um sistema de gerenciamento integrado, em nível de bacia hidrográfica, que se configura como uma unidade física de gestão e desenvolvimento econômico e social e se estende além das barreiras políticas – municipal, estadual ou federal - convencionais.

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma tecnologia capaz de auxiliar nesta articulação entre a gestão dos recursos hídricos e a gestão territorial. Nesse sentido, uma importante questão é a inclusão da dimensão “tempo” em sua estrutura. Incorporar o tempo em SIG é um desafio que tem sido pesquisado há mais de duas décadas e que apresenta diversas propostas de solução, a maior parte delas desenvolvida para aplicações específicas, focando em algum aspecto particular dos dados espaço-temporais. Nenhuma solução proposta até o momento abrange todos os aspectos possíveis da representação espaço-temporal em SIG, o que continua a ser um desafio.

Desta maneira, existe a demanda pelo desenvolvimento de tecnologias voltadas à tomada de decisão em questões relacionadas à gestão das águas pluviais e ao ordenamento territorial, capazes de lidar com a espacialidade e temporalidade dos dados.

1.1 JUSTIFICATIVA

Um planejamento do uso e ocupação do solo que busque minimizar os impactos resultantes das alterações da cobertura superficial do terreno sobre a capacidade de suporte de drenagem em uma bacia hidrográfica requer a verificação das alterações na cobertura superficial do terreno e o entendimento dos impactos de suas alterações na resposta hidrológica da bacia hidrográfica. A verificação de quais foram as mudanças, onde ocorreram e que impactos causaram possibilita a formulação de medidas de mitigação e estratégias de reabilitação (SANTILLAN et al., 2010).

O monitoramento é uma técnica-chave no processo de planejamento, pois envolve a observação regular de propriedades das entidades ao longo do tempo, permitindo que o histórico da dinâmica espacial de uma bacia hidrográfica seja registrado. O objetivo primordial do monitoramento é não apenas identificar e entender, mas também possibilitar que os processos e mudanças em curso possam ser regulados e/ou controlados.

A falta de dados fluviométricos consistentes e representativos é um dos maiores problemas enfrentados durante a análise e avaliação do regime hidrológico de bacias hidrográficas brasileiras na atualidade (NUNES; FIORI, 2007). Nesse sentido, os modelos hidrológicos chuva-escoamento podem ser utilizados para estimar o escoamento superficial direto e auxiliar no entendimento e na realização de prognósticos dos principais impactos advindos do processo de urbanização.

Dado o caráter espacial dos dados envolvidos, tanto nas atividades relacionadas ao planejamento do uso e ocupação do solo quanto nas atividades relacionadas aos estudos dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica, os sistemas de informações geográficas (SIG) tornaram-se uma parte integral nessas atividades. A tecnologia SIG oferece um ambiente virtual no qual profissionais envolvidos no processo de tomada de decisão podem monitorar as mudanças que ocorrem em um local e avaliar estratégias de gestão.

A utilização conjunta de SIG e de modelos de simulação vem sendo largamente adotada em atividades de gestão e no processo de tomada de decisão, em questões relacionadas aos recursos naturais (BRIMICOMBE, 2010). Segundo Ebrahimian et al. (2009), a utilização de SIG com modelos hidrológicos facilita as estimativas do escoamento superficial e pode aumentar a exatidão dos resultados do processo de modelagem. Inúmeras pesquisas vêm fazendo uso da tecnologia SIG e dos modelos hidrológicos para avaliar os impactos das alterações que

ocorrem na cobertura superficial do terreno na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica, como Bosch et al. (2003), Liu e Li (2008), Miller et al. (2002), Ray et al. (2010) e Wang et al. (2006).

Diversas ferramentas desenvolvidas nos últimos anos têm permitido a integração das funcionalidades presentes nos SIG no processo de modelagem hidrológica, como o SWAT, o BASINS, o *Systeme Hydrologique European* (SHE), o *Modular Modeling System – Precipitation Runoff Modeling System* (MMS/PRMS), o *U.S. Federal Emergency Management Agency* (USFEMA Hazards U.S. – Multihazard (HAZUS-MH) e a série de sistemas para modelagem de bacias hidrográficas, águas subterrâneas e escoamento superficial do Departamento de Defesa dos EUA – WMS, GMS e SMS respectivamente. Entretanto, elas apresentam dificuldades em lidar com uma importante questão, inerente às atividades de planejamento e gestão tanto do uso e ocupação do solo quanto dos recursos hídricos: o aspecto temporal dos dados. Isso se deve, em parte, ao fato de que a maioria dos SIGs atuais são estáticos e não gerenciam adequadamente, segundo Camossi et al. (2006), aplicações que envolvam o aspecto temporal dos dados.

Como argumenta Peuquet (2002), embora os SIG constituam uma tecnologia desenvolvida para abordar problemas que envolvam o aspecto temporal dos dados, a questão de como representar a dinâmica espaço-temporal nesses sistemas foi ignorada até o final dos anos 1980. Segundo Yuan (2010), a incorporação da componente temporal em uma representação espacial não é uma tarefa trivial, pois tempo e espaço possuem propriedades distintas. Embora tenha ocorrido um grande progresso no desenvolvimento de modelos de dados para SIG, a criação de um SIG verdadeiramente espaço-temporal permanece como um desafio ainda não alcançado. De acordo com Couclelis (2005), a complexidade da gerência, da manutenção e da operação dos aspectos espaço-temporais gera, atualmente, forte demanda de pesquisa nessa área, já que muitas questões desafiadoras ainda permanecem sem resolução.

Segundo Martin et al. (2005), a exclusão da dimensão temporal na estrutura de dados de um SIG limita sua interatividade com os modelos (hidráulicos ou hidrológicos), interferindo na habilidade do usuário em modelar a variabilidade espacial do local em estudo.

Nesse contexto, verifica-se: a) que existe a necessidade de considerar-se a questão do escoamento superficial no processo de planejamento do uso e ocupação do solo; e b) que a utilização conjunta de SIG e modelos hidrológicos constitui um ferramental que possibilita

não só o monitoramento das características de uma bacia hidrográfica, mas também a quantificação das alterações ocorridas e de seu impacto em termos de escoamento superficial. Entretanto, o fato de os SIG atuais serem estáticos e apresentarem limitações no que diz respeito à representação e à manipulação da dimensão temporal dos dados restringe sua aplicabilidade nessas atividades.

Esses problemas são atuais e relevantes no que diz respeito tanto ao planejamento e gestão do uso e ocupação do solo quanto à área de sistemas de informações geográficas. A partir desse entendimento, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, mais especificamente um banco de dados espaço-temporal (BDET), que contemple alternativas para os dois problemas apresentados e que contribua no sentido de estabelecer a bacia hidrográfica como a unidade territorial de gestão, como preconiza a Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, do governo brasileiro.

O BDET pode proporcionar meios para armazenar, processar, gerenciar e analisar os dados espaciais, temporais, espaço-temporais e alfanuméricos, além de tornar possível o registro das alterações que ocorrem ao longo do tempo. Além disso, possibilita a consideração de cenários passados, presente e futuros do ambiente modelado no sistema. A integração do modelo hidrológico ao BDET possibilita a realização de estimativas do escoamento superficial direto e de análises quanto a sua distribuição espacial, em uma bacia hidrográfica, para determinado cenário. A partir da utilização do BDET e do modelo hidrológico, é possível extrair as informações válidas para determinado local em determinado cenário, verificar as alterações que ocorreram entre dois cenários e relacioná-las às alterações no escoamento superficial causadas pelas alterações que ocorreram na bacia entre os dois cenários.

Para fins de planejamento e gestão territorial no contexto do gerenciamento integrado de bacias hidrográficas, é interessante que seja possível verificar as condições de cobertura superficial do terreno, a taxa de impermeabilização e as condições de escoamento superficial não só no contexto da bacia hidrográfica como também para determinada sub-bacia, município ou zona de uso e ocupação do solo. Dessa maneira, é possível realizar comparações entre as sub-bacias ou áreas referentes a municípios ou zonas de um Plano Diretor de Uso e Ocupação do Solo, para determinar, por exemplo, quem apresentou a maior taxa de urbanização, quem apresentou a maior taxa de impermeabilização e quem foi o responsável pelos maiores volumes de escoamento superficial direto, em determinado cenário.

Para possibilitar a realização das estimativas do escoamento superficial direto, o método do número de curva do *Natural Resource Conservation Service* (NRCS), também conhecido como método SCS-CN, foi incorporado ao BDET. Esse método possibilita a realização de estimativas das quantidades de escoamento superficial produzido em uma bacia hidrográfica em determinado evento de precipitação. De acordo com Karamouz et al. (2010), o método SCS-CN (*Soil Conservation Service – Curve Number*) pode ser considerado um modelo de perda combinado, ou seja, todas as abstrações (incluindo interceptação, armazenamento em depressões, evaporação e infiltração) são levadas em consideração nos cálculos do escoamento superficial direto.

O método SCS-CN é amplamente aceito e vem sendo continuamente utilizado há mais de 50 anos (AMUTHA; PORCHELVAN, 2009; PANDIT; HECK, 2009; PONCE; HAWKINS, 1996; ZHAN et al., 2005). De acordo com Chow et al. (1988), o método pode ser aplicado para determinar o incremento na quantidade de escoamento superficial direto originado pela urbanização em uma bacia hidrográfica. Exemplos de aplicação do método SCS-CN para a modelagem do impacto da urbanização no escoamento superficial direto ou nos processos hidrológicos em bacias hidrográficas podem ser encontrados em Bosch et al. (2003), Santillan et al. (2010), Sundaram et al. (2011) e Wehmeyer e Weirich (2010). Todos esses trabalhos fazem uso de SIG para apoiar o processo de modelagem do escoamento superficial das águas pluviais.

Hawkins et al. (2009) argumentam que, apesar do uso generalizado do método SCS-CN em atividades de engenharia relacionadas ao planejamento e execução de estudos e projetos (com forte referência à hidrologia urbana), existem consideráveis oportunidades, não utilizadas, de aplicação do método SCS-CN no processo de tomada de decisão, relacionada à questão da gestão do uso do solo. Seu potencial para avaliar alternativas relacionadas ao uso do solo – e seus custos e benefícios tanto no local em estudo quanto a jusante – é amplamente desvalorizado e não utilizado pela comunidade profissional envolvida na gestão territorial.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um Banco de Dados Espaço-Temporal (BDET) que possibilite monitorar as características de bacias hidrográficas (cobertura superficial do terreno, solos e impermeabilização) e simular o impacto de suas alterações em termos de escoamento superficial direto.

1.2.2 Objetivos específicos

- verificar se algum dos principais modelos de dados espaço-temporais existentes podem ser utilizados no desenvolvimento do BDET proposto;
- definir uma metodologia para a verificação do impacto das alterações das características da bacia hidrográfica no escoamento superficial direto;
- realizar uma aplicação piloto, na bacia hidrográfica do rio Atuba/PR-Brasil, executando:
 - o monitoramento das características da bacia hidrográfica ao longo de cenários de desenvolvimento;
 - a estimativa das consequências das alterações dessas características na impermeabilização e no escoamento superficial direto;
 - a estimativa da impermeabilização e do escoamento superficial direto em determinado cenário, com relação às situações de referência.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese de doutorado está organizada em seis capítulos. O primeiro apresenta uma introdução às principais questões envolvidas na proposição da pesquisa, a justificativa para o seu desenvolvimento e os objetivos a serem alcançados.

No segundo capítulo é apresentada a revisão de literatura, em que se discutem questões relacionadas à inclusão da variável “tempo” em sistemas de informação geográfica e em bancos de dados. Em seguida, aborda-se a questão das alterações causadas pela urbanização no

escoamento superficial e apresenta-se o método SCS-CN. Por fim, discute-se a questão da integração de modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica.

A partir da revisão de literatura, apresenta-se, no terceiro capítulo, a contextualização do problema de monitoramento das características da bacia hidrográfica e do escoamento superficial direto e da verificação do impacto das alterações da bacia no escoamento superficial. Apresenta-se também a metodologia para o desenvolvimento do banco de dados espaço-temporal e para a realização do projeto piloto.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados da modelagem do banco de dados espaço-temporal. No quinto capítulo apresentam-se os resultados do projeto piloto.

Por fim, no sexto capítulo, apresentam-se as conclusões do desenvolvimento da pesquisa proposta e as recomendações para trabalhos futuros. Finaliza-se o documento com as referências bibliográficas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) COM CARACTERÍSTICAS TEMPORAIS

2.1.1 Representação de Dados em Sistemas de Informações Geográficas

De acordo com Yuan et al. (2004), a representação geográfica constitui um elemento central no desenvolvimento de um SIG. Ela é uma maneira de comunicar a informação geográfica e é também uma estrutura binária em um meio computacional ou de armazenamento eletrônico que corresponde a um objeto, medida ou fenômeno do mundo. A representação em SIG inclui três aspectos das entidades do mundo real: sua localização na superfície da terra, seus atributos e qualquer relacionamento importante entre entidades (GOODCHILD, 2008). Como a representação proporciona fundamentos conceituais e computacionais para processar, integrar, analisar e visualizar dados geográficos, a representação escolhida para um fenômeno geográfico tem um profundo impacto em sua interpretação e análise (YUAN, 2010).

Os sistemas de informação geográfica são influenciados pelas representações em três níveis distintos: o nível de modelo de dados, o nível de formalização e o nível de visualização. O modelo de dados é o cerne conceitual de um sistema de informação, pois define as entidades, os relacionamentos, as operações e as regras para manter a integridade do banco de dados (CODD, 1990).

Peuquet (1984) define modelo de dados como uma descrição geral de conjuntos específicos de entidades e das relações entre estes conjuntos de entidades. Segundo o autor, a característica mais básica de um modelo de dados é que ele é uma abstração da realidade. Como os SIGs não são capazes de processar a informação que está além das capacidades de representação de seus modelos de dados, a representação geográfica e os modelos de dados são críticos para melhorar o processamento de consultas e as análises da informação geográfica (WORBOYS et al., 1990).

Nas quatro últimas décadas, testemunhou-se uma massiva proliferação de modelos de representação de dados voltados para SIG, estruturas de dados e discussões envolvendo representação e ontologia geográfica. A matriz geográfica de Berry (BERRY, 1964) e o esquema

tridimensional de Sinton (SINTON, 1978) proporcionaram antigos modelos do mundo geográfico, como representações vetoriais e matriciais. Nos anos 1970, as estruturas de dados topológicas foram extensivamente discutidas; nos anos 1980, verificou-se que o modelo relacional oferecia uma maneira simples de implementar estruturas topológicas em SIGs comerciais (WORBOYS, 1995). Nos anos 1990, o modelo orientado a objeto foi amplamente adotado, embora frequentemente utilizando tecnologia de banco de dados relacional. Recentemente, esforços são realizados no sentido de estender estes modelos para incluir a dimensão temporal (GOODCHILD et al., 2007). Nesse processo de desenvolvimento dos SIGs, a distinção entre os conceitos de objeto e campo recebe considerável atenção.

Couclelis (2005) argumenta que a distinção entre a representação com base em campo e a com base em objeto foi fundamental para o entendimento do mundo em nossa volta, e fortemente relacionado à percepção humana. Segundo Goodchild et al. (2007), os conceitos de objeto discreto e campo contínuo, que foram introduzidos no final dos anos 1980 e início dos anos 1990, têm dominado o pensamento sobre a concepção humana do espaço geográfico.

Na visão de campo, a realidade é modelada por variáveis que possuem uma distribuição contínua no espaço. Toda posição no espaço geográfico pode ser caracterizada através de um conjunto de atributos medidos para um conjunto de coordenadas geográficas. Na prática, a variação contínua dos atributos é percebida como um conjunto de elementos discretos. O conceito de modelo baseado em campo origina-se da física clássica e tem sido usado para modelagem de propriedades físicas (e não-físicas), onde a magnitude é dependente de sua localização espacial (KJENSTAD, 2006).

Na visão de objeto, a realidade consiste de entidades individuais, bem definidas e identificáveis. Cada entidade tem suas propriedades e ocupa um determinado lugar no espaço. A realidade é modelada como um grande espaço onde entidades estão distribuídas sem que, necessariamente, todas as posições do espaço estejam ocupadas. Duas ou mais entidades podem estar situadas sobre uma mesma posição geográfica. O modelo baseado em objeto tem sido usado como um meio de estruturação conceitual da informação geográfica, em particular na modelagem de objetos do mundo real (ou entidades) com localização e extensão espacial precisas (KJENSTAD, 2006).

Outros conceitos são os de objeto campo e de campo de objetos. Yuan (1999) define objeto campo como um objeto com heterogeneidade interna semelhante a um campo. Cova e Goodchild (2002) apresentam o

conceito de campo de objetos, no qual cada ponto no mapa não é um valor, mas sim um objeto.

Goodchild et al. (2007) introduzem os conceitos de geo-átomo e mostram que ele pode proporcionar a base tanto para a concepção de objeto discreto quanto de campo contínuo. Como os campos e objetos são os únicos elementos disponíveis na teoria proposta, pode-se inferir que objetos discretos e campos contínuos são, de fato, as únicas bases possíveis para a concepção do mundo geográfico. A teoria é limitada pelo seu foco na concepção baseada em conjuntos de pontos, e assim, na agregação de geo-átomos em geo-campos e em geo-objetos.

De acordo com Peuquet (2002), a tradicional dicotomia campo-objeto utilizada na modelagem de um SIG tem resultado em uma relativa negligência de representações de dados geográficos com base no tempo na comunidade de pesquisa. Esse terceiro elemento da perspectiva o que/onde/quando é necessário para representar explicitamente as situações de entidades e localizações e os seus inter-relacionamentos ao longo do tempo. Certamente, é possível representar a informação temporal utilizando-se representações convencionais, mas isso acarreta um significativo aumento no volume de dados armazenados e na complexidade das operações.

Segundo Peuquet (2001, 2005), existem basicamente três abordagens para a representação dos dados espaço-temporais: representação com base na localização, representação com base em entidade e representação com base no tempo. Segundo a autora, é possível ainda desenvolver abordagens combinadas a partir dessas três. Partindo dessas abordagens, vários modelos de dados espaço-temporais vêm sendo propostos.

A incorporação do tempo em modelos que se baseiam em localização frequentemente é vista como uma solução óbvia para representação da mudança espacial. Tratar o tempo como espaço é algo útil para melhorar a percepção em contextos de problemas específicos. Entretanto, ele não permite que as propriedades únicas e específicas do tempo sejam explicitamente representadas (PEUQUET, 2002).

Na representação com base em entidade para dados espaço-temporais, os modelos propostos registram explicitamente mudanças espaciais ao longo do tempo relacionadas a entidades geográficas específicas ao invés de localizações. Em um nível conceitual, todos os modelos propostos com essa abordagem representam extensões da abordagem vetor topológica. Como tais, eles localizam mudanças na geometria de entidades ao invés do tempo. Um caso particular da

abordagem com base em entidade é aquela orientada a objeto. (PEUQUET, 2005).

Na abordagem que tem como base o tempo, a localização no tempo se torna a base organizacional primária para o registro de mudanças. A sequência de eventos ao longo do tempo, representando a manifestação espaço-temporal de algum processo, é percebida via linha do tempo ou vetor temporal (uma linha unidimensional na dimensão tempo ao invés de uma superfície bi-dimensional sobre o espaço). Com este tipo de representação, as mudanças relativas ao tempo são explicitamente armazenadas (PEUQUET, 2005).

2.1.2 A dimensão temporal em Sistemas de Informações Geográficas

O tempo é um elemento essencial para fins de localização e análise visando o estabelecimento de padrões, predição de eventos futuros ou explicação de ocorrências. A informação temporal pode ter diferentes formas quando dados geográficos são coletados. Pode ser um simples instante de tempo, ou pode ser uma expressão de duração. Dados geográficos podem ser coletados em intervalos regulares, ou podem ser registrados somente quando uma mudança ocorre. Em se tratando de SIG, os tipos de tempo auxiliam na decisão de como analisar o que acontece em determinados locais, em determinar quando ocorrem mudanças e em examinar vários cenários possíveis (VASILIEV, 1997).

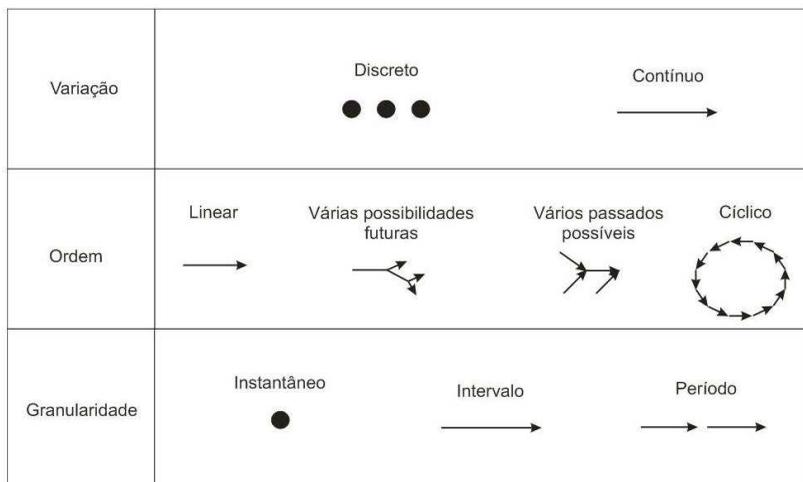
Muitos conceitos fundamentais sobre tempo e propriedades do tempo têm sido discutidos na literatura da ciência da computação e da informação geográfica. Progressos significantes vêm sendo alcançados no desenvolvimento conceitual assim como em estudos de caso em diferentes domínios de aplicação (YUAN, 2008).

Conforme Worboys e Dunckham (2004), o tempo pode ser representado por meio de diferentes estruturas, definidas principalmente com base em três elementos da representação temporal: variação temporal (contínua ou discreta); ordem no tempo (linear, ramificado e circular) e granularidade (instante de tempo, intervalo de tempo, período ou elemento temporal). A figura 01 apresenta as estruturas temporais, segundo Worboys e Dunckham (2004).

Quanto à variação temporal, considera-se a possibilidade de variação contínua e variação discreta. A variação temporal contínua é usada em processos que demandam medidas de tempo com níveis arbitrários de precisão. Já a variação temporal discreta é usada quando o tempo é medido em certos pontos ou intervalos de tempo, e a variação é

descontínua entre estes pontos (WORBOYS; DUCKHAM, 2004). Um intervalo de tempo é o tempo entre dois instantes. Um instante pode ser definido como um ponto no tempo em um eixo temporal.

Figura 1 - Estruturas temporais.



FONTE: Adaptado de Worboys e Duckham (2004)

Embora a modelagem de processos dinâmicos ou mudanças contínuas seja identificada como objetivo de pesquisa (YUAN et al., 2004), grande parte da literatura na comunidade SIG trata as mudanças espaço-temporais de maneira discreta, o que é relativamente mais fácil (HORNSBY; EGENHOFER, 2000).

Com relação à ordem, o tempo pode ser classificado como linear (ou linearmente ordenado), circular (ou cíclico) e ramificado (WORBOYS; DUNCKHAM, 2004). O tempo linear considera que os pontos da linha do tempo fluem sequencialmente (há uma ordem de precedência entre eles) e os eventos podem ser medidos em escala ordinal ou em intervalos. O tempo circular representa tempos recorrentes e combina ordem de eventos e seus intervalos de tempo de ocorrência. Neste caso, a periodicidade de sua ocorrência faz com que sempre se volte à mesma referência de tempo (DIAS et al., 2005). O tempo ramificado permite que dois pontos diferentes sejam sucessores (ramificação no futuro) ou antecessores (ramificação no passado) imediatos de um mesmo ponto. Para ambos, a restrição linear é abandonada.

Embora o espaço e o tempo sejam contínuos, eles são convencionalmente divididos em unidades discretas, de comprimento uniforme ou variável para propósitos de medição objetiva. Associado à variação temporal discreta está o conceito de granularidade. Intuitivamente, a granularidade define uma partição, possivelmente não total, do domínio do tempo (CAMOSSO et al., 2006). Associado a essa variação, existe o conceito de *chronon*, que pode ser definido como a menor duração de tempo suportada por um sistema, podendo variar em diferentes aplicações (EDELWEISS; OLIVEIRA, 1994). Qualquer atividade em um banco de dados temporal acontece durante o período de pelo menos um *chronon*. Os elementos primitivos de representação da granularidade temporal são o instante de tempo (representa um ponto particular de tempo), o intervalo de tempo (tempo decorrido entre dois pontos) e o período ou elemento temporal (sequência de intervalos de tempo) (WORBOYS; DUCKHAN, 2004).

Do ponto de vista do armazenamento em banco de dados, de acordo com Snodgrass (1992) existem dois tipos de tempo: o tempo de validade e o tempo de transação. O tempo de validade é o momento em que o evento ocorreu. O tempo de transação é o momento em que essa ocorrência foi registrada no banco de dados. Conforme a presença ou ausência do registro do tempo de validade e/ou do tempo de transação, quatro tipos de Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados (SGBD) podem ser identificados: estático, de tempo de validade (histórico), de tempo de transação (*rollback*) e bitemporal. Um SGBD estático não mantém nem o tempo de validade nem o tempo de transação. Um SGBD histórico lida somente com o tempo de validade, podendo recuperar o histórico de um evento de acordo com o tempo de validade registrado. Um SGBD de tempo de transação registra o instante da inserção de dados no banco de dados (BD), possibilitando uma recuperação de dados para desfazer uma transação. Um SGBD bitemporal registra tanto o tempo de validade quanto o tempo de transação (WORBOYS, 1994). O quadro 1 indica a dimensão temporal mantida em cada caso. Uma discussão mais aprofundada com relação à dimensão temporal em SGBD pode ser encontrada em Snodgrass (1992); Worboys (1994); Worboys e Duckhan (2004); Dias et al. (2005).

Quadro 1 - Classificação dos SGBDs segundo a dimensão temporal.

	Sem tempo de transação	Com tempo de transação
Sem tempo de validade	Estático	Por tempo de transação (<i>rollback</i>)
Com tempo de validade	Histórico (por tempo de validade)	Bitemporal

2.1.3 Estágios no desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas Temporais

Worboys (2005) descreve quatro estágios principais na introdução da dimensão temporal em sistemas de informação geográfica. São eles o estágio zero (SIG estático), o estágio um (instantâneos temporais), o estágio dois (mudança do objeto) e o estágio três (eventos, ações e processos).

O estágio zero é, em geral, onde a tecnologia SIG comercial está atualmente. Neste estágio é possível representar o passado ou o futuro, mas somente um único momento no tempo pode ser representado. Além disso, não é possível fazer comparações entre os estados do objeto entre diferentes datas.

No estágio um, o mundo é visualizado como uma sucessão de configurações espaciais de objetos em instâncias temporais. Esta tem sido a abordagem mais comum em modelos espaço-temporais até agora. Um instantâneo temporal é uma representação do estado de um objeto de estudo em um domínio particular e em um único momento no tempo. Uma sequência de instantâneos é uma coleção de instantâneos temporais, geralmente todos da mesma área, indexados por uma variável temporal. Não é realmente o domínio do tempo que dita estas propriedades, mas a natureza do fenômeno que está sendo considerado.

No estágio dois, o foco muda da sequência temporal de objetos, seus atributos e relacionamentos, para mudanças que podem acontecer a objetos, a atributos e a relacionamentos. Um modelo do mundo baseado na evolução de objetos ao longo do tempo, retendo identidade, mas modificando atributos espaciais e outros, parece natural. Entretanto, surgem problemas relacionados à continuidade da identidade do objeto ao longo do tempo.

O estágio três na evolução dos sistemas de informação espaço-temporal é um tratamento completo de mudança em termos de eventos, ações e processos. No estágio três espera-se que sejam modelados

eventos complexos, a maneira com que objetos podem participar nesses eventos e as relações entre os eventos.

2.1.4 Semântica dos dados espaço-temporais

Existem, em particular, duas grandes categorias de conceitos geográficos com as quais as pessoas estão familiarizadas: entidades e fenômenos geográficos (e as propriedades e relações espaciais e temporais que as caracterizam). Os fenômenos geográficos são abstratos ou concretos e ocorrem na natureza de forma contínua ou discreta. Os fenômenos geográficos são distintos de dados geográficos, os quais são feições selecionadas (geralmente numéricas) que os geógrafos usam para descrever ou medir direta ou indiretamente o fenômeno que tem a qualidade de ser espacial. Por exemplo, o fenômeno clima pode ser visto em parte através dos dados da precipitação (DENT, 1996) in Nogueira (2009). Os fenômenos são analisados através de dados que podem ser qualitativos ou quantitativos e que podem ser descritos nominalmente, ordinalmente, ou proporcionalmente (NOGUEIRA, 2009). As entidades podem ser consideradas como a interpretação de um fenômeno geográfico em um determinado contexto. Um objeto é a representação de uma entidade, em meio computacional.

A segunda categoria de conceitos geográficos universalmente compartilhados refere-se a noções de espaço e tempo aplicáveis a escalas geográficas, e em particular às relações espaciais e temporais entre entidades e fenômenos geográficos (COUCLELIS, 2005). A visão de temporalidade compartilhada pela maioria dos pesquisadores relaciona-se a uma sequência de estados pontuados por eventos que transformam um estado no próximo (LANGRAN, 1992). Um elemento central na modelagem espaço-temporal são as mudanças que ocorrem ao longo do tempo e a maneira de representá-la em um SIG (AHOLA et al., 2007).

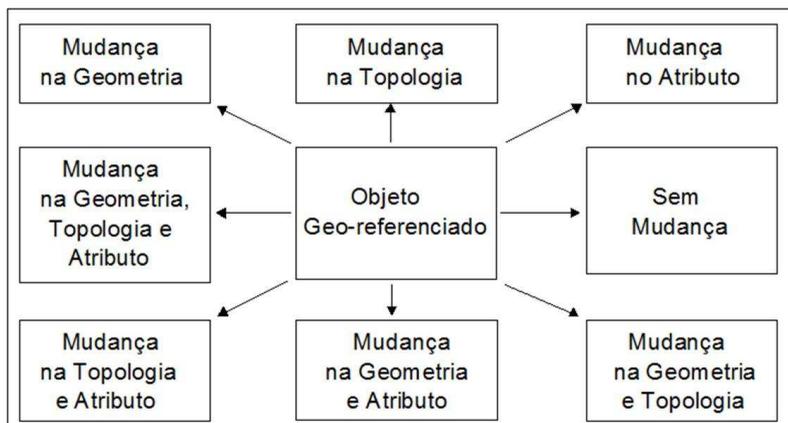
A mudança é normalmente descrita como um evento ou coleção de eventos. Cada mutação de um objeto é um evento que produz uma nova versão do objeto e um novo estado do mapa (LANGRAN, 1992). Para propósitos de modelagem espaço-temporal, Peuquet (2005) define evento como “uma mudança no estado de uma ou mais localizações, entidades ou ambos”. Os eventos são necessários para capturar os mecanismos de mudança (WORBOYS; HORNSBY, 2004).

Peerbocus et al. (2004) citam três tipos principais de mudança de documentação no contexto de gerenciamento de dados espaço-

temporais: a) documentação sobre eventos que ocorrem no mundo real, constituindo o aspecto semântico da evolução; b) documentação referente à evolução cartográfica, descrevendo as diferentes modificações realizadas pelo usuário no nível de interface e, c) documentação sobre a evolução do banco de dados, contendo informações sobre os diferentes objetos que estão sendo atualizados.

Sinton (1978) e Yuan (1996a) investigaram diferentes tipos de mudanças espaço-temporais e como elas podem ser medidas, representadas e analisadas em SIG. Em se tratando de objetos, Armstrong (1988) argumenta que oito subtipos de mudanças temporais resultam da combinação de mudanças em seus atributos, morfologia e topologia (figura 2).

Figura 2 - Oito possíveis mudanças espaço-temporais de um objeto geográfico.



FONTE: Modificado de Sinton (1978).

Goodchild et al. (2007) argumentam que a dinâmica do comportamento de objetos pode ser capturada em três dimensões fundamentais, caracterizadas como estrutura interna, geometria e movimento.

Na dimensão relacionada à geometria do objeto, distingue-se entre objetos que permanecem com a mesma forma e objetos que mudam de forma ao longo do tempo. Na dimensão relacionada à estrutura interna do objeto, distingue-se entre objetos que são homogêneos e objetos que tem variação interna. Na dimensão relacionada ao movimento, distingue-se entre objetos que se movem e aqueles que permanecem fixos em um local ao longo do tempo.

Com relação aos tipos de dados, com base nas características espaciais, semânticas e temporais, Price et al. (1999) definem cinco tipos diferentes de dados para aplicações espaço-temporais: dados espaciais, dados temporais, dados espaço-temporais, dados semânticos e dados compostos (quadro 2).

Quadro 2 - Tipos de dados para aplicações espaço-temporais.

Tipo de dado	Característica
Dados espaciais	Possuem somente domínio espacial
Dados temporais	Possuem somente domínio temporal
Dados espaço-temporais	Dados espaciais que se alteram com o tempo
Dados semânticos	Podem ter variações em consequência de mudanças puramente espaciais, temporais ou espaço-temporais
Dados compostos	Constituídos por associação de dados e cujos componentes podem mudar com o tempo ou espacialmente

Fonte: Price et al. (1999).

2.1.5 Funções de aplicações de um Sistema de Informações Geográficas com características temporais

Um SIG com características temporais tem como objetivo processar, gerenciar e analisar dados espaço-temporais (YUAN, 1996). Uma importante questão a ser considerada no desenvolvimento de um SIG com características temporais são as funções a que esse SIG deve atender.

De acordo com Langran (1992), as funções de um SIG temporal são: inventário, análise, atualização, controle de qualidade, visualização e agendamento (que é opcional). O quadro 3 apresenta essas funções. Além dessas funções, é importante citar também o suporte a consultas. Segundo Yuan e McIntosh (2002), o suporte a consultas é uma das funções mais importantes de um sistema de informação. A identificação dos tipos de consultas tem profunda implicação no projeto de um sistema de informação espaço-temporal e no processamento e mineração da informação espaço-temporal. As consultas refletem o tipo de informação que o usuário deseja obter.

Quadro 3 - Principais funções de um SIG temporal.

Função	Descrição
Inventário	Armazena uma descrição completa da área de estudo e considera as mudanças no mundo físico e no meio computacional.
Análise	Explica, explora ou prevê os componentes e os processos atuando em uma determinada área.
Atualização	Atualiza informação desatualizada por informação corrente.
Controle de qualidade	Avalia onde novos dados apresentam inconsistência lógica, de acordo com versões e estados prévios.
Agendamento	Identifica ou antecipa estados limiares do banco de dados que ativam respostas pré-definidas do sistema.
Visualização	Gera um mapa estático ou dinâmico, ou uma tabela, de processos temporais atuantes em uma determinada área.

Fonte: Langran (1992).

2.1.6 Modelos para representação de dados espaço-temporais em Sistemas Informações Geográficas

De acordo com Peuquet (2002), o desenvolvimento da capacidade temporal em modelos de dados geográficos, e SIG em geral, começou com o então inovador trabalho de Langran, no final dos anos 1980 (LANGRAN e CHRISMAN, 1988). Segundo Peuquet (1992), a publicação “Time in Geographic Information Systems” de Langran (1992) é considerada um ponto de referência em SIG temporal. A partir daí, vários modelos de dados espaço-temporais que incorporam tempo em SIG vêm sendo propostos.

Le (2005b) classifica os modelos espaço-temporais desenvolvidos para SIG em sete abordagens: 1) retratos sequenciais; 2) composição espaço-temporal; 3) estado inicial com emendas; 4) modelos com base em evento ou no tempo; 5) modelos com base em objeto, entidade, identidade, processo ou atividade; 6) abordagem combinada/integrada; e 7) modelos orientados a eventos. A seguir, apresentam-se e discutem-se alguns dos modelos existentes, organizados de acordo com essas sete abordagens.

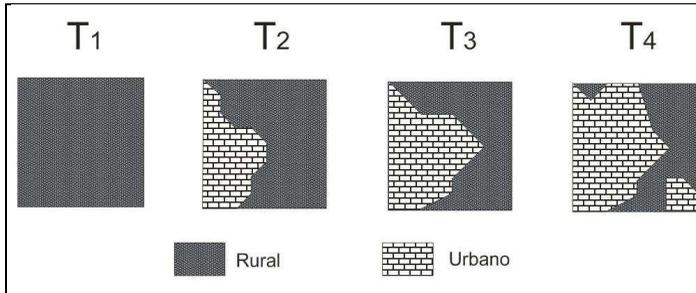
2.1.6.1 Modelo Retratos Sequenciais

O modelo Retratos Sequenciais foi proposto por Armstrong (1988). É um dos modelos de dados espaço-temporais mais simples, sendo possível implementá-lo nos softwares SIG tradicionais. Embora normalmente empregue um modelo de dados *campo*, pode também empregar um modelo *objeto*. Ele incorpora a informação temporal mediante uma série temporal de cenários registrados espacialmente.

O modelo trabalha com um conjunto de cenários da área em estudo, em que cada cenário é uma camada (*layer*) matricial que representa um estado do mundo real em um instante, como uma fotografia.

A figura 3 ilustra a representação da evolução de uma área urbana por meio de “retratos sequenciais”. Cada cenário representa o estado de determinado local em determinado momento.

Figura 3 - Retratos sequenciais representando a expansão urbana em uma área rural.



FONTE: Adaptado de Langran (1992).

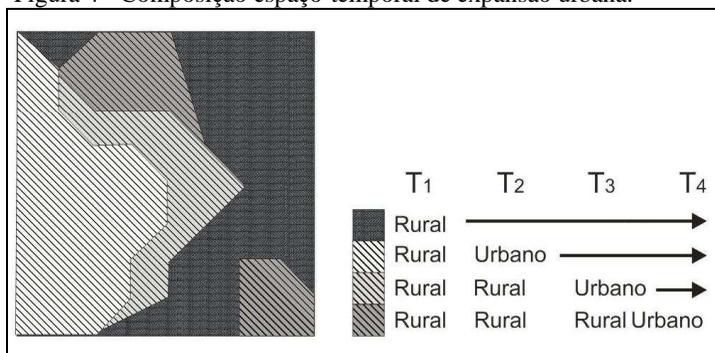
Existem basicamente duas limitações no modelo Retratos Sequenciais. Primeiro, as mudanças que ocorrem entre cenários não são explicitamente armazenadas. A fim de detectar diferenças, dois instantâneos devem ser comparados exaustivamente. O método negligencia os eventos ocorridos separadamente entre os cenários. Segundo, existe armazenamento de informações redundantes (LANGRAN, 1992; YUAN, 1996a), resultante da inclusão em cada cenário tanto dos dados modificados quanto dos não modificados (CHOI *et al.*, 2008).

2.1.6.2 Modelo Composição Espaço-Temporal

O modelo Composição Espaço-Temporal foi proposto por Langran e Chrisman (1988) e é uma evolução do modelo Retratos Sequenciais. Composições espaço-temporais são unidades com atributo único, espacialmente homogêneas e temporalmente uniformes. Cada unidade apresenta uma mudança distinta no valor do atributo ao longo do tempo (YUAN, 2001). As mudanças nos atributos são registradas em intervalos discretos, embora sua resolução temporal não seja necessariamente precisa (YUAN, 1996b).

A figura 4 apresenta uma composição espaço-temporal da expansão urbana, representada por retratos sequenciais na figura 3. A partir de uma base cartográfica que representa a realidade em determinado momento, são adicionados novos nós e conexões cada vez que ocorre uma mudança, decompondo-se o espaço ao longo do tempo em fragmentos cada vez menores, com sua própria história distinta (FERREIRA *et al.*, 2009). Cada unidade possui uma lista ordenada de registros, que contém um conjunto de atributos, além da indicação da data para a qual esse conjunto de atributos é válido.

Figura 4 - Composição espaço-temporal de expansão urbana.



FONTE: Adaptado de Langran (1992).

O modelo Composição Espaço-Temporal apresenta basicamente três limitações. Em primeiro lugar, cada vez que um objeto divide-se em dois, cada ocorrência do objeto antigo é efetivamente substituída por dois novos objetos com novos identificadores, aumentando a complexidade das operações (LANGRAN, 1992). Segundo, atualizar um banco de dados nesse modelo requer a reconstrução de unidades da

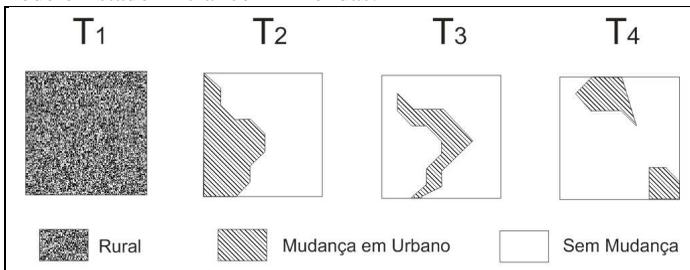
composição espaço-temporal. Com a ocorrência de mudanças nos relacionamentos geométricos e topológicos entre essas unidades, todo o banco de dados (tanto os objetos quanto os atributos) necessita ser reorganizado. Por fim, esse modelo falha em capturar a temporalidade em atributos que apresentem o movimento com o passar do tempo (YUAN, 1996b).

2.1.6.3 Modelo Estado Inicial com Emendas

O modelo Estado Inicial com Emendas, proposto por Langran em 1989, utiliza um modelo tridimensional (duas dimensões espaciais e uma dimensão temporal). O modelo tem como base o modelo de dados *objeto* e registra as mudanças que ocorrem na geometria das entidades.

A partir de uma data inicial, qualquer mudança em uma entidade é registrada incrementalmente através de um vetor emenda, criando um novo objeto. Na figura 5 apresenta-se a evolução da mesma área urbana representada pelo modelo Retratos Sequenciais na figura 3 e pelo modelo Composição Espaço-Temporal na figura 4, agora utilizando o modelo Estado Inicial com Emendas.

Figura 5 - Avanço de ocupação urbana representado a partir do modelo Estado Inicial com Emendas.



FONTE: adaptado de Langran (1992).

No modelo Estado Inicial com Emendas, a redundância é mínima porque uma versão do objeto é armazenada uma única vez (LANGRAN, 1992). Além de manter explicitamente a integridade de entidades individuais e sua topologia ao longo do tempo, esse modelo também tem a vantagem de possibilitar a representação de mudanças assíncronas em entidades e de facilitar a realização de consultas acerca de mudanças em determinado local. Essa capacidade, entretanto, vem com um custo significativo: com o passar do tempo, o número de vetores emenda

umenta, tornando a topologia espaço-temporal desses vetores cada vez mais complexa (PEUQUET, 2005). Peuquet (2002) cita ainda como limitação desse modelo o fato de ele manipular somente mudanças discretas e referentes aos limites dos objetos.

2.1.6.4 Abordagem com Base em Eventos ou no Tempo

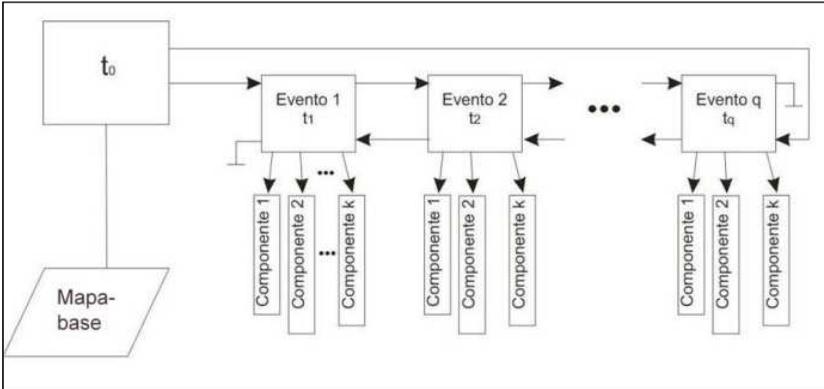
Modelos que adotam a Abordagem com Base em Eventos foram propostos por Claramunt e Thériault (1995), Peuquet e Duan (1995), Chen e Jiang (1998) e Sengupta e Yan (2004), entre outros. Entre essas abordagens, algumas são diferentes em sua essência, enquanto outras são similares. A ideia comum por trás desse tipo de modelo é apresentar explicitamente os sucessivos relacionamentos temporais usando ponteiros que permitam ir para frente ou para trás (com relação à linha temporal) no banco de dados (LE, 2005b). A seguir, discute-se mais detalhadamente o modelo de dados espaço-temporal com base em eventos.

2.1.6.4.1 Modelo de Dados Espaço-Temporal com Base em Eventos

O Modelo de Dados Espaço-Temporal com Base em Eventos (ESTDM) foi proposto por Peuquet e Duan (1995). É um modelo que tem como base o modelo de dados *campo* e utiliza o tempo para organizar a informação espaço-temporal sobre as mudanças na localização. O ESTDM tem capacidade e eficiência para suportar tanto consultas espaciais quanto consultas temporais (YUAN, 1996a). A figura 6 apresenta os elementos primários e a estrutura básica do ESTDM.

O ESTDM consiste em um mapa-base que registra a configuração espacial de determinada área em uma data inicial, t_0 . Os eventos são registrados quando as mudanças ocorrem (em qualquer resolução temporal). O conjunto de mudanças (C_i) consiste no conjunto de cada localização x, y onde ocorreram mudanças a partir da data inicial, t_0 , e no novo valor apresentado em cada local no tempo, t . Cada evento listado é associado às mudanças relacionadas a um único domínio temático.

Figura 6 - Elementos primários e estrutura básica do ESTDM.



FONTE: Adaptado de Peuquet e Duan (1995).

O tempo associado a cada mudança é armazenado em ordem temporal crescente com relação ao estado inicial (PEUQUET e DUAN, 1995). Com isso, a evolução no espaço e no tempo de um tema com atributo único (um evento) pode ser explicitamente armazenada em um banco de dados SIG (YUAN, 2001). A diferença entre os tempos armazenados diz respeito ao intervalo temporal entre eventos sucessivos. Mudanças armazenadas dentro dessa linha do tempo ou “vetor temporal” podem ser relacionadas a localizações, a entidades ou a ambas.

Uma das desvantagens desse modelo é o tempo de processamento de consultas temporais. Nesse tipo de consulta, para qualquer data consultada, as pesquisas iniciam-se a partir do mapa-base; na sequência, todos os componentes na lista de eventos são comparados (pois os componentes armazenam somente as mudanças). Onde não houve modificações, a pesquisa dá-se pela extração de todos os componentes modificados a partir do mapa-base, o que pode ser um processo demorado.

2.1.6.5 Abordagem com Base em Objeto, Entidade, Identidade, Processo ou Atividade

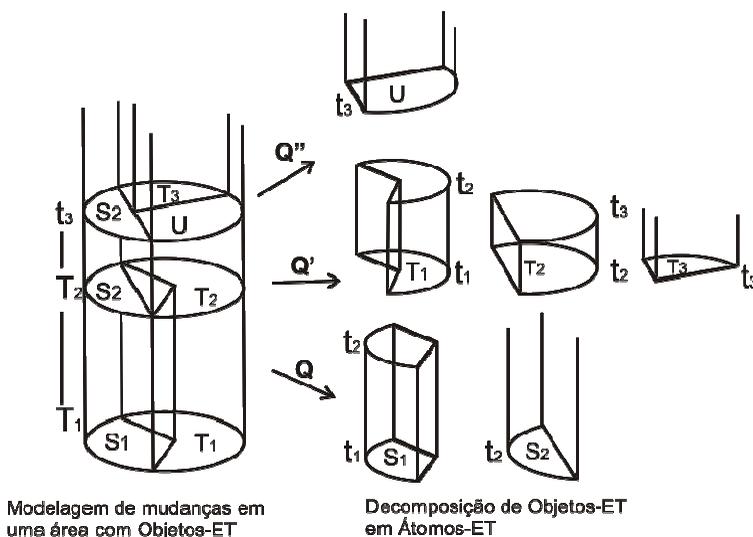
Abordagens orientadas a objeto, com base em entidade, em identidade, em processo e em atividade são conceitualmente similares. Todas elas tratam um objeto, uma entidade, uma identidade, um

processo ou uma atividade identificável como a base para a modelagem espaço-temporal (LE, 2005a). A seguir, apresentam-se os modelos citados anteriormente que se enquadram nessa classificação.

2.1.6.5.1 Modelo Objeto Espaço-Temporal

O Modelo Objeto Espaço-Temporal (STOM) foi proposto por Worboys (1992). O STOM apresenta uma estrutura hierárquica de objetos e átomos espaço-temporais discretos (figura 7).

Figura 7 - Exemplo de modelo objeto espaço-temporal com átomos espaço-temporais.



FONTE: Adaptado de Worboys (1994).

Um objeto espaço-temporal é um agregado de átomos espaço-temporais, a mais extensa e espacialmente homogênea unidade temporal com propriedades, que ocorre tanto no espaço quanto no tempo. O átomo espaço-temporal é usado para formar objetos espaço-temporais que representam as mudanças no mundo real. Um objeto espaço-temporal pode apresentar mudanças no espaço e no tempo, embora não ocorram mudanças dentro de cada um de seus átomos espaço-temporais. Sendo assim, é possível registrar as mudanças nas dimensões espacial e temporal (conjunta ou separadamente) que ocorram em um objeto espaço-temporal. Mudanças graduais no espaço ao longo do tempo não

podem ser representadas nesse modelo, pois seus átomos espaço-temporais são discretos.

Com essa estrutura, a composição espacial de um fenômeno geográfico pode ser explicitamente registrada ao longo do tempo, descrevendo a distribuição de seus atributos no fenômeno geográfico (YUAN, 2001).

Worboys (1994, 2001), posteriormente, estende o STOM para um modelo espacial bitemporal, com a proposição de um modelo unificado para a informação espacial e temporal. O tempo de evento e o tempo de transação são incluídos como dois eixos ortogonais, com o objetivo de registrar a existência de um objeto no mundo real e de um no sistema de banco de dados, respectivamente.

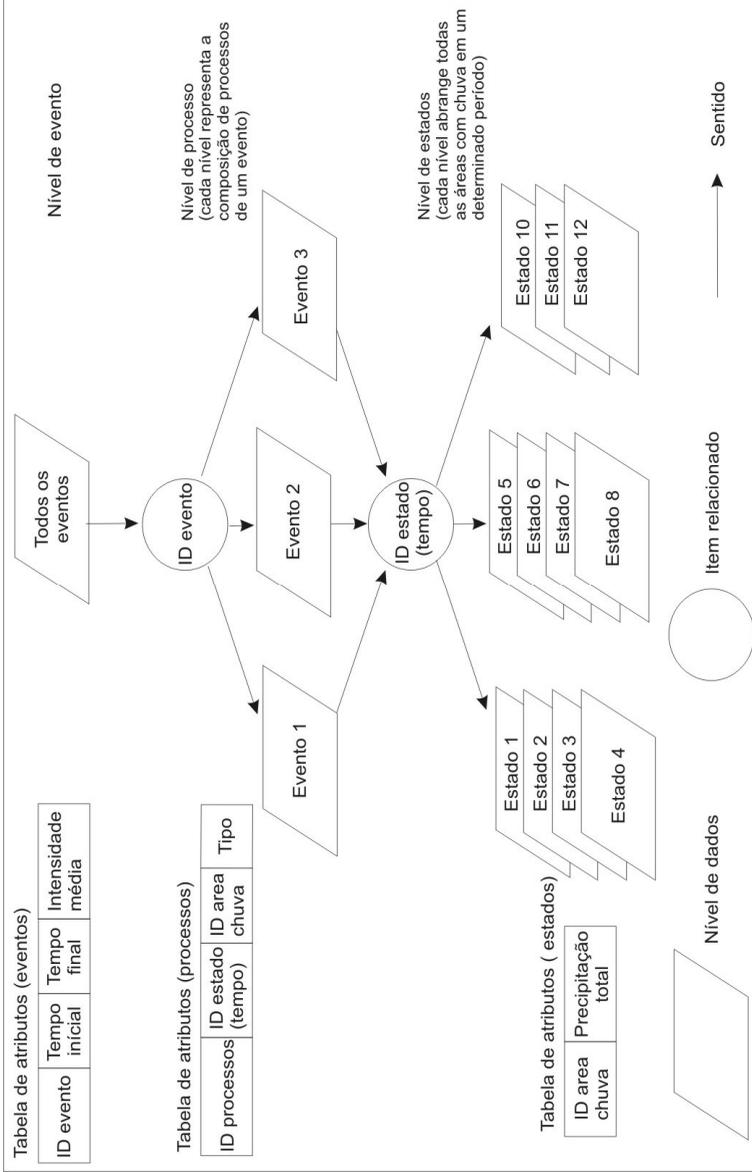
2.1.6.5.2 Modelo de três domínios proposto por Yuan

Yuan (1996b, 1999, 2000) propôs um modelo de três domínios (temporal, espacial e semântico) com o objetivo primário de incorporar, em um único modelo de dados, os conceitos de fenômenos complexos que possuam propriedades tanto de campos quanto de objetos. Expandindo o modelo de três domínios, Yuan (2001) propôs um sistema que organiza dados espaciais e temporais em uma hierarquia de eventos, processos e estados. Com isso é possível selecionar informações sobre comportamentos e relacionamentos no espaço e no tempo com base em eventos e processos.

Objetos discretos são usados para mostrar como os eventos e processos progridem no espaço e no tempo, e campos são usados para modelar como o estado de um tema varia espaço-temporalmente (YUAN, 2001).

Como evidencia a figura 8, o nível de evento registra todas as ocorrências de um evento e de seus atributos (como horário inicial e final). Cada evento é associado a um conjunto de processos no nível de processo, composto destes e de seus atributos. Cada processo é associado a um conjunto de estados, e uma tabela com seus atributos é criada para registrar características individuais de cada ocorrência. Assim, propriedades do tipo *objeto* são armazenadas nos níveis de eventos e processos, e propriedades do tipo *campo* são armazenadas nos níveis de estado.

Figura 8 - Estrutura hierárquica de eventos, processos e estados.



FONTE: Adaptado de Yuan (2001) e Souza (2004).

O nível de eventos proporciona informações sobre “o que aconteceu”, enquanto o nível de processos oferece informações relativas a “como isso (um evento) aconteceu”. É possível consultar o nível de eventos para identificar eventos de interesse e relacioná-los no nível de processos correspondente, obtendo-se, assim, os processos espaço-temporais relacionados a esses eventos (YUAN, 2001).

Como o modelo manipula informações semânticas, espaciais e temporais separadamente, suporta uma ampla gama de consultas espaço-temporais.

O esquema do banco de dados desse modelo pode ser implementado em um sistema gerenciador de banco de dados (SGBD) espacial, como o PostGIS e o Oracle Spatial, usando seu suporte para lidar com informações espaciais. É um modelo muito simples, no qual não são definidos tipos de dados ou operações espaço-temporais. O modelo utiliza os tipos de dados e a linguagem de consulta proporcionada pelo SGBD (FERREIRA *et al.*, 2009).

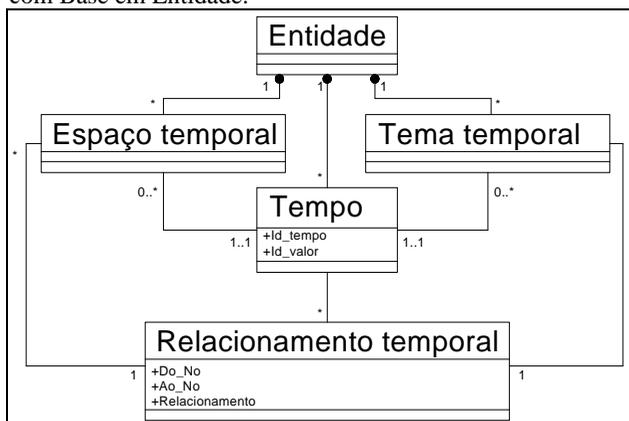
2.1.6.6 Modelo Temporal com Base em Entidade

Choi *et al.* (2008) propuseram o Modelo Temporal com Base em Entidade (FBTM). Esse modelo adota e estende os conceitos-chave dos modelos propostos por Worboys (1994) e Yuan (1999, 2001).

Para a representação de uma entidade, o FBTM segue a abordagem Três Domínios para capturar atributos temáticos independentemente dos atributos espaciais, mas usa um identificador de entidade único para conectar espaço, tema e tempo, em vez da tabela de ligação de domínio (figura 9). O modelo também adota e modifica o esquema temporal da ISO (ISO, 2000), para proporcionar detalhes na dimensão temporal.

O FBTM mantém identificadores de objetos persistentes para mudanças espaciais, com um identificador de objeto para mudanças temáticas. Um relacionamento temporal explícito é também adicionado ao FBTM para armazenar a topologia temporal e os tipos de mudanças, e para permitir a realização de consultas espaciais e temáticas ao longo do tempo. Primitivas temporais são usadas para os elementos temporais básicos, a fim de construir um relacionamento temporal explícito (CHOI *et al.*, 2008). O FBTM usa tempo linear para modelar mudanças discretas em entidades e apresenta limitações para capturar mudanças contínuas sobre entidades que estão em movimento (CHOI *et al.*, 2008).

Figura 9 - Representação conceitual do Modelo Temporal com Base em Entidade.



FONTE: Adaptado de Choi et al. (2008).

2.1.6.7 Abordagem combinada/integrada

Um exemplo de modelo de dados espaço-temporal que adota a abordagem combinada/integrada é o TRIAD, proposto por Peuquet (1994) com o intuito de armazenar eventos. Esse modelo trabalha com três tipos de representação, com o objetivo de possibilitar a concepção de um histórico do mundo real: 1) um modelo de localização (onde); 2) um modelo de objeto (o quê); e 3) um modelo temporal (quando).

O modelo de dados *campo* é a base para os modelos de localização e de tempo. O modelo de objeto emprega o modelo de dados *objeto* e descreve as mudanças nos atributos temáticos dos objetos ao longo do tempo. O modelo de localização descreve as mudanças que ocorrem em determinado local ao longo do tempo. Os detalhes de cada evento (momento e localização da ocorrência) são armazenados cronologicamente, formando uma cadeia de eventos no modelo temporal.

O modelo de objeto utiliza os paradigmas da orientação a objeto: hierarquia (os objetos podem herdar atributos de objetos-pais) e associações (à medida que os objetos alteram-se, eles podem agrupar-se ou dividir-se em novos objetos, dependendo do processo envolvido). Segundo Raper (2000), o TRIAD pode proporcionar respostas a questões relacionadas a objetos, localizações e tempo, do tipo “Qual a

localização deste objeto em determinado momento?”, “O que existia neste local em determinado momento?” e “Quando determinado objeto esteve neste local?”. Uma desvantagem do TRIAD é que ele aplica-se apenas a entidades geográficas com identidade espacial e temporal discreta. Além disso, Galton (2001) argumenta que o TRIAD é esquemático e não pode evitar duplicações de informação inaceitáveis quando implementado.

2.1.6.8 Abordagem Orientada a Evento

Worboys e Hornsby (2004) propuseram o Modelo Evento Geoespacial (GEM), que estende o modelo geoespacial tradicional introduzindo eventos no paradigma orientado a objeto. O modelo visa contribuir para o desenvolvimento de uma abordagem geral para a modelagem de fenômenos geoespaciais dinâmicos no contexto de SIG. O modelo adota uma abordagem híbrida, permitindo três categorias de entidades: objetos, eventos e *settings*.

Nessa abordagem, os acontecimentos são representados como eventos. Embora a abordagem orientada a eventos soe como “modelo com base em eventos”, é mais próxima da abordagem com base em processo.

Além dos conceitos de evento, esse modelo define dois tipos de relacionamentos: objeto-evento e evento-evento. Cada objeto ou evento tem um único *setting*. Um *setting* pode ser espacial (ponto, linha ou área), temporal (instante, intervalo ou período) ou espaço-temporal (trajetória, história ou linha de vida geoespacial). Um *setting* espaço-temporal é uma função de um *setting* temporal para um *setting* espacial. Finalmente, um evento geoespacial é associado a um *setting* espaço-temporal. Alguns exemplos de relacionamentos objeto-evento são divisão e fusão (um evento que cria/destrói um limite entre objetos). Alguns exemplos de relacionamentos evento-evento são iniciação e conclusão (a ocorrência do evento *A* inicia/termina o evento *B*) (FERREIRA *et al.*, 2009).

2.1.6.9 Considerações finais acerca dos modelos de dados espaço-temporais

Incorporar o elemento temporal em SIG tradicional é um desafio que tem sido pesquisado por muitos anos e que apresenta

diversas propostas de solução. Entre todas as representações espaço-temporais, a representação tradicional com base em camadas (*layer*) é a única possível de ser implementada em SIG existentes. Entretanto, pesquisas mostram que ela é insuficiente para representar a informação temporal, porque somente cenários ou mudanças são representados.

Os modelos de dados espaço-temporais determinam a maneira e a eficiência com que os dados podem ser acessados e manipulados. Em abordagens que modelam o estado do mundo real como um cenário, é simples recuperar o estado de um local em dado momento, mas difícil consultar as mudanças que ocorreram entre duas datas. Em abordagens que modelam mudanças, como o modelo Estado Inicial com Emendas, é mais fácil recuperar as mudanças que ocorreram entre duas datas do que o estado de um local em determinado momento. Para abordagens com base em entidade, a história de uma única entidade é mais fácil de ser traçada do que a história referente a determinado local. Em abordagens com base em localização, é simples traçar a história de um local. Abordagens combinadas ou integradas podem ser eficientes para recuperar a história de determinado local, entidade e/ou tempo (por exemplo, a data). Assim, esse tipo de abordagem é mais flexível do que outros no acesso aos dados, porém é mais complexo e requer mais espaço de armazenamento quando comparado com os demais tipos de abordagens citados (LE, 2005a).

Ressalta-se, por fim, que a maior parte dos modelos de dados espaço-temporais existentes foram desenvolvidos para aplicações específicas, cada um focando em aspectos particulares dos dados espaço-temporais (PELEKIS *et al.*, 2004). Sendo assim, nenhuma solução proposta até o momento abrange todos os aspectos possíveis desse tipo de informação e, segundo Nadi e Delavar (2005), não existe um modelo geral amplamente aceito. Dessa forma, como argumenta Yuan (2008), a representação espaço-temporal em SIG continua a ser um desafio.

2.1.7 Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados (SGBD)

De acordo com Elmasri e Navathe (2005), um sistema de banco de dados é composto por um Banco de Dados (BD) e um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD).

Rigaux *et al.*, (2002) define banco de dados como uma grande coleção de dados inter-relacionados armazenados dentro de um ambiente computacional. Um SGBD pode ser definido como um

conjunto de softwares que gerenciam a estrutura do banco de dados e controla o acesso aos dados armazenados no banco de dados. O SGBD facilita o processo de definição (especificação dos tipos de dados, estruturas e limitações), construção, manipulação, consulta e atualização do banco de dados.

Segundo Ferreira et al. (2005), o mercado para SGBDs concentra-se em duas tecnologias, os SGBDs Relacionais (SGBD-R) e os SGBDs Objeto-Relacionais (SGBD-OR). Além dessas duas tecnologias, uma pequena fatia do mercado é voltada aos SGBDs Orientados-a-Objeto (SGBD-OO). Os SGBD-R seguem o modelo relacional de dados, em que um banco de dados é organizado como uma coleção de relações, cada qual com atributos de um tipo específico. Os SGBD-OR podem armazenar tipos de dados mais complexos nas colunas de suas tabelas relacionais do que apenas os tipos básicos (como número e texto), permitindo ainda que o usuário defina novos tipos de dados personalizados, novas funções e novos operadores para trabalhar com estes novos tipos de dados (OBE; HSU, 2010).

Os SGBDs têm sido utilizados por um longo tempo conjuntamente com SIG, para manipular os dados sem componente espacial (ou atributos) dentro do SIG (PEUQUET, 2005). No contexto da utilização conjunta de SIG e SGBD, os SIG podem ser caracterizados como possuindo arquitetura dual ou arquitetura integrada, de acordo com a maneira como se dá essa integração (ELMASRI; NAVATHE, 2005).

Na arquitetura dual, a componente convencional ou alfanumérica é armazenada em um SGBD relacional e a componente espacial é armazenada em arquivos com formato proprietário. Na arquitetura integrada, os bancos de dados espaciais (bancos de dados convencionais com extensões espaciais) possibilitam a definição de tipos de dados especiais para objetos geométricos e o armazenamento de dados geométricos. Desta maneira, tanto a componente espacial quanto a componente alfanumérica podem ser armazenadas no mesmo ambiente. Os bancos de dados espaciais proporcionam funções e índices especiais para consultar e manipular os dados espaciais usando linguagens de consulta, como a SQL (*Structured Query Language*). Com isso, muitas das funcionalidades dos SIG podem ser incorporadas diretamente no sistema de banco de dados (Larue et al., 1993; Bagg e Ryan, 2005). Como argumentam Obe e Hsu (2010), embora os bancos de dados espaciais sejam frequentemente utilizados apenas para armazenar dados espaciais, eles possuem diversas ferramentas que possibilitam também análises desses dados.

Os bancos de dados temporais são bancos de dados que permitem armazenar e recuperar todos os estados de um objeto, registrando sua evolução ao longo do tempo (Edelweiss et al., 1994, Tansel, 1993). Segundo Peuquet (2005), duas questões relacionadas à dimensão temporal têm recebido considerável atenção na área de bancos de dados e parecem relevantes também no contexto espaço-temporal. Primeiro, para fins práticos é frequentemente impossível entrar com os dados no banco de dados no momento em que um evento ocorre no mundo real. Existe a distinção entre quando um estado ou condição é atual ou válido no mundo real e quando o estado ou condição foi inserido no banco de dados (isto é, o tempo de validade *versus* o tempo de transação). Uma segunda área de interesse dentro da arena de SGBD temporal é como realizar as atualizações no banco de dados (isto é, inserir novas informações relacionadas às condições ou eventos passados). Esta questão envolve a determinação da maneira como a informação que já está no banco de dados será afetada pela nova informação e modificada, a fim de manter a integridade do dado (PEUQUET, 2005).

Os bancos de dados espaço-temporais são um novo tipo de bancos de dados que gerenciam objetos espaço-temporais e suportam funcionalidades de consultas a esses objetos. Um objeto espaço-temporal é um objeto que tem a sua localização ou geometria alterada ao longo do tempo. Ao contrário dos bancos de dados tradicionais, um banco de dados espaço-temporal deve possibilitar o gerenciamento eficiente das propriedades dos objetos espaço-temporais que se alteram ao longo do tempo (XIONG et al., 2008).

A implementação de um banco de dados espaço-temporal muitas vezes é realizada em SGBDs comerciais convencionais, fazendo uso de suas extensões espaciais. De acordo com Le (2005), existem duas maneiras de incorporar a dimensão temporal em bancos de dados estáticos tradicionais. Uma é usar um banco de dados orientado a objetos e a outra é estender o banco de dados relacional para que a informação temporal seja adicionada como *timestamps*. No segundo caso, *timetamps* podem ser adicionados ao nível de tabela ou de atributo. Conceitualmente, adicionar um *timestamp* ao nível de tabela é simples, porém ocorrem mais redundâncias. A adição de um *timestamp* ao nível de atributo apresenta redundância mínima, mas aumenta consideravelmente o tempo necessário para a realização de consultas.

2.1.8 Modelo Entidade-Relacionamento (E-R)

O modelo Entidade-Relacionamento (E-R) é um modelo de dados conceitual de alto nível largamente empregado no desenvolvimento de bancos de dados (ELMASRI; NAVATHE, 2005). A seguir, são apresentados os principais conceitos relacionados ao modelo ER, de acordo com Korth e Silberschatz (2006).

O modelo entidade-relacionamento tem como base uma percepção do mundo real que consiste em um conjunto de objetos básicos chamados *entidades* e nos *relacionamentos* entre esses objetos.

Uma *entidade* é um objeto que existe e é distinguível de outros objetos. Um conjunto de entidades é um conjunto com entidades que possuem atributos iguais ou não. Uma entidade é representada por um conjunto de *atributos*. Formalmente, um *atributo* é uma função que mapeia um conjunto de entidades em um domínio, portanto, toda *entidade* é descrita por um conjunto de pares (atributo, valor de dado), um par para cada atributo do *conjunto de entidades*. Uma variável de determinado tipo tem um valor particular em um determinado instante no tempo.

Um *relacionamento* é uma associação entre diversas entidades. Um *conjunto de relacionamentos* é uma coleção de relacionamentos do mesmo tipo. A função que uma *entidade* exerce num *relacionamento* é chamada de *papel*. Papéis são normalmente implícitos e não são usualmente especificados. Entretanto, eles são úteis quando o significado de um relacionamento necessita de esclarecimentos. Tal é o caso quando os conjuntos de entidades de um conjunto de relacionamentos não são distintos. Um relacionamento pode ter atributos descritivos.

Um esquema E-R pode definir certas restrições com as quais o conteúdo do banco de dados tem de estar de acordo. Uma restrição importante são as *cardinalidades do mapeamento*, que expressam o número de entidades as quais outra entidade pode ser associada via um conjunto de relacionamentos. Para um conjunto de relacionamentos binário R entre conjunto de entidades A e B , a cardinalidade do mapeamento precisa ser uma das seguintes:

Um-para-um: uma entidade de A está associada no máximo a uma entidade de B , e uma entidade de B está associada no máximo a uma entidade de A .

Um-para-muitos: uma entidade de A está associada a qualquer número de entidades de B . Uma entidade de B , entretanto, pode estar associada no máximo a uma entidade de A .

Muitos-para-um: uma entidade de *A* está associada no máximo a uma entidade de *B*. Uma entidade de *B*, entretanto, pode estar associada a qualquer número de entidades de *A*.

Muitos-para-muitos: uma entidade de *A* está associada a qualquer número de entidades de *B*, e uma entidade de *B* está associada a qualquer número de entidades de *A*.

Outra restrição importante é a *dependência de existência*. Se a existência da entidade *X* depende da existência da entidade *Y*, significa que se *Y* for eliminado, *X* também o será. A entidade *Y* é chamada de *entidade dominante* e *X* é chamada de *entidade dependente*.

A *generalização* é um relacionamento de conteúdo existente entre um conjunto de entidades de *nível superior* e entidades de *nível inferior*. Por exemplo, *conta* é um conjunto de entidade de nível superior e *conta-poupança* e *conta-corrente* são conjuntos de entidade de nível inferior. A *conta-poupança* e *conta-corrente* são descritas por um conjunto de atributos que inclui todos os atributos de *conta* mais alguns atributos adicionais.

A estrutura lógica geral de um banco de dados pode ser expressa graficamente por um *diagrama E-R*, que consiste nos seguintes componentes:

Retângulos: representam conjuntos de entidades;

Elipses: representam atributos;

Losangos: representam relacionamentos entre conjuntos de entidades;

Linhas: ligam atributos a conjuntos de entidades e conjuntos de entidades a relacionamentos.

2.2 GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS

2.2.1 Sistema sustentável de drenagem urbana

Durante muito tempo o objetivo principal da drenagem urbana foi remover as águas pluviais em excesso da forma mais eficiente possível para evitar transtornos, prejuízos e riscos de inundações. A partir de tal enfoque as ações concentraram-se na execução de projetos e obras e na análise econômica dos benefícios e custos dessas medidas, ditas estruturais. Medidas estruturais são necessárias e mesmo essenciais para a solução de um grande número de problemas de inundações urbanas. A experiência nacional e internacional mostra, entretanto, que tais medidas, além de onerosas, não representam por si só solução eficaz e sustentável dos problemas mais complexos de drenagem urbana (PORTO et al., 2007).

Este fato, aliado ao rápido crescimento da população urbana no país, trouxe um cenário caótico para as grandes e médias cidades. A prática do rápido escoamento das águas pluviais tem se mostrado insustentável, pois apenas age no sentido de transferir o impacto para jusante.

Diversas estratégias são necessárias para solucionar os problemas relacionados à drenagem pluvial, que não podem ser resolvidos simplesmente através da construção de grandes obras. Recentes estudos, realizados principalmente em países desenvolvidos, têm apresentado um novo conceito sobre projetos de drenagem urbana (PARKINSON et al., 2003). Trata-se do desenvolvimento sustentável da drenagem urbana, que tem o objetivo de imitar o ciclo hidrológico natural.

As estratégias de drenagem urbana sustentável incluem as ações estruturais, que consistem dos componentes físicos ou de engenharia como parte integrante da infraestrutura, e as ações não estruturais, que incluem todas as formas de atividades que envolvem as práticas de gerenciamento e mudanças de comportamento.

Os princípios envolvidos nesse novo conceito de drenagem urbana são:

- Controlar a vazão de saída: novos desenvolvimentos de atividades humanas não podem aumentar a vazão de pico das condições naturais (ou prévias);
- Planejar o conjunto da bacia para controle do volume de drenagem;

- Evitar a transferência dos impactos de escoamento das águas pluviais para jusante.

Para que esses princípios sejam implementados e para assegurar a operação sustentável dos sistemas, novos métodos de planejamento e gestão urbana são necessários. No Brasil, as agências nacionais, que influenciam a Política de Recursos Hídricos, estão reconhecendo a necessidade de se adotar os princípios da drenagem urbana sustentável, embora se reconheça que existem muitas dificuldades para a sua implementação (PARKINSON et al., 2003).

2.2.2 Gestão integrada das águas urbanas

Para buscar uma solução ambientalmente sustentável, é necessário o gerenciamento integrado da infra-estrutura urbana, iniciando-se pela definição da ocupação do espaço, com preservação das funções naturais, como a infiltração e a rede natural de escoamento. Esse tipo de desenvolvimento tem recebido a denominação de LID (*Low Impact Development*) nos Estados Unidos ou *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) na Austrália (BRASIL, 2006).

O Brasil, desde 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos com o estabelecimento da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997 – também conhecida como Lei das Águas – que adota a divisão do território brasileiro em bacias hidrográficas. Assim, inovações consubstanciadas nos princípios gerais de proteção ao meio ambiente e de desenvolvimento sustentável foram estabelecidas. A bacia passou a ser a unidade territorial de gestão dos recursos hídricos e a água a ser considerada bem de domínio público, cuja gestão deve ser descentralizada e participativa.

Em 2000, a Lei N. 9.984 criou a Agência Nacional de Águas (ANA), instituindo como sua responsabilidade a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Um dos fundamentos da PNRH é a adoção da Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento. O Plano de Recursos Hídricos da Bacia é o instrumento de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos que visa fundamentar e orientar a implementação dessa Política e estabelecer as bases para o gerenciamento integrado, descentralizado e participativo dos recursos hídricos da bacia, adequando-se à respectiva diversidade regional.

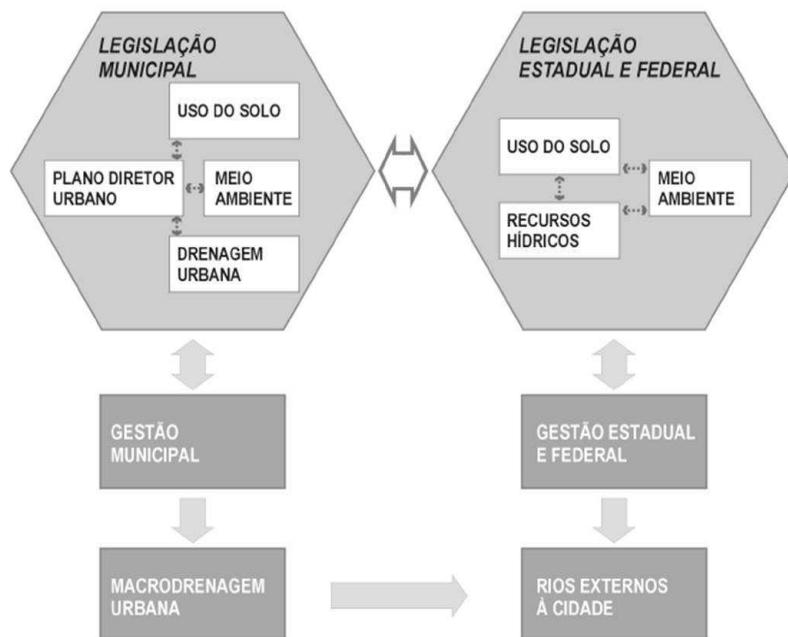
É sobre o território definido como bacia hidrográfica que se desenvolvem as atividades humanas. Todas as áreas urbanas, industriais,

agrícolas ou de preservação fazem parte de alguma bacia hidrográfica. Pode-se dizer que, no seu exutório, estarão representados todos os processos que fazem parte do seu sistema. O que ali ocorre é consequência das formas de ocupação do território e da utilização das águas que para ali convergem (PORTO; PORTO, 2008).

Soluções eficazes de drenagem urbana dependem, entre outros, dos seguintes fatores: existência de uma política para ocupação do solo urbano, devidamente articulada com a política de drenagem urbana e um processo de planejamento que contemple medidas de curto, médio e longo prazo em toda a bacia hidrográfica (PORTO et al., 2007).

No tocante à legislação e às políticas existentes para o funcionamento dos sistemas de drenagem, estão os aspectos relacionados à gestão integrada dos recursos hídricos, controle da poluição ambiental, e dotação de infraestrutura urbana (figura 10).

Figura 10 - Aspectos relacionados à gestão integrada de recursos hídricos.



Fonte: BRASIL (2006).

Fica claro que o controle dos impactos sobre os recursos hídricos, tanto qualitativa quanto quantitativamente, requer a articulação da gestão dos recursos hídricos com a gestão territorial. Ao serem

definidas as aptidões da bacia hidrográfica em seu plano e os objetivos de qualidade da água, haverá um direcionamento da gestão territorial, pois algumas atividades poderão ser incentivadas e outras reprimidas, dependendo de seu impacto sobre os recursos hídricos. Entretanto, a Constituição Federal deixou a gestão territorial quase que integralmente para apenas um dos entes federados, que é o município. Desta maneira, é muito difícil haver interferência do setor de recursos hídricos sobre a questão da ocupação do território (PORTO; PORTO, 2008).

Tudo isso deixa claro que um verdadeiro gerenciamento global dos recursos hídricos implica levar em consideração os usos múltiplos da água e os usos múltiplos do solo nas suas bacias hidrográficas, o que só será possível quando a gestão dos recursos hídricos integrar-se efetivamente à gestão global do desenvolvimento e do meio ambiente (PORTO; PORTO, 2008).

2.2.3 Impacto do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico

As alterações no processo hidrológico ocasionadas pela impermeabilização das superfícies na área urbana causam mudanças na vazão, morfologia, qualidade da água e no ecossistema dos cursos d'água (REED, 2006; WALSH et al., 2005; SHUSTER et al., 2005; DEFRIES; ESHLEMAN, 2004). Os principais resultados da alteração de uma área rural para área urbana no balanço hídrico quantitativo, segundo DEP-IPH (2005), são:

- Redução da infiltração no solo (figura 11);
- O volume que deixa de infiltrar fica na superfície, aumentando o escoamento superficial.

Além disso, como foram construídos condutos para o esgotamento das águas pluviais, é reduzido o tempo de deslocamento com velocidades maiores. Desta forma as vazões máximas também aumentam, antecipando seus picos no tempo (figura 12);

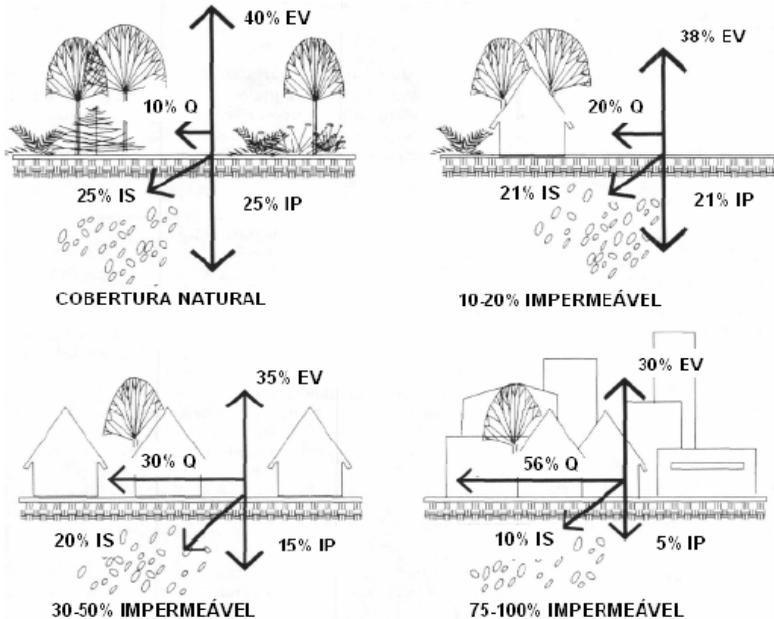
- Com a redução da infiltração, há uma redução do nível do lençol freático por falta de alimentação (principalmente quando a área urbana é muito extensa), reduzindo o escoamento subterrâneo;

- Devido à substituição da cobertura natural ocorre uma redução da evapotranspiração das folhagens e do solo, já que a superfície urbana não retém água como a cobertura vegetal.

São clássicos os exemplos que relacionam o crescimento das vazões máximas de cheias com a área urbanizada da bacia e a área servida por obras de drenagem. Há casos extremos em que os picos de

cheia numa bacia urbanizada podem chegar a ser da ordem de 6 vezes superiores ao pico da mesma bacia em condições naturais (Schueler, 1987). As enchentes urbanas são um problema crônico no Brasil (Parkinson et al., 2003).

Figura 11 - Alterações no ciclo hidrológico associadas à impermeabilização da superfície.



Legenda:

EV = Evapotranspiração

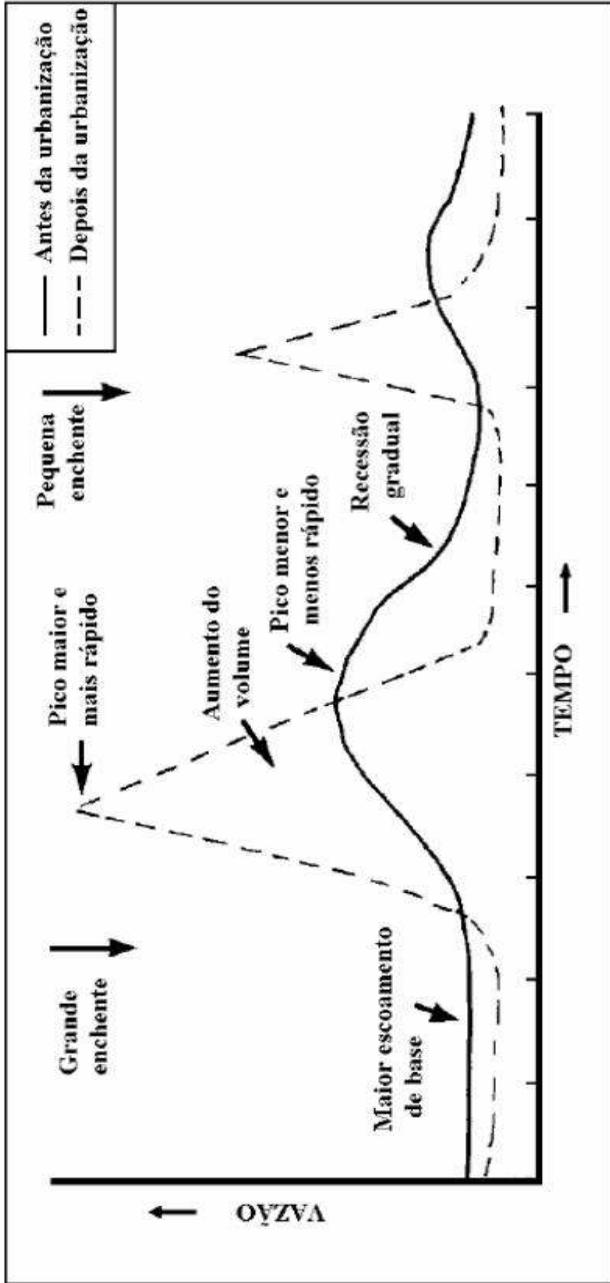
Q = Escoamento Superficial

IS = Infiltração Superficial

IP = Infiltração Profunda

FONTE: Esteves (2006).

Figura 12 - Características do balanço hídrico quantitativo resultante da transformação de uma área rural para urbana.



FONTE: adaptado de DEP-IPH (2005) e SCHUELER (1987).

2.2.4 Modelagem do Impacto das alterações em bacias hidrográficas no escoamento superficial direto

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (SILVEIRA, 2007). Das fases básicas do ciclo hidrológico, a mais relevante nas questões de drenagem é a fase do escoamento superficial, fase que trata da ocorrência e transporte do escoamento superficial direto ou precipitação efetiva. As alterações no escoamento superficial direto são uma das consequências da urbanização que mais diretamente interferem na drenagem urbana (PORTO et al., 2007).

Para a estimativa do escoamento superficial direto em locais que não possuem medição, são utilizados os modelos chuva-escoamento. Alguns modelos amplamente utilizados na modelagem chuva-escoamento incluem SCS-CN (NEH, 1985), CASC2D (DOWNER et al., 2002, MARSIK; WAYLEN, 2006), TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979), HEC-HMS (HEC 1990, 2001), KINEROS (WOOLHISER et al., 1990), GIUH (KUMAR et al., 2007). Dentre esses modelos, o método SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number), ou método do número de curva de escoamento, tem sido muito utilizado na estimativa dos impactos das alterações das características de bacias hidrográficas nas condições de escoamento superficial.

2.2.4.1 Método do número de curva do antigo serviço de conservação dos solos dos Estados Unidos (método SCS-CN)

O método do número de curva (aqui denominado SCS-CN) pode ser considerado um modelo de perda combinado, ou seja, todas as abstrações (incluindo interceptação, armazenamento em depressões, evaporação e infiltração) são levadas em consideração nos seus cálculos (KARAMOUZ et al., 2010). De acordo com Chow et al. (1988), o método pode ser aplicado para determinar o incremento na quantidade de precipitação efetiva originado pela urbanização em uma bacia hidrográfica.

A fundamentação teórica do método é discutida por Mockus (1972). Ponce e Hawkins (1996) examinaram o método criticamente e delimitaram suas capacidades, limitações e usos. McCuen (1982)

apresentou diretrizes para aplicações práticas do método em análises hidrológicas. Hawkins et al. (2009) apresentaram uma análise atualizada do método SCS-CN, discutindo suas principais aplicações e limitações. Com relação ao *status* atual, os autores concluem que o método SCS-CN vem sendo crescentemente utilizado nos círculos de engenharia e de gerenciamento (ambiental e de uso do solo).

O método SCS-CN tem como base a equação do balanço hídrico:

$$P = I_a + F + P_e \quad (1)$$

E duas hipóteses:

$$\frac{P_e}{P-I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

Onde P é a precipitação total acumulada, I_a é a abstração inicial, F é a infiltração acumulada ($F=P-I_a-P_e$), P_e é a precipitação efetiva ou escoamento superficial direto (em mm), S representa a capacidade máxima de armazenamento de água no solo e λ é o coeficiente de abstração inicial.

A relação resultante, para $P > I_a$, é a seguinte:

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P+S-I_a} \quad (4)$$

Assumindo que $I_a=0,2S$ (onde 0,2 é o valor do coeficiente de abstração inicial λ originalmente proposto pelo antigo SCS) e removendo I_a como um parâmetro independente, é possível utilizar a combinação de S e P para determinar a precipitação efetiva. Substituindo a equação 3 na equação 4, tem-se:

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (5)$$

Neste ponto, o índice S foi relacionado ao parâmetro CN, para S em polegadas, por:

$$CN = \frac{1000}{10+S} \quad (6)$$

O CN foi criado com o objetivo de relacionar os solos e a cobertura superficial do terreno para obter o valor de Q. O 10 e o 1000, da fórmula em polegadas, não tem significado intrínseco, e o CN é adimensional. Para S em milímetros, têm-se:

$$CN = \frac{25400}{254 + CN} \quad (7)$$

O CN é um parâmetro adimensional, que reflete o potencial de escoamento superficial de um determinado local. Os valores para o CN são obtidos de acordo o tipo de solo, a cobertura superficial do terreno e as condições de umidade do solo na bacia hidrográfica no momento do evento chuvoso. Teoricamente, os valores de CN podem variar de 0 a 100, mas na prática o USDA (1986) proporciona valores para coberturas permeáveis de 30 até 94. Para superfícies impermeáveis, inicialmente foi atribuído um CN=100 (SCS, 1972), que foi em seguida substituído por um CN=98. Sob as mesmas condições de precipitação, baixos valores de CN significam que a superfície tem um alto potencial de retenção de água da chuva. Valores de CN mais altos significam potencial de retenção mais baixo.

No caso de existir mais de um tipo de solo e/ou mais de uma classe de cobertura superficial do terreno em uma bacia, o valor médio ponderado do CN pode ser calculado por:

$$\overline{CN} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times CN_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (8)$$

Onde A_i representa a área de uma parte da bacia; CN_i é o CN dessa parte da bacia e n é o total de partes na qual a bacia foi dividida, originadas pela sobreposição espacial da cobertura superficial do terreno e das características hidrológicas dos solos. Hawkins et al. (2009) referem-se a essas “partes” da bacia hidrográfica como *hydrologic resource units (HRUs)*, o que será traduzido e utilizado no presente estudo como unidades de recurso hidrológico (URHs).

2.2.4.1.1 Coeficiente de abstração inicial

Com relação ao coeficiente de abstração inicial, embora o valor de $\lambda = 0,20$ seja largamente utilizado, um recente relatório do *Natural Resources Conservation Service (NRCS)* (Woodward et al., 2010) recomendou a adoção/reconhecimento de um valor de $\lambda = 0,05$ para uso

pelo NRCS. Este valor foi recomendado com base em uma considerável quantidade de estudos publicados (por exemplo, Shi et al., 2009; Jiang, 2001).

Os valores de CN para $\lambda = 0,05$ podem ser obtidos a partir dos valores de CN para $\lambda = 0,20$, por meio da equação empírica (para S em polegadas) (HAWKINS et al., 2010):

$$S_{0,05} = 1,33 \times (S_{0,20})^{1,15} \quad (9)$$

Onde $S_{0,05}$ é a capacidade máxima de armazenamento considerando $\lambda = 0,05$ e $S_{0,20}$ é a capacidade máxima de armazenamento considerando $\lambda = 0,20$. A expressão para S em milímetros é:

$$S_{0,05} = 33,782 \times (0,03937 \times S_{0,20})^{1,15} \quad (10)$$

O CN para $\lambda=0,05$ é dado pela expressão:

$$CN_{0,05} = \frac{25400}{254 + \left(33,782 \times \left(0,03937 \times \left(\frac{25400}{CN_{0,20}} - 254 \right) \right)^{1,15} \right)} \quad (11)$$

2.2.4.1.2 Classificação hidrológica dos solos

Na aplicação do método SCS-CN, os solos são classificados em quatro grupos hidrológicos, de acordo com suas características (Sartori, 2004):

Grupo A: solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areias e cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados (Taxa Mínima de Infiltração: >7,62 mm/h);

Grupo B: solos contendo moderada taxa de infiltração quando molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos, moderadamente bem drenados e com textura moderadamente fina e moderadamente grossa (Taxa Mínima de Infiltração: 3,81-7,62 mm/h);

Grupo C: solos contendo baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente com camadas que dificultam o movimento da água de camadas superiores para inferiores, com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração (Taxa Mínima de Infiltração: 1,27-3,81 mm/h);

Grupo D: solos que possuem alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, principalmente solos argilosos (Taxa Mínima de Infiltração:<1,27 mm/h).

Segundo Sartori (2010), uma das maiores dificuldades de aplicação do método SCS-CN fora do país de origem estão relacionadas com a definição dos grupos hidrológicos de solo e a falta de valores locais de referência para o parâmetro CN. As características gerais dos grupos hidrológicos de solos, inicialmente propostas para os EUA (SCS, 1972), são ainda muito usadas no Brasil. Por serem baseadas principalmente na textura dos solos elas não fornecem critérios objetivos para a sua aplicação, pois a textura não é suficiente para classificar um solo hidrológicamente. A classificação hidrológica de solos revisada do *Natural Resources Conservation Service* possui critérios claros e objetivos, mas para serem aplicados necessitam de medições de condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil de solo. No Brasil, estes dados são escassos.

Alguns estudos foram realizados no sentido de adaptar ou compreender a classificação hidrológica do solo para o Brasil. A preocupação em adaptar a classificação hidrológica do solo às características dos solos brasileiros teve início com a publicação do trabalho de Setzer e Porto (1979), no qual propunham cinco classes hidrológicas do solo para o Estado de São Paulo. Posteriormente Lombardi Neto et al. (1989) apresentaram uma nova abordagem para a classificação dos solos, no estudo sobre cálculo de espaçamento entre terraços. Mais recentemente Kutner et al. (2001) apresentaram uma classificação alternativa para a bacia do Alto Tietê com quatro grupos hidrológicos para os diversos litotipos nela ocorrentes (SARTORI et al., 2005).

Sartori (2010) propõe uma classificação hidrológica de solos alternativa para minimizar a dificuldade de classificar um solo hidrológicamente sem ter dados de condutividade hidráulica e saturada. Esta classificação é baseada em propriedades de solos disponíveis nos boletins de levantamento e na classificação dos solos, as quais podem ser usadas como substitutas para a condutividade hidráulica saturada. De acordo com essa classificação alternativa, a classificação hidrológica de alguns solos foi alterada. Segundo o autor, embora os bons resultados obtidos com a classificação hidrológica proposta suportem sua indicação para uso no Brasil, ela não está fechada, havendo possibilidades de realização de ajustes visando a melhoria de sua aplicação, como a inclusão de atributos químicos e mineralógicos nos critérios de

classificação. No entanto, para o propósito de aplicações práticas, estas melhorias se viabilizarão apenas quando as informações necessárias estiverem disponíveis nos levantamentos pedológicos e na classificação de solos.

2.2.4.1.3 Condições de escoamento antecedentes à aplicação do método SCS-CN

No método SCS-CN as condições de chuva acumulada são levadas em consideração. De acordo com a quantidade de chuva acumulada dos cinco dias anteriores à estimativa do CN ou da precipitação efetiva, classificava-se a *Antecedent Moisture Condition* (AMC) em uma das três classes possíveis (AMC-I, AMC-II ou AMC-III). Esta abordagem de chuva de cinco dias com valores pré-definidos e aplicáveis a qualquer local não é mais endossada pelo NRCS, pois as condições médias absolutas podem ser diferentes para diferentes locais. Desta maneira, o NRCS alterou o conceito de AMC para o conceito de *Antecedent Runoff Condition* (ARC), indicando que deve-se levar em consideração as características locais (como o clima, solos e cobertura superficial do terreno) para determinar os valores limites de chuva acumulada que definem as classes I, II e III. O estado ARC-II é aceito como a condição de referência e é a base para as tabelas de CN publicadas oficialmente (HAWKINS et al., 2010).

2.2.4.1.4 Observações finais acerca do método SCS-CN

Algumas das limitações do método SCS-CN são: a metodologia CN não pode responder a diferenças na intensidade da chuva; não pode prever corretamente a abstração inicial (I_a) para chuvas curtas e de maior intensidade, pois assume ' I_a ' constante; não pode ser estendido para prever corretamente padrões de infiltração em um evento de chuva; postula uma capacidade máxima de armazenamento (S), depois que toda a chuva se transformou em escoamento. A seleção de um valor de S para um evento de chuva de curta duração pode produzir resultados não satisfatórios para chuvas prolongadas.

Com relação à questão do tamanho das áreas de drenagem em que o método SCS-CN seria aplicável, Hawkins et al. (2009) argumentam que não existe afirmação direta no *National Engineering Handbook* (NEH4/630) informando valores limites. Para a realização dos estudos que originaram as primeiras tabelas de CN, o tamanho das 199 áreas de drenagem utilizadas variavam de 0,1 a 18650 ha

(aproximadamente 60% delas com tamanho entre 1,2 e 121 ha). Um dos principais critérios na seleção desses locais não foi o seu tamanho, mas sim a homogeneidade dos solos. Isto se deu, em parte, pela dificuldade existente na época relacionada à falta de ferramentas que possibilitassem a consideração da variabilidade espacial das propriedades dos solos e da cobertura superficial do terreno, o que encorajava a determinação de valores de CN concentrados (valor médio) para cada área de drenagem estudada. Apesar de não haver valores limites especificados para a aplicação do método, Hawkins et al (2009) citam que várias referências sugerem valores entre 12,95 a 259 km² (5 a 100 mi²). Autores como Boughton (1989) mencionam aplicação em áreas de drenagem entre 0,25 ha e 1000 km², enquanto outros (como USDA (1990); Ponce (1989)) sugerem limites de aplicação variando entre 100 e 5000 km². Como argumentam Hawkins et al. (2009), a questão da determinação do tamanho da bacia hidrográfica na qual um modelo ou método pode ser aplicado é uma questão geral em estudos hidrológicos, e não exclusiva ao método CN. Segundo os autores, parece não haver critérios rígidos para a limitação do tamanho das áreas de drenagem em estudos hidrológicos.

Além da questão do tamanho das áreas de drenagem, Hawkins et al. (2009) citam que, no desenvolvimento original do método SCS-CN, não foram fixados limites inferiores e superiores para valores de eventos de chuva possíveis de serem utilizados na aplicação do método. Os números de curva originalmente publicados foram desenvolvidos a partir da análise de eventos de chuva que ocorreram durante os maiores eventos de inundação anuais nos locais em estudo.

Importantes questões relacionadas à melhoria do método SCS-CN envolvem, segundo Hawkins et al. (2009): 1) a calibração de valores de CN específicos para o local em estudo, incluindo a determinação de valores de CN para tipos de cobertura superficial do terreno não indicados na bibliografia; 2) a inclusão de um coeficiente de abstração inicial mais realista, e 3) a melhoria dos dados acerca dos grupos hidrológicos de solos.

2.3 INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E MODELOS DE SIMULAÇÃO AMBIENTAL

Os SIG e os modelos de simulação ambiental começaram a ser usados conjuntamente por volta do final dos anos 1980 (BRIMICOMBE, 2010). Apesar das diferenças entre a maneira com que

os SIG e os modelos de simulação ambiental são construídos e utilizados, a necessidade de estabelecer algum nível de integração foi direcionada pelo reconhecimento de que a avaliação integrada de todos os aspectos dos ambientes físicos, bióticos, social e econômico são necessárias para se alcançarem soluções sustentáveis para um determinado problema (ASPINALL; PEARSON, 2000).

O SIG tem sido identificado como uma valiosa tecnologia para gerenciamento, análise e apresentação de dados e estatísticas, em suporte a funções de planejamento de municípios. No planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, os conceitos e tecnologias relacionados a SIG vêm sendo extensivamente utilizados e estão mudando a maneira como estas atividades são conduzidas (JOHNSON, 2009).

Como argumenta Vieux (2005), dado o caráter espacial dos parâmetros e da precipitação que controlam os processos hidrológicos, não é de se surpreender que os SIG tenham se tornado uma parte integral nos estudos hidrológicos. Os SIG permitem a integração dos dados que caracterizam a variabilidade espacial da bacia hidrográfica num único sistema, por isso num plano conceitual é possível afirmar que os SIGs são capazes de apoiar a modelagem hidrológica.

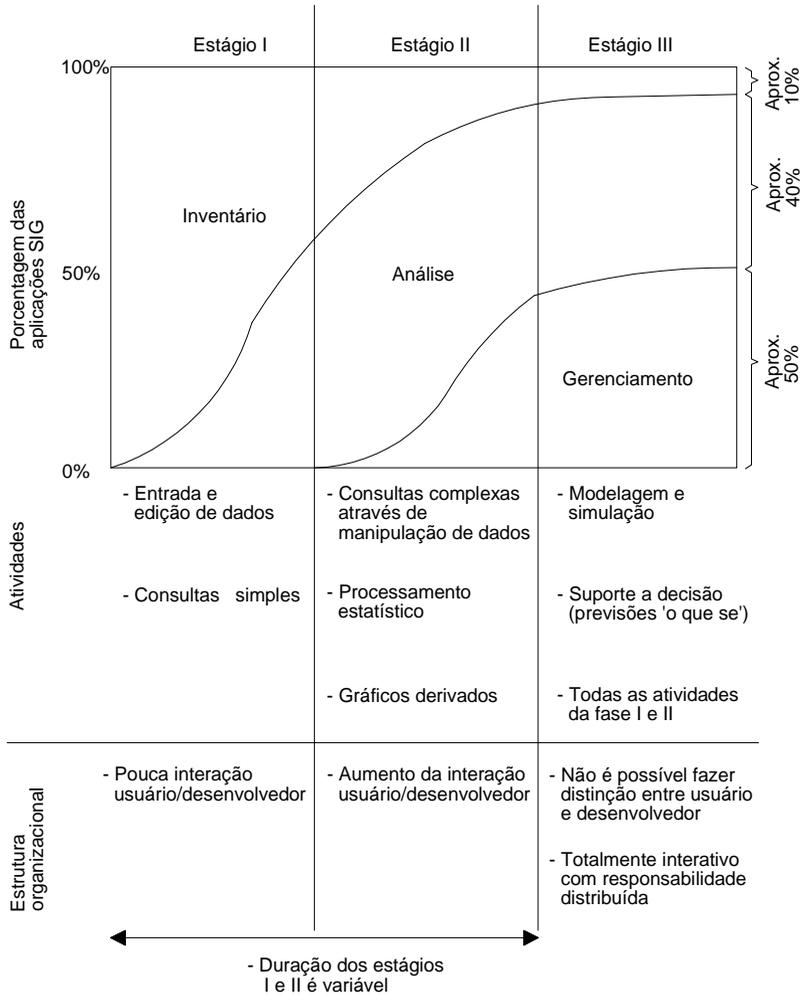
No contexto da modelagem ambiental, os SIG têm se mostrado uma plataforma ideal para a integração de dados espaciais, a estimativa de parâmetros e a visualização cartográfica, enquanto a modelagem ambiental tem possibilitado que os profissionais da área de SIG possam ir além de simples atividades de inventário e mapeamento temático (SUI; MAGGIO, 1999). Alguns dos principais usos de SIG com modelos de simulação ambiental são (MARTIN et al., 2005):

No processamento de dados espaciais, para prepará-los como entrada para modelos de simulação.

- Para auxiliar em tarefas de modelagem, tais como calibração e construção de cenários;
- No pós-processamento dos resultados de saída da simulação, para visualização e possíveis análises posteriores.
- Enquanto o papel do SIG não está limitado a estas três funções, elas são a maneira de utilização predominante.

Um aspecto importante relacionado à utilização de SIG nas atividades de modelagem ambiental é a evolução das aplicações ao longo do tempo. A figura 13 apresenta a evolução operacional dos SIG, segundo Crain e Macdonald (1984) e Brimicombe (2010).

Figura 13 - Evolução operacional de SIG.



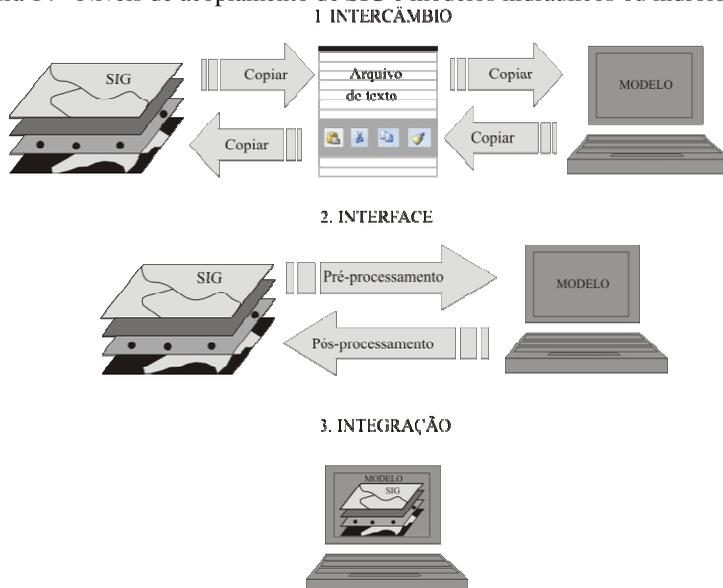
FONTE: Adaptado de Crain e Macdonald (1984) e Brimicombe, 2010.

Inicialmente, no estágio I, os SIGs foram utilizados predominantemente em aplicações relacionadas ao inventário de locais. Esses sistemas possibilitavam o armazenamento e a edição de dados e a realização de consultas simples. No estágio II dominam as aplicações voltadas à função de análise, onde as atividades passaram a englobar o processamento estatístico dos dados e a realização de consultas complexas envolvendo a manipulação dos dados armazenados. Segundo

Brimicombe (2010), a maneira predominante de utilização dos SIG atualmente nos coloca no estágio III, onde há uma predominância de aplicações voltadas ao gerenciamento, em que os SIG são utilizados para fins de modelagem e simulação e, conseqüentemente, como ferramentas de suporte à decisão.

Desde que os SIG e os modelos de simulação começaram a ser utilizados conjuntamente, tem-se proposto diversas maneiras de acoplá-los, visando à diminuição do tempo de desenvolvimento da modelagem ou a melhoria da representação espacial do ambiente modelado (CLARK, 1998; MARTIN et al, 2005; SOOD; BHAGAT, 2005). Shamsi (2005) descreve três níveis de acoplamento entre SIG e modelos (hidráulicos ou hidrológicos), ilustradas na figura 14: intercâmbio, interface e integração.

Figura 14 - Níveis de acoplamento de SIG e modelos hidráulicos ou hidrológicos



FONTE: Adaptado de Shamsi (2005).

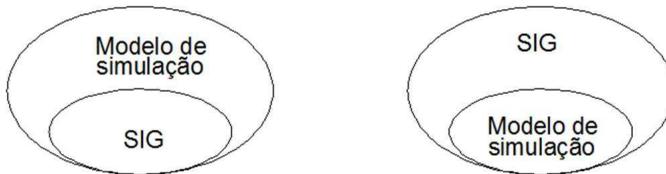
Para fazer referência às situações onde o SIG e o modelo são utilizados independentemente em um projeto, visando alcançar algum objetivo comum, autores como Fedra (1993) e Sui e Maggio (1999) citam ainda uma quarta possibilidade: independência. Este não representa realmente um nível de acoplamento. Um exemplo seria a utilização do SIG para realizar medições em mapas.

Intercâmbio: No método do intercâmbio, a troca de informações entre o SIG e o modelo ou entre o modelo e o SIG, é realizada por meio de comandos como copiar e colar.

Interface: No método da interface, o usuário estabelece uma programação para realizar a troca de informações entre o SIG e o modelo, e vice-versa. Uma interface simplesmente adiciona novos menus ou botões em um SIG, visando automatizar a transferência de dados entre o modelo computacional e o SIG. Este nível de acoplamento tende a ser implementado em situações onde necessita-se realizar uma quantidade considerável de trabalho ao longo de um determinado período de tempo.

Integração: No método da integração o SIG e o modelo estão em um formato compatível e intrinsecamente ligados. Nesse método, é possível que as funcionalidades do SIG sejam integradas a um modelo de simulação, ou que as funcionalidades do modelo de simulação sejam integradas a um SIG (figura 15).

Figura 15: Duas possibilidades de integração entre SIG e modelos de simulação ambiental



FONTE: Adaptado de Brimicombe (2010).

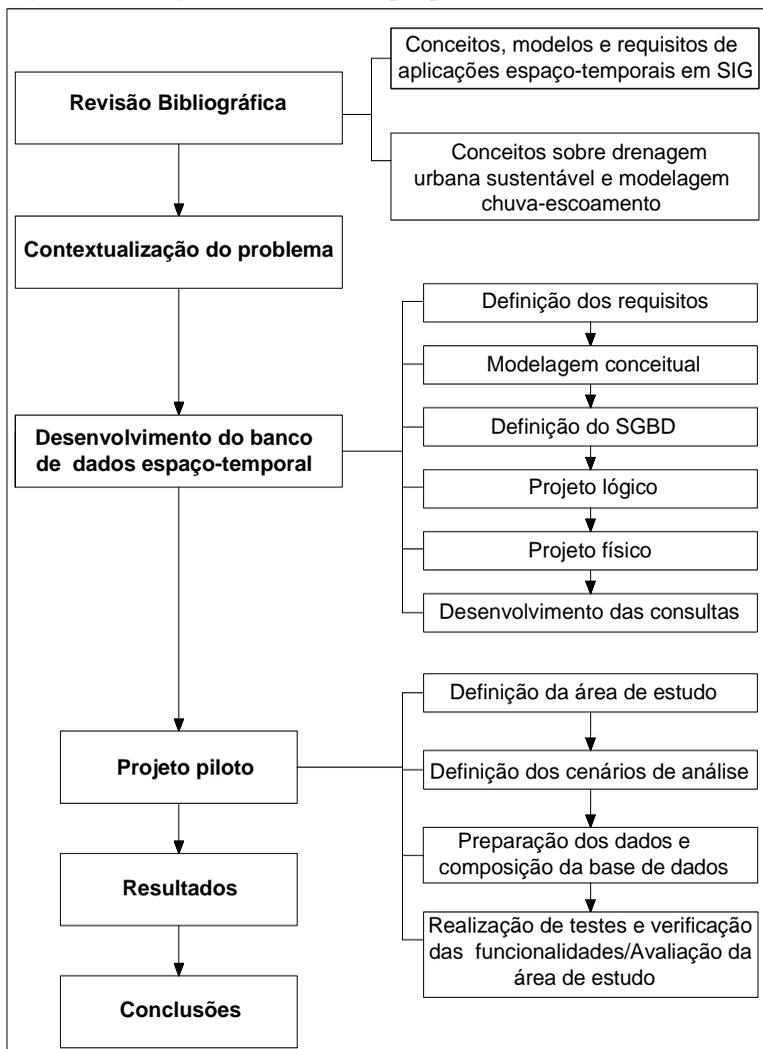
Alguns autores consideram que não há diferenças entre os níveis de integração e de interface. Entretanto, há uma considerável diferença entre utilizar o SIG e o modelo através de uma interface de usuário em comum, e ter as funcionalidades de um SIG incorporadas em um modelo ou o código do modelo incorporado em um SIG.

De acordo com Brimicombe (2010), nenhuma das opções acima pode ser considerada totalmente integrada, o que implicaria no SIG e no modelo desenvolvidos totalmente como um único produto.

3 MÉTODO

O método utilizado para o desenvolvimento da pesquisa está sintetizado na figura 16. No decorrer deste capítulo abordam-se detalhadamente cada uma das etapas envolvidas no desenvolvimento do Banco de Dados Espaço-Temporal (BDET).

Figura 16: Fluxograma do método de pesquisa



Apresenta-se, a seguir, a contextualização do problema do monitoramento das características de bacias hidrográficas e da estimativa dos impactos de sua alteração no escoamento superficial direto. Em seguida, discorre-se sobre a metodologia adotada para o desenvolvimento do BDET.

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Contextualiza-se, nesta seção, o problema do monitoramento das características de bacias hidrográficas e da estimativa dos impactos de sua alteração no escoamento superficial direto. A contextualização é apresentada sob o ponto de vista do desenvolvimento de um sistema de informação espaço-temporal, que deve contribuir para a consideração da questão da drenagem no contexto do planejamento e gestão do uso e ocupação do solo, considerando a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e gestão.

A contextualização é apresentada em duas etapas. Na primeira etapa, aborda-se a questão da verificação dos indicadores das características de bacias hidrográficas e da estimativa do escoamento superficial direto para determinado cenário. Na segunda etapa, o problema é analisado no contexto da variação espaço-temporal das características de bacias hidrográficas e de seu impacto no escoamento superficial direto.

3.1.1 Indicadores das características da bacia hidrográfica e do escoamento superficial direto em um cenário

O aumento na densificação da urbanização tem relação direta com o aumento da impermeabilização do solo, que é a causa principal do aumento das vazões da drenagem pluvial (BRASIL, 2006). A precipitação efetiva tende a acompanhar de perto a porcentagem de superfícies impermeáveis em dada bacia hidrográfica, exceto em níveis baixos de desenvolvimento de atividades humanas, nos quais a cobertura vegetal, condições do solo e fatores de declividade também influenciam o particionamento da chuva. Superfícies impermeáveis são hidrologicamente ativas, o que implica que elas geram escoamento superficial ao invés de absorver precipitação (KARAMOUZ et al., 2010). A porcentagem de impermeabilização de uma bacia hidrográfica é um indicador de paisagem que integra vários elementos que

influenciam o regime hidrológico, assim como a qualidade da água (US-EPA, 1997). Outro indicador de mudanças de paisagem é a fração coberta por vegetação. Em muitas áreas, a cobertura florestal é o parâmetro-chave, mas, em outras áreas, pastagens ou campos podem ser o parâmetro-chave.

Para o estudo do impacto das alterações das características de uma bacia hidrográfica no escoamento superficial direto, são consideradas, neste estudo, como características da bacia: a cobertura superficial do terreno, os solos, a taxa de urbanização e a taxa de impermeabilização.

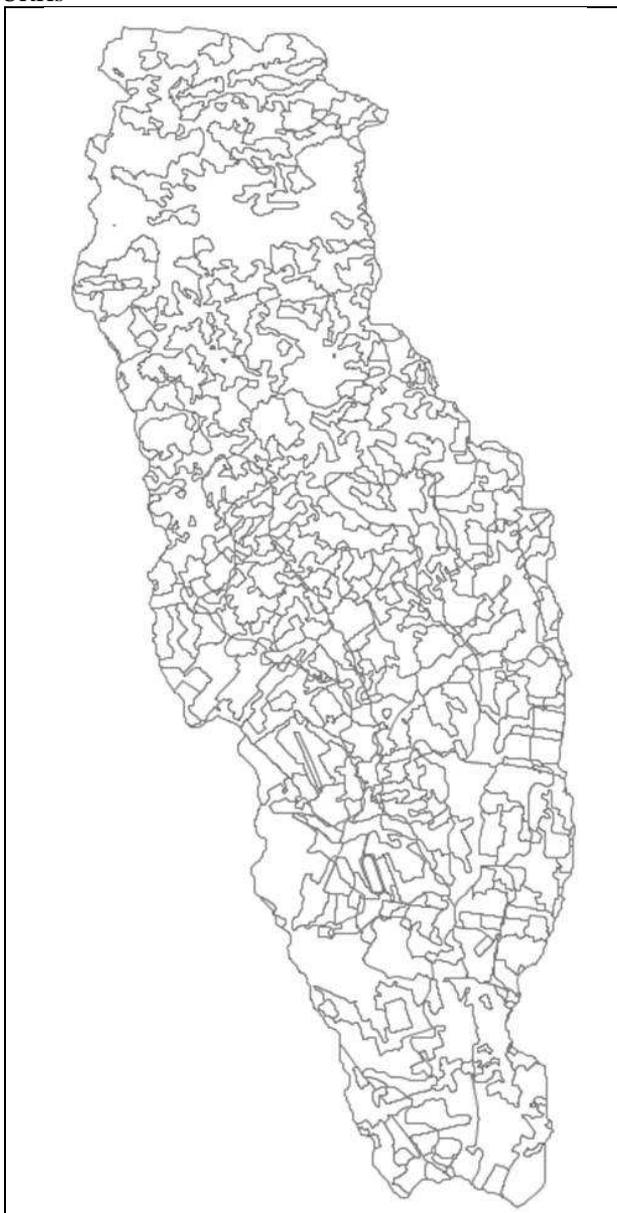
A cobertura superficial do terreno, a urbanização e a taxa de impermeabilização podem ser verificadas diretamente em mapas de cobertura superficial do terreno. Para a estimativa do escoamento superficial direto, aplica-se o método SCS-CN.

Na aplicação do método SCS-CN, a bacia é discretizada em unidades homogêneas, definidas pela combinação única de uma classe de cobertura superficial do terreno e de um grupo hidrológico de solos (como argumentam Hawkins et al. (2011), no NEH4/630, que é a referência oficial do método SCS-CN, não há um termo independente que reflita os efeitos da declividade no parâmetro CN). Essas unidades são chamadas de unidades de recursos hidrológicos (URHs). A figura 17 apresenta a bacia hidrográfica do rio Atuba discretizada em URHs. A bacia do rio Atuba, situada na região metropolitana de Curitiba, será usada como área de estudo no projeto piloto (ver item 5.1).

Um valor de CN é atribuído para cada URH, de acordo com a combinação entre a cobertura superficial do terreno e grupo hidrológico de solos existente no local. A partir desses valores, calcula-se o valor do CN médio para a bacia e/ou sub-bacias, a partir da equação 8, apresentada no capítulo 2.

Para um determinado evento de precipitação, é possível calcular o valor do escoamento superficial direto para cada URH (a partir da equação 4, apresentada no capítulo 2) e, dessa maneira, verificar a distribuição espacial do escoamento superficial direto na bacia hidrográfica.

Figura 17: A bacia hidrográfica do rio Atuba discretizada em URHs



Com os valores de precipitação efetiva de cada URH, é possível calcular o volume de escoamento superficial total (VES) produzido em uma área, a partir da equação 12:

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i \times Pe_i \quad (12)$$

Onde A_i representa a área de cada URH; Pe_i é a precipitação efetiva (ou escoamento superficial direto) nessa URH, para determinado evento de chuva; e n é o número total de URHs.

Os valores de precipitação (chuva) podem ser obtidos: a) a partir de dados advindos de estações de monitoramento (pluviômetros, pluviógrafos, radar); b) a partir de mapas de precipitação advindos de imagens obtidas por sensores instalados em satélites; ou c) calculados usando-se equações intensidade-duração-frequência (IDF) de determinada estação de monitoramento. No caso de existir mais do que uma estação de medição disponível, é possível calcular valores de precipitação média para a bacia hidrográfica. O cálculo da precipitação média pode ser realizado utilizando-se o método da média aritmética, das isoietas ou dos polígonos de Thiessen. Para possibilitar a verificação dos impactos das alterações da bacia hidrográfica nas quantidades de escoamento superficial entre dois cenários, é interessante que seja utilizado um único valor de precipitação para toda a bacia hidrográfica. A distribuição temporal da chuva pode ou não ser levada em consideração. No caso de não ser considerada, são utilizadas as precipitações acumuladas para a estimativa do escoamento superficial.

A cobertura superficial do terreno normalmente é representada a partir das classes especificadas nas tabelas publicadas pelo NRCS, ou das classes definidas em outros estudos (geralmente com base nas classes definidas pelo NRCS). Valores típicos de taxa de impermeabilização para as áreas urbanizadas podem ser obtidos na literatura (um exemplo para estudos realizados no Brasil é Tucci (1995)). A partir dos valores de impermeabilização de cada classe urbanizada, a taxa de impermeabilização média, para determinada área, pode ser obtida pela equação 13:

$$\overline{TI}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times TI_{cob}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (13)$$

Onde A_i representa a área ocupada por cada classe de cobertura superficial do terreno; TI_{cob} é o percentual de impermeabilização atribuído a cada classe de cobertura superficial do terreno; e n é o número total de polígonos referentes à cobertura superficial do terreno.

Os solos são classificados, de acordo com suas características hidrológicas, em um dos grupos hidrológicos de solos (A, B, C ou D). Segundo Ray et al. (2010), estudos sugerem que, no caso de ocorrência de urbanização, os solos podem compactar-se e comportar-se como solos do grupo D. Dessa maneira, apesar de se considerar que os tipos de solo não se alteram ao longo do tempo, é possível que ocorram alterações nas características hidrológicas de determinado tipo de solo em determinado local.

Outra questão relevante com relação aos solos é que as características hidrológicas de determinado tipo de solo nos Estados Unidos, país de origem do método SCS-CN, podem diferir das características hidrológicas do mesmo solo em outros países. Para o caso do Brasil, Sartori (2010) propõe a alteração da classificação hidrológica de alguns tipos solos. O autor argumenta que existe a possibilidade de que estudos futuros levem a outras alterações nessa classificação.

De acordo com valores de chuva acumulada nos cinco dias anteriores às estimativas do escoamento superficial, as condições de umidade em uma bacia hidrográfica são classificadas como ARC-I, ARC-II ou ARC-III. Para determinar os valores-limite de chuva acumulada que definem as classes I, II e III, deve-se levar em consideração as características do local em estudo (como clima, solos e cobertura superficial do terreno). O estado ARC-II é aceito como a condição de referência e é a base para as tabelas de CN publicadas oficialmente (HAWKINGS et al., 2010). A partir do valor do CN para condições de ARC-II, é possível obter valores de CN para condições de ARC-I e ARC-III, aplicando-se as equações 14 e 15 respectivamente, as quais são propostas por Chow et al. (1988). Essas equações foram desenvolvidas para os Estados Unidos, mas também são utilizadas em estudos realizados no Brasil (por exemplo, os estudos desenvolvidos em Nunes (2007)).

$$CN(ARC - I) = \frac{4,2 \times CN(ARC-II)}{10 - 0,058 \times CN(ARC-II)} \quad (14)$$

$$CN(ARC - III) = \frac{23 \times CN(ARC-II)}{10 + 0,13 \times CN(ARC-II)} \quad (15)$$

Para a estimativa do escoamento superficial pelo método SCS-CN, uma questão atual é a possibilidade de escolha, pelo usuário, do valor do coeficiente de abstração inicial (λ) a ser considerado na estimativa do escoamento superficial direto. Segundo Hawkins et al. (2009), o valor padrão de 0,20 é um tanto vago e tem sido objeto de críticas. Um recente relatório do NRCS recomenda a adoção de um valor de 0,05.

É interessante que seja possível verificar as condições de cobertura superficial do terreno, a taxa de impermeabilização e as condições de escoamento superficial não só no contexto da bacia hidrográfica como também para determinada sub-bacia, município ou zona de uso e ocupação do solo. Os índices definidos para as zonas de uso e ocupação do solo no plano diretor podem ser utilizados como valores de base para comparações relacionadas à impermeabilização em determinado cenário. Podem também ser utilizados no cálculo de valores que servem de base para comparações relacionadas ao escoamento superficial direto. No caso de utilizar-se a taxa de permeabilidade mínima (definida nos planos diretores para cada zona de uso e ocupação do solo), é possível calcular um valor de impermeabilização para cada município, sub-bacia ou bacias hidrográficas, a partir da média ponderada da impermeabilização máxima permissível para cada zona de uso e ocupação do solo, utilizando-se a equação:

$$\overline{TI}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times (100 - TMP_{zpd})}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (16)$$

Onde A_i representa a área ocupada por cada zona de uso e ocupação do solo; TMP_{zpd} é a taxa mínima de permeabilidade de cada uma das zonas; e n é o número total de polígonos referentes às zonas de uso e ocupação do solo existentes na área de interesse.

O escoamento superficial direto pode ser determinado para cada zona de uso e ocupação do solo, a partir da aplicação do método SCS-CN. Para tanto, é necessário definir valores de CN para cada zona. Essa definição pode ser feita considerando-se um CN composto, a partir da equação 17 (USDA, 1986):

$$CN_C = CN_P + \left(\frac{100 - TMP}{100} \right) (CN_{imp} - CN_P) \quad (17)$$

Onde CN_C é o número de curva de escoamento superficial composto; CN_p é o número de curva de escoamento relativo à área permeável (considerada como tendo condições semelhantes a pastagens em boas condições hidrológicas); TMP é a taxa de permeabilidade mínima; e CN_{imp} é o número de curva de escoamento relativo à área impermeável, considerado como sendo igual a 98.

Em síntese, a verificação dos indicadores das condições da bacia hidrográfica para um determinado cenário compreende obter respostas para às seguintes questões:

Com relação às sub-bacias:

- Onde estão localizadas as sub-bacias na bacia hidrográfica?
- Qual a área de cada sub-bacia?
- Qual a área relativa de cada sub-bacia com relação a área total da bacia hidrográfica?

Com relação aos municípios:

- Onde estão localizados os municípios na bacia hidrográfica?
- Qual o tamanho das áreas referentes a cada município na bacia?
- Qual a área relativa de cada município com relação à área total da bacia hidrográfica?
- Qual a área relativa de cada município no interior da bacia hidrográfica?

Com relação às zonas de uso e ocupação do solo:

- Qual a taxa de ocupação?
- Qual a taxa de permeabilidade mínima?

Com relação à cobertura superficial do terreno (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Qual a distribuição espacial?
- Qual a área ocupada por cada classe de cobertura superficial do terreno?

Com relação aos grupos hidrológicos de solos (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Qual a distribuição espacial?
- Qual a área ocupada por cada grupo hidrológico de solos?

Com relação à impermeabilização (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Qual a distribuição espacial da impermeabilização?
- Qual a taxa de impermeabilização média para a bacia, sub-bacia, município ou zona de uso e ocupação do solo?
- Qual a situação no cenário considerado o cenário limite de urbanização?
- Qual a situação em um determinado cenário com relação ao cenário considerado o cenário limite de urbanização?

Com relação ao parâmetro CN:

- Qual o CN médio de uma sub-bacia?
- Qual o CN médio na bacia hidrográfica, em um determinado cenário?

Com relação ao volume de escoamento superficial (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Qual o volume de escoamento superficial total produzido?
- Qual a situação com relação ao cenário considerado o cenário limite de urbanização?

Relação entre o estado da bacia e o volume de escoamento superficial (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Qual o volume de escoamento superficial produzido por cada classe de cobertura superficial do terreno, em cada grupo hidrológico de solos (GHS)?
- Qual o volume de escoamento superficial produzido pelas áreas urbanizadas, em cada GHS?
- Qual o volume de escoamento superficial produzido pelas áreas não urbanizadas, em cada GHS?

3.1.2 Variação espaço-temporal das características de uma bacia hidrográfica e seus impactos no escoamento superficial

Na consideração da variação espaço-temporal das características da bacia hidrográfica e de seus impactos nas estimativas de escoamento superficial, parte-se do entendimento de que, para a mesma condição de precipitação, de ARC e de λ , as mudanças nas características da bacia podem alterar seu potencial de armazenamento, levando à alteração nas quantidades relacionadas ao escoamento superficial direto.

Em uma aplicação espaço-temporal, a mudança no estado de uma ou mais localizações, entidades, ou ambas, é chamada de evento. Nesse contexto, pode-se dizer que, para um mesmo valor de precipitação acumulada, as quantidades de escoamento superficial geradas em uma bacia hidrográfica são alteradas em função de eventos, que, por sua vez, alteram o estado da bacia hidrográfica.

As quantificações e comparações podem se dar em nível de bacia, sub-bacia, municípios ou zonas de uso e ocupação do solo, levando-se em consideração os diferentes grupos hidrológicos de solos.

Em síntese, a verificação das alterações nas características da bacia hidrográfica e seus impactos no escoamento superficial direto entre dois cenários, envolve responder as seguintes questões:

Com relação às sub-bacias:

- Houve alteração nas sub-bacias? Quais foram as alterações e onde ocorreram?

Com relação aos municípios:

- Houve alteração nos municípios? Quais foram as alterações e onde ocorreram?

Com relação às zonas de uso e ocupação do solo:

- Houve alteração? Quais foram as alterações e onde ocorreram?

Com relação à cobertura superficial do terreno (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Houve alterações? Quais foram as alterações e onde ocorreram?
- Houve alterações nas áreas urbanizadas? Quais foram as alterações e onde ocorreram?
- Houve alterações nas áreas não urbanizadas? Quais foram as alterações e onde ocorreram?
- Houve densificação nas áreas urbanizadas? Onde ocorreu?

- O que ocorrerá se houver determinado evento? Qual será a nova condição de cobertura superficial do terreno?

Com relação aos grupos hidrológicos de solos (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Houve alteração? Quais foram as alterações e onde ocorreram?
- O que ocorrerá se houver determinado evento?

Com relação à impermeabilização (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Houve diferença na distribuição espacial? Quais foram, onde ocorreram e por quê?
- Houve alteração na taxa de impermeabilização média? Quanto alterou e porque ocorreu?
- Quais as consequências de um determinado evento?

Com relação ao escoamento superficial direto:

- Houve alteração? Onde ocorreram?
- Considerando as mesmas condições de precipitação acumulada e de umidade antecedente, houve alterações no escoamento superficial direto? Quais foram as alterações, onde e porque ocorreram?
- Existem áreas onde houve aumento no escoamento superficial direto? Quais são essas áreas? Quais eram os valores em cada cenário? Por que ocorreu o aumento?
- Existem áreas onde houve redução no escoamento superficial direto? Quais são essas áreas? Quais eram os valores em cada cenário? Por que ocorreu a redução?
- Existem áreas onde a precipitação efetiva não foi alterada? Quais são essas áreas?

Com relação ao parâmetro CN:

- Houve alteração no CN médio das sub-bacias? Por quê?
- Houve alteração no CN médio da bacia hidrográfica? Por quê?
- Se ocorrer um determinado evento, quais serão os novos valores de CN médio?

Com relação ao volume de escoamento superficial (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Houve alteração no volume de escoamento superficial? De quanto foi e por que ocorreu?
- Qual o volume de escoamento superficial produzido nas áreas onde houve aumento no escoamento superficial direto? Qual a diferença no volume de escoamento superficial, nessas áreas, entre dois cenários?
- Qual o volume de escoamento superficial produzido nas áreas onde houve redução no escoamento superficial direto? Qual a diferença no volume de escoamento superficial, nessas áreas, entre dois cenários?
- Qual o volume de escoamento superficial produzido nas áreas onde não houve alteração no escoamento superficial direto?
- Se ocorrer determinado evento, quais serão os novos valores referentes ao volume de escoamento superficial?

Relação entre características da bacia hidrográfica e volume de escoamento superficial (no contexto da bacia hidrográfica, sub-bacias, áreas referentes a municípios ou zonas de uso e ocupação do solo):

- Qual a diferença entre o volume de escoamento superficial produzido por cada classe de cobertura superficial do terreno?
- Qual a diferença entre o volume de escoamento superficial produzido pelas áreas urbanizadas?
- Qual a diferença entre o volume de escoamento superficial produzido pelas áreas não urbanizadas?
- Qual a diferença entre o volume de escoamento superficial produzido em cada grupo hidrológico de solos?

A partir dessa breve contextualização, definiu-se que a principal premissa para o desenvolvimento do BDET é que as características da bacia hidrográfica são alteradas em função de eventos, que, por sua vez, alteram o estado de uma ou mais entidades, modificando, assim, as condições de escoamento superficial na bacia. Dessa maneira, é interessante que se possa verificar as condições das características da bacia hidrográfica e do escoamento superficial direto a partir dos eventos para qualquer estado das entidades, e que seja possível relacionar as alterações entre dois estados aos eventos que as ocasionaram.

Para permitir que sejam realizadas verificações das situações passadas e presente (considerando também cenários alternativos) e verificações de cenários futuros, os eventos considerados neste trabalho estão relacionados aos seguintes pontos:

- Alteração na cobertura superficial do terreno;
- Alteração na taxa de impermeabilização relacionada à determinada classe de cobertura superficial do terreno;
- Ocorrência de um levantamento em que é gerado um novo cenário completo da bacia hidrográfica;
- Publicação de estudos que proponham alterações na classificação hidrológica dos solos; e
- Alteração na legislação referente às zonas de uso e ocupação do solo (com relação a sua geometria ou à taxa de permeabilidade mínima), o que altera os valores máximos admissíveis para a taxa de impermeabilização e para o escoamento superficial direto.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO BANCO DE DADOS

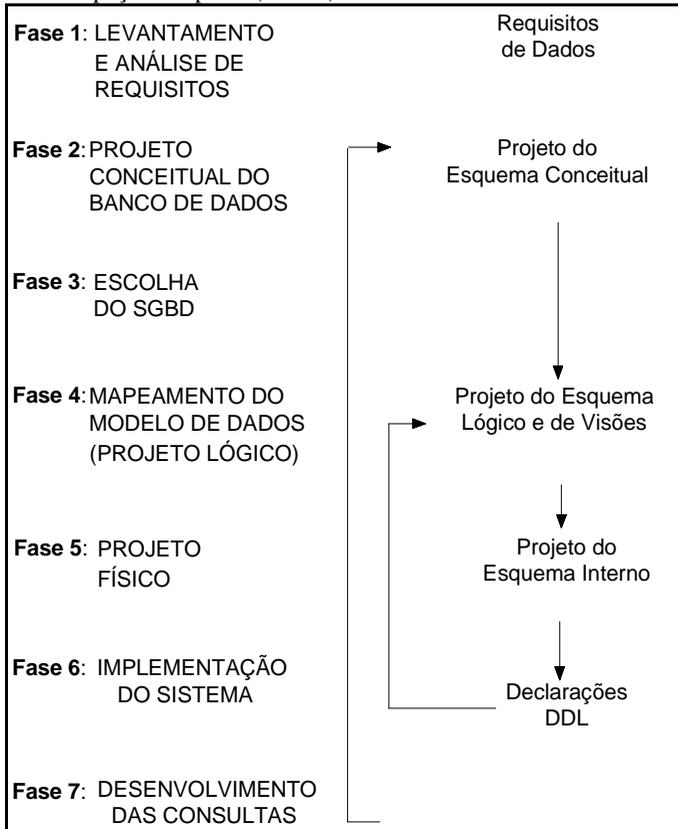
O desenvolvimento do banco de dados é uma das tarefas mais importantes na construção de um sistema de informação (ELMASRI e NAVATHE, 2005). Métodos formais para análise de banco de dados proporcionam princípios fundamentais e etapas bem definidas visando uma melhora na eficiência do processo de desenvolvimento do banco de dados e na qualidade dos resultados. Um método formal de análise e projeto é um conjunto de diretrizes e regras para capturar a semântica da realidade do usuário e construir um banco de dados que a suporte. A modelagem é a base para a análise e o projeto de banco de dados (BÉDARD, 2005). Os modelos de análise e projeto determinam o que pode ser feito facilmente, feito com dificuldade ou não pode ser feito, uma vez que o sistema tenha sido implementado.

No contexto de banco de dados, a análise é a ação de entender e descrever o que o usuário necessita para seu banco de dados. O resultado da análise é uma especificação formal e detalhada dos requisitos do banco de dados. Projeto pode ser definido como a ação de definir como os resultados das análises serão implementados na tecnologia selecionada. Neste contexto, modelos são representações formais de algo que necessita ser entendido, lembrado, comunicado e testado. Os modelos são construídos em um determinado nível de

abstração para incluir somente o que é relevante para o sistema em desenvolvimento (BÉDARD, 2005).

Nesta pesquisa, o processo de desenvolvimento do banco de dados seguiu as seis fases principais do projeto e do processo de implementação de um banco de dados, definidas por Elmasri e Navathe (2005), ilustrados na figura 18: a) levantamento e análise de requisitos; b) projeto conceitual do banco de dados; c) escolha de um SGBD; d) mapeamento do modelo de dados (projeto lógico do banco de dados); e) projeto físico do banco de dados; f) implementação do sistema de banco de dados. Acrescentou-se o desenvolvimento das consultas como uma sétima fase nesse processo.

Figura 18: As fases envolvidas no desenvolvimento do Banco de Dados Espaço-Temporal (BDET).



FONTE: Adaptado de Elmasri e Navathe (2005).

3.2.1 Levantamento e análise dos requisitos

Os requisitos a que o BDET deve satisfazer foram definidos com base na contextualização do problema e nas funções de um SIG com características temporais, definidas por Langran (1992).

3.2.2 Modelagem conceitual

Os modelos conceituais têm como papel primário representar o significado do domínio de aplicação tão fiel quanto possível (WORBOYS, 2005a). Eles representam como a realidade do usuário é organizada em termos de objetos, propriedades, relacionamentos e processos. Assim, esses modelos focam na perspectiva do usuário e no poder de expressão semântico.

O modelo conceitual foi desenvolvido visando contemplar os requisitos apresentados no item anterior e proporcionar respostas às questões levantadas na contextualização do problema.

A modelagem conceitual do banco de dados foi realizada utilizando o modelo Entidade-Relacionamento (ER), que é um modelo de dados conceitual de alto nível largamente empregado (ELMASRI; NAVATHE, 2005).

3.2.3 Escolha do SGBD

Os requisitos levados em consideração na escolha do SGBD foram: possuir extensão espacial; ser um software gratuito; possuir sólida documentação; estar sendo usado com sucesso em empreendimentos; que vislumbre a continuidade de utilização e desenvolvimento da tecnologia.

O sistema gerenciador de bancos de dados (SGBD) escolhido para implementar o banco de dados espaço-temporal foi o PostgreSQL, que é um sistema gerenciador de banco de dados objeto-relacional (SGBDOR), desenvolvido com base no POSTGRES versão 4.2, desenvolvido pelo Departamento de Ciência da Computação da Universidade da Califórnia em Berkeley (PostgreSQL, 2005). Esse SGBD adota a linguagem SQL, que é a linguagem adotada pela maioria dos SGBD's relacionais ou objeto-relacionais. A linguagem SQL

fornece funções de recuperação e atualização de dados, além da criação, manutenção da estrutura de dados e controle do ambiente do BD.

A extensão espacial do PostgreSQL é chamada de PostGIS. O PostGIS consiste em uma livreria gratuita e de código fonte aberto que habilita o PostgreSQL a trabalhar com dados espaciais, proporcionando mais de 300 operadores espaciais, funções espaciais, tipo de dados espaciais e funcionalidades de indexação espacial (OBE; HSU, 2010).

No PostGIS se inclui:

Tipos de geometria para pontos, linhas, polígonos, multipontos, multilinhas, multipolígonos e coleção de geometrias;

Operadores espaciais para realizar medições geo-espaciais como área, distância, tamanho e perímetro;

Operadores espaciais para realizar conjuntos de operações espaciais, como união, diferença, diferença simétrica e “buffers”.

Uma das vantagens de se trabalhar com o PostGIS é a possibilidade de criar visões das análises espaciais, tornando os resultados das análises dinâmicas em função dos dados de entrada utilizados. Uma visão não é fisicamente materializada. Ao invés disso, a consulta é feita toda vez que a visão é referenciada em uma consulta.

A linguagem *Spatial SQL*, desenvolvida por Egenhofer (1994), representa um exemplo de linguagem de consulta espacial baseada em SQL. *Spatial SQL* divide-se em duas sublinguagens, uma para consulta e outra para apresentação de objetos espaciais, buscando aproximar-se da forma como os seres humanos conceitualizam o espaço geográfico. A sublinguagem de consulta estende o SQL com operadores e relacionamentos espaciais. Distingue-se de outras extensões por preservar os conceitos de SQL e por conseguir um tratamento de alto nível dos objetos espaciais (CASTRO, 2007). As expressões em *Spatial SQL* determinam os relacionamentos espaciais (como distância e adjacência) e as operações espaciais (área, tamanho, interseção, união e “buffer”).

3.2.4 Projeto lógico

Os modelos lógicos são os modelos nos quais os sistemas de banco de dados são construídos (WORBOYS, 2005a). Visam primariamente a facilidade de tratamento e a compatibilidade com a tecnologia existente.

A fase de projeto lógico consistiu no mapeamento do modelo conceitual para o Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD)

PostgreSQL (com sua extensão espacial PostGIS). O resultado do projeto lógico foi um esquema do banco de dados no modelo de dados de implementação do SGBD.

O projeto lógico foi desenvolvido utilizando o software MicroOLAP Database Design for PostgreSQL, que é um sistema de projeto de banco de dados que integra projeto, modelagem, criação e manutenção em um único ambiente. Inicialmente foram definidas as estruturas das tabelas que compõem o banco de dados e, logo após foi realizada a normalização. Segundo Carleton et al. (2005), a normalização de dados pode ser considerada uma maneira de organizar os dados no banco visando aumentar a eficiência do armazenamento e das consultas. O processo de *normalização* consiste na análise das relações para aumentar as formas normais estritas, levando a agrupamentos de atributos progressivamente melhores. As formas normais são especificadas em termos de dependências funcionais – que são identificadas pelo projetista do banco de dados – e de atributos-chave dos esquemas de relação.

Ao final do processo de normalização, adotou-se as medidas informais indicadas em Elmasri e Navathe (2005) para mensurar a qualidade do projeto de esquema de relação: análise da semântica dos atributos, redução dos valores redundantes nas tuplas, redução de valores *null* nas tuplas, impedimento para a geração de valores ilegítimos nas tuplas.

3.2.5 Projeto físico

Na fase de projeto físico, a estrutura definida no projeto lógico foi mapeada para o SGBD PostgreSQL. Utilizando linguagem SQL e SQL Spatial, foram desenvolvidos os *scripts* para a criação das tabelas e restrições definidas na fase de projeto lógico.

Os softwares utilizados na fase de projeto físico foram o pgAdmin III e o RazorSQL. É importante destacar que o *script* (em SQL) utilizado para criação das tabelas, para a definição das chaves primárias e das chaves estrangeiras foi parcialmente gerado no programa *MicroOlap Database Designer for PostgreSQL*.

Foi criado um esquema adicional no SGBD, o esquema resultados, para armazenar todas as tabelas e visões relacionadas às consultas desenvolvidas. Desta maneira, os dados originais e os dados derivados ficaram em esquemas separados, o que contribuiu para a

organização do banco de dados e para melhorar a segurança dos dados originais.

3.2.6 Desenvolvimento das consultas

As consultas foram desenvolvidas utilizando linguagem SQL e SQL spatial. Uma consulta em SQL pode conter mais de seis cláusulas, porém, somente as duas primeiras são obrigatórias – SELECT e FROM. As cláusulas são especificadas na seguinte ordem (as cláusulas entre colchetes são opcionais):

<i>SELECT</i>	<i><atributos e lista de funções></i>
<i>FROM</i>	<i><lista de tabelas></i>
<i>[WHERE</i>	<i><condição>]</i>
<i>[GROUP BY</i>	<i><atributo(s) agrupado(s)></i>
<i>[HAVING</i>	<i><condição de agrupamento>]</i>
<i>[ORDER BY</i>	<i><lista de atributos>]</i>

A cláusula SELECT relaciona os atributos ou as funções que serão recuperados. A cláusula FROM especifica todas as relações (tabelas) necessárias à consulta, incluindo as relações que serão compostas pela junção, mas não as usadas em consultas aninhadas. A cláusula WHERE especifica as condições para a seleção de tuplas das relações, incluindo as condições para as junções, se necessário. A cláusula GROUP BY estabelece os atributos de agrupamento, embora a cláusula HAVING especifique uma condição sobre os grupos que estão sendo selecionados em vez de condições sobre as tuplas individualmente. As funções construtoras das funções agregadas COUNT, SUM, MIN, MAX e AVG são utilizadas em conjunto com o agrupamento, ainda que também possam ser aplicadas sobre todas as tuplas selecionadas em uma consulta sem a cláusula GROUP BY. Finalmente, ORDER BY especifica uma ordenação para a apresentação do resultado da consulta.

3.2.7 Implementação do banco de dados – projeto piloto

Após o desenvolvimento do BDET, a próxima etapa da pesquisa foi a realização de um projeto piloto, que teve como objetivos validar o

modelo lógico, verificar a integridade do BDET e verificar a efetividade do BDET em retornar resultados satisfatórios às consultas desenvolvidas, além de realizar uma análise da evolução da urbanização e do escoamento superficial direto na área de estudo. O projeto piloto compreendeu quatro etapas: 1) a definição da área de estudo, a definição dos cenários de análise; 2) a preparação dos dados e composição (população) do banco de dados e; 3) a verificação das funcionalidades do banco de dados espaço-temporal e a análise da área de estudo.

4 DESENVOLVIMENTO DO BANCO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL

4.1 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS

Com base na contextualização apresentada na seção anterior e nas funções de um SIG com características temporais definidas por Langran (1992), os seguintes requisitos foram identificados para o desenvolvimento do banco de dados espaço-temporal:

- Proporcionar as seguintes funções de uma aplicação espaço-temporal em SIG: inventário, atualização, apresentação e análise.
- Ter o tempo como base organizacional e possibilitar que as mudanças na cobertura superficial do terreno, solos e zonas de uso e ocupação do solo sejam tratadas como eventos;
- Possibilitar a representação do tempo considerando variação discreta;
- Tratar o presente, passado e futuro e permitir a existência de realidades alternativas;
- Permitir o registro do tempo de validade das mudanças e dos eventos;
- Modelo de dados com base em objetos e representação vetorial das entidades geográficas;
- Armazenar as diferentes versões que os dados espaciais e alfanuméricos relevantes ao estudo proposto apresentem ao longo do tempo;
- Recuperar o estado da bacia hidrográfica em uma determinada data;
- Recuperar a história, em um determinado intervalo de tempo: da bacia hidrográfica, de uma sub-bacia, de um município ou das zonas de uso e ocupação do solo;
- Possibilitar a verificação em um dado cenário: das características da bacia hidrográfica, das condições de escoamento superficial direto, da relação ‘características da bacia/escoamento superficial’;
- Possibilitar a verificação entre dois cenários: das alterações nas características da bacia hidrográfica e seu impacto no escoamento superficial direto;

- Com relação aos eventos: manter o registro de todos os eventos ocorridos e simulados na bacia; possibilitar a listagem de todos os eventos e verificar as mudanças associadas com cada evento; possibilitar a verificação de quais alterações nas características da bacia hidrográfica estão relacionadas a cada evento; possibilitar a associação das mudanças no escoamento superficial direto aos eventos que as ocasionaram;
- Com relação às verificações e simulações: manter o registro das simulações realizadas para a bacia hidrográfica; relacionar as simulações aos eventos ocorridos na bacia;
- Possibilitar a utilização de diferentes condições de ARC e de coeficiente de abstração inicial para a estimativa do CN e do escoamento superficial direto.

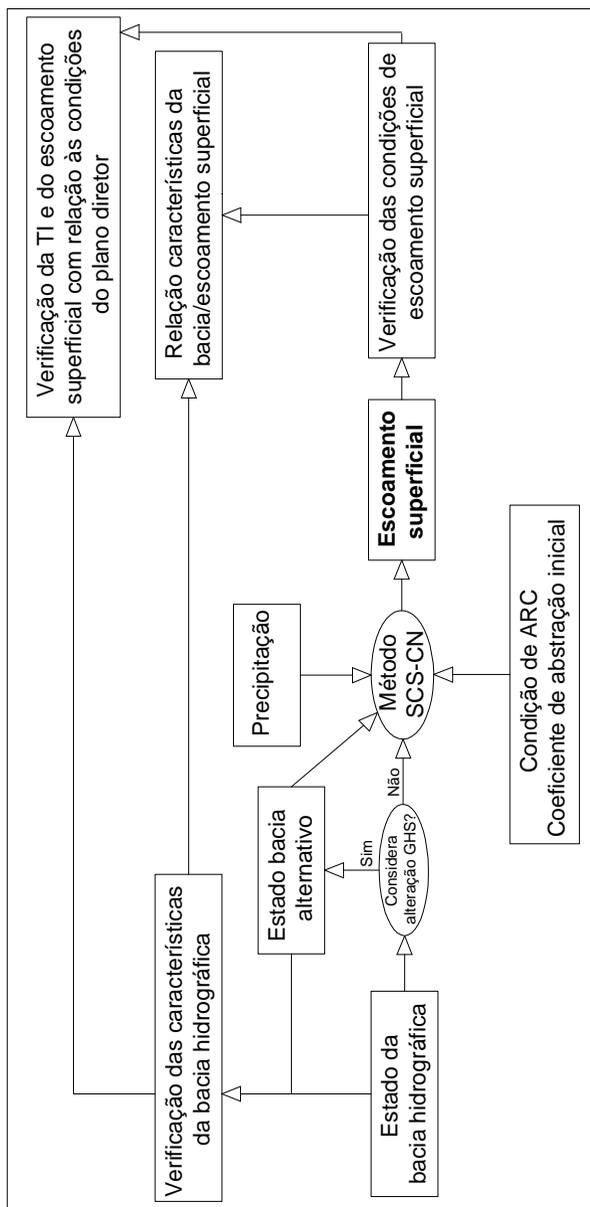
4.2 MODELAGEM CONCEITUAL

O modelo conceitual foi desenvolvido com base na análise semântica das variáveis envolvidas na verificação das características da bacia hidrográfica e da estimativa do escoamento superficial direto, e também nos requisitos definidos na seção anterior, procurando viabilizar a obtenção de respostas às questões identificadas na contextualização do problema.

Para o desenvolvimento do modelo conceitual é importante ter claro não só a realidade que se quer representar em meio computacional e os requisitos a serem atendidos, mas também a maneira como o sistema irá trabalhar. Nesse sentido, apresenta-se a seguir a metodologia adotada para a verificação das características da bacia hidrográfica e para a estimativa do escoamento superficial direto. Inicialmente, considera-se a verificação em um determinado cenário e, logo após, a verificação entre dois cenários.

Na figura 19, apresentam-se as etapas envolvidas na verificação das características em uma bacia hidrográfica e na estimativa do escoamento superficial direto em um determinado cenário.

Figura 19: Etapas envolvidas na verificação das características da bacia hidrográfica e na estimativa do escoamento superficial direto. TI é a taxa de impermeabilização.



Inicialmente, deve-se definir se a questão da alteração nas características hidrológicas dos solos, causada pela urbanização, será considerada. Em caso afirmativo, deve ser gerado um estado alternativo da bacia hidrográfica, em que os solos pertencentes aos grupos A, B e C são reclassificados para o grupo hidrológico de solos D, nos locais que se apresentam urbanizados. Em caso negativo, estima-se o escoamento superficial direto utilizando os mapas de solos e de cobertura superficial do terreno, já armazenados no banco de dados.

Após, se verificam as condições da bacia hidrográfica, com relação as suas características. Essa verificação compreende: a) a visualização da distribuição espacial da cobertura superficial do terreno, da impermeabilização e dos grupos hidrológicos de solos; b) a quantificação das áreas ocupadas por cada classe de cobertura superficial do terreno e de grupo hidrológico de solos; c) a quantificação das áreas urbanizadas e não urbanizadas; d) a determinação de valores médios de impermeabilização para as áreas de interesse (no caso, a bacia hidrográfica, uma sub-bacia, um município ou uma zona de uso e ocupação do solo).

Em seguida, define-se qual o valor de precipitação acumulada armazenado no banco de dados e qual valor do coeficiente de abstração inicial serão utilizados, e define-se para qual condição de ARC a estimativa do escoamento superficial direto será realizada. Com base nessas definições aplica-se o método SCS-CN para estimar o valor do escoamento superficial direto.

A próxima etapa consiste em verificar as condições de escoamento superficial, que envolve: a) determinar o valor do CN e do escoamento superficial direto em cada URH; b) verificar a distribuição espacial do CN e do escoamento superficial direto; c) calcular valores médios de CN para a bacia ou sub-bacias; e c) calcular o volume de escoamento superficial para as áreas de interesse (a bacia, uma sub-bacia, um município ou uma zona de uso e ocupação do solo).

Logo após, realiza-se a comparação dos valores de taxa de impermeabilização e escoamento superficial direto de um determinado cenário com o cenário de plano diretor – considerado como a situação limite para esses valores.

Em seguida, verifica-se a relação entre as características da bacia hidrográfica e as condições de escoamento superficial direto. Essa verificação compreende a determinação dos volumes de escoamento

produzidos em cada classe de cobertura superficial do terreno e em cada grupo hidrológico de solos.

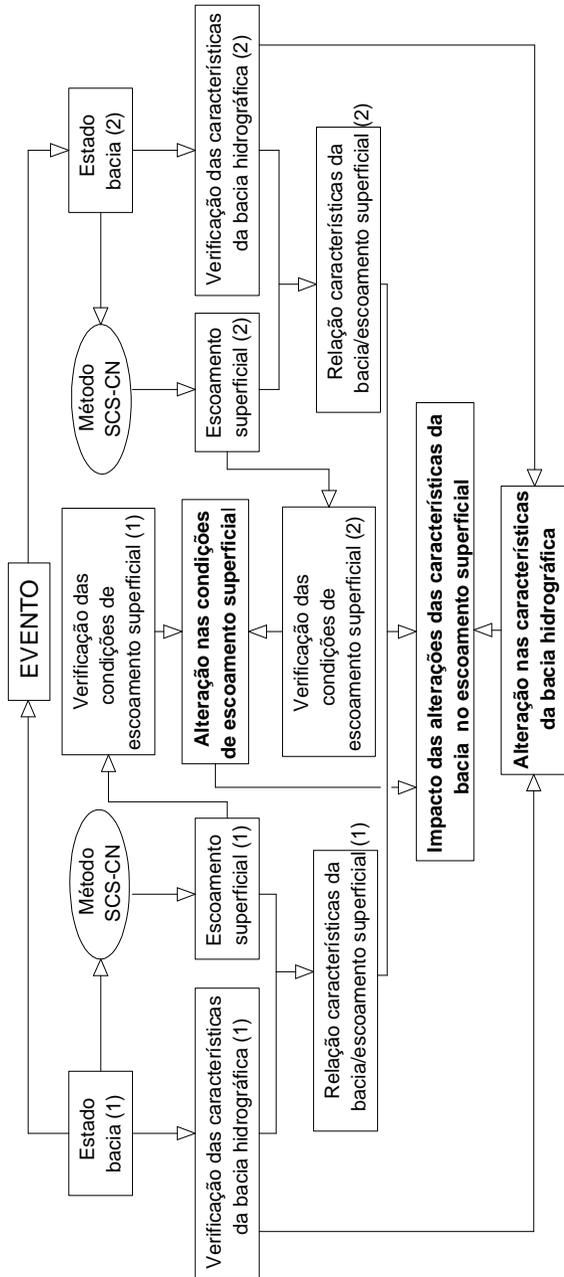
Conforme apresentado na contextualização do problema, a ocorrência de um evento leva a mudanças nas características da bacia hidrográfica, o que altera o seu potencial de retenção, alterando as quantidades de escoamento superficial direto produzidas em um determinado evento de precipitação. A figura 20 ilustra o processo de verificação das alterações nas características da bacia hidrográfica e de estimativa do impacto dessas alterações no escoamento superficial direto entre dois cenários, considerando os mesmos valores de precipitação acumulada (Pac) e coeficiente de abstração inicial (λ) e mesma condição de escoamento superficial antecedente (ARC).

A verificação das alterações nas características da bacia hidrográfica compreende a comparação, entre dois cenários: a) da distribuição espacial da cobertura superficial do terreno, grupo hidrológico de solos e impermeabilização; b) das áreas ocupadas por cada classe de cobertura superficial do terreno e grupo hidrológico de solos; e c) dos valores médios de impermeabilização para as áreas de interesse. A partir dessas comparações é possível verificar, por exemplo, onde ocorreram os maiores aumentos na urbanização e na impermeabilização.

A verificação das alterações no escoamento superficial direto compreende a comparação das suas condições, entre dois cenários. São comparados: a) os valores de CN médio em cada área de interesse, b) a distribuição espacial do escoamento superficial direto, c) os volumes de escoamento superficial produzidos em cada área de interesse e d) os volumes de escoamento superficial produzidos nos locais onde houve aumento ou redução no escoamento superficial direto. A partir dessas comparações é possível verificar, por exemplo, qual município apresentou o maior aumento no volume de escoamento superficial entre dois cenários.

A verificação do impacto das alterações nas características da bacia hidrográfica no escoamento superficial direto se dá pela comparação da relação 'características da bacia/escoamento superficial' entre os dois cenários, considerando ainda a verificação das alterações nas características da bacia hidrográfica e a verificação das alterações no escoamento superficial direto.

Figura 20: O processo de verificação das alterações nas características da bacia hidrográfica e de estimativa de seu impacto no escoamento superficial direto.



A relação entre as alterações nas características da bacia hidrográfica e as alterações no escoamento superficial direto permite que se quantifique as alterações nas características da bacia hidrográfica e seus efeitos no aumento global do escoamento superficial direto, entre os dois cenários. É possível verificar, por exemplo, qual a alteração na área ocupada por cada classe de cobertura superficial do terreno e de quanto foi o aumento no volume de escoamento superficial entre dois cenários.

A comparação da relação ‘características da bacia hidrográfica/escoamento superficial’ entre os dois cenários possibilita um estudo mais detalhado. Pode-se verificar, por exemplo, a diferença entre os volumes de escoamento superficial produzidos em cada classe de cobertura superficial do terreno ou grupo hidrológico de solos, entre os dois cenários.

Além da definição da maneira como o BDET deve trabalhar, outra questão importante para o desenvolvimento do modelo conceitual diz respeito a maneira como se dará a integração entre o BDET e o modelo de simulação do escoamento superficial direto. Como apresentado na revisão bibliográfica, existe uma diferença entre realizar a modelagem ‘dentro do SIG’ e realizar a modelagem ‘com o SIG’. No primeiro caso, a modelagem é realizada totalmente dentro do SIG. No segundo caso, a modelagem é realizada externamente ao SIG, utilizando um software específico para a modelagem. No contexto do presente trabalho, a modelagem do escoamento superficial direto é realizada diretamente no SIG (no caso, o BDET), utilizando os operadores disponíveis no próprio banco de dados, por meio de consultas em linguagem SQL e *Spatial SQL*. Não há o intercâmbio de dados entre o SIG e um *software* de modelagem.

Definidos a maneira com o BDET irá trabalhar, os requisitos a que deve atender, quais respostas deve proporcionar e como se dará a integração entre o BDET e o modelo de simulação, a próxima etapa no processo de modelagem conceitual foi a definição da abordagem a ser utilizada com relação à representação espaço-temporal.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, os modelos de dados espaço-temporais determinam a maneira e a eficiência com que os dados podem ser acessados e manipulados. Em abordagens que modelam o estado do mundo real como um cenário, é simples recuperar o estado de um local em dado momento, mas difícil consultar as mudanças que ocorreram entre duas datas. Em abordagens que modelam

mudanças, é mais fácil recuperar as mudanças que ocorreram entre duas datas do que o estado de um local em determinado momento. Para abordagens com base em entidade, a história de uma única entidade é mais fácil de ser traçada do que a história referente a determinado local. Em abordagens com base em localização, é simples traçar a história de um local. Abordagens combinadas ou integradas podem ser eficientes para recuperar a história de determinado local, entidade e/ou tempo (por exemplo, a data).

Com base nestas considerações, optou-se por adotar uma abordagem combinada para o desenvolvimento do BDET, que é mais flexível quanto ao acesso aos dados, apesar de ser mais complexa e requerer mais espaço de armazenamento, quando comparada às outras abordagens citadas. Para organizar as alterações que ocorrem ao longo do tempo nas características da bacia hidrográfica, adotou-se uma abordagem com base no tempo. Para a estrutura de armazenamento das entidades espaço-temporais, adotou-se a abordagem com base em objeto.

Com relação à abordagem que tem como base o tempo, optou-se por não adotar um modelo de dados espaço-temporal específico (como o ESTDM), mas sim os conceitos gerais relacionados a essa abordagem. Mais especificamente, adotou-se o conceito de localização no tempo como a base organizacional primária para registrar as mudanças. Em outras palavras, as mudanças relativas ao tempo são explicitamente armazenadas. A sequência de eventos ao longo do tempo, representando a manifestação espaço-temporal de algum processo, é percebida via uma linha do tempo ou vetor temporal, isto é, uma linha ao longo de uma única dimensão no tempo, ao invés de uma superfície bidimensional no espaço. O evento geralmente representa uma mudança no estado (isto é, mudança em alguma propriedade, atributo, valor) de uma entidade, uma localização, ou conjunto de entidades ou localizações (PEUQUET; DUAN, 1995). Desta maneira, a linha do tempo representa uma progressão de mudanças conhecidas ao longo do tempo, partindo de alguma data inicial para outra data posterior.

O Modelo Objeto Espaço-Temporal (*Spatio-Temporal Object Model – STOM*) foi utilizado para representar as entidades com características espaço-temporais. Este modelo foi escolhido levando em consideração os tipos de consultas que seriam realizadas com mais frequência. Apesar de ser necessário utilizar o BDET para verificar as mudanças nas entidades ao longo do tempo, a modelagem do escoamento superficial direto requer cenários completos da bacia hidrográfica em estudo. Desta maneira, optou-se por não utilizar as

abordagens que armazenam as mudanças que ocorrem ao longo do tempo, devido principalmente à complexidade e ao tempo de realização das consultas envolvidas no processo de recuperação de um cenário específico, além da possibilidade do surgimento de inconsistência e erros no cenário completo resultante, o que refletiria nos resultados finais das verificações e simulações realizadas.

O Modelo Objeto Espaço-Temporal apresenta uma estrutura hierárquica de objetos e átomos espaço-temporais discretos. Um objeto espaço-temporal é um agregado de átomos espaço-temporais, a menor unidade espacialmente homogênea representada no modelo. Cada versão de um objeto espaço-temporal é conhecida como uma instância espaço-temporal (*ST-instance – spatio-temporal instance*) desse objeto. Cada instância é associada a um intervalo, que é o tempo de validade no qual um objeto espaço-temporal apresenta uma determinada configuração de geometria e valores de atributos. Com essa estrutura, a composição espacial de um fenômeno geográfico pode ser explicitamente registrada ao longo do tempo. Como cada versão de um objeto tem o seu período de validade registrado, é possível definir um conjunto válido de objetos para um determinado instante ou intervalo temporal.

Após a definição de todas as questões pertinentes, procedeu-se o desenvolvimento do diagrama entidade-relacionamento (E-R). Para fins de apresentação, o diagrama originalmente desenvolvido foi dividido em três diagramas entidade-relacionamento (E-R):

- Diagrama de bacia hidrográfica;
- Diagrama de eventos;
- Diagrama de verificação das características da bacia hidrográfica e de simulação do escoamento superficial.

Para facilitar a representação e o entendimento dos diagramas, os atributos e alguns dos relacionamentos foram omitidos.

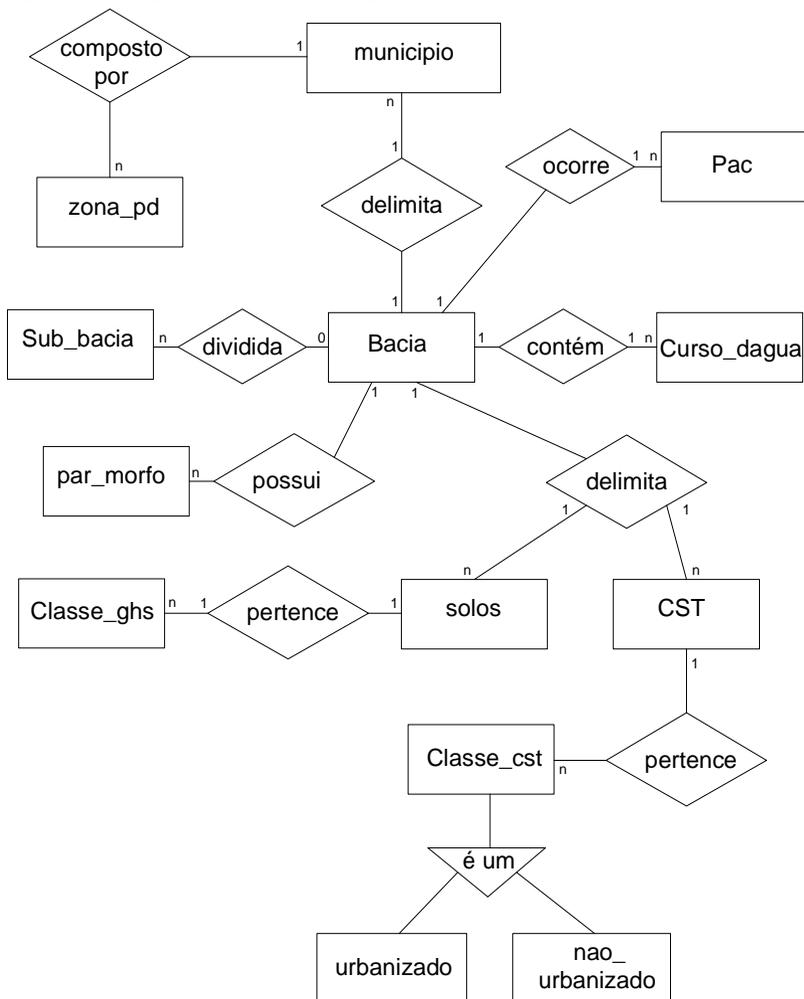
a) Descrição do diagrama da bacia hidrográfica

O diagrama da bacia hidrográfica é apresentado na figura 21.

Uma bacia hidrográfica pode ser definida como um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus tributários, limitada pelo divisor de águas (CONCAR, 2007). A bacia hidrográfica é representada pela entidade *Bacia*. É uma entidade discreta (possui identidade e

localização conhecidas). Possui somente um domínio espacial, seus limites e propriedades geométricas não se alteram com o tempo.

Figura 21: Diagrama da bacia hidrográfica.



A bacia hidrográfica contém o rio principal e seus afluentes, representados pela entidade *curso_dagua*. Essa é uma entidade discreta. Possui domínio espacial e temporal, seus limites e propriedades geométricas podem se alterar ao longo do tempo.

Uma bacia pode ser subdividida em sub-bacias, que são as áreas de drenagem de determinados rios afluentes. A entidade *Sub-Bacia* é uma entidade discreta e é representada pelo modelo de dados objeto. Possui domínio espacial e temporal, seus limites e propriedades geométricas podem se alterar com o tempo.

A cobertura superficial do terreno é um fenômeno contínuo, delimitado pela área da bacia-hidrográfica e é representada pela entidade *CST*. Sendo assim, poderia ser representada espacialmente pelo modelo de dados campo. Entretanto, para ser possível determinar valores relativos ao escoamento superficial, é preciso ser possível determinar a área abrangida por cada tipo de cobertura superficial do terreno. Para tanto, é necessário que as unidades estejam discretizadas. Por este motivo, optou-se por representar essa entidade pelo modelo de dados objeto. São dados que possuem domínio espacial e temporal, seus limites e propriedades geométricas podem se alterar com o tempo, resultado da dinâmica de ocupação da bacia hidrográfica.

A entidade *classe_cst* pertence à entidade *CST*. Esta entidade possui os seguintes atributos: *tipo_cst*, que define o tipo de cobertura superficial do terreno e *TI*, que armazena a taxa de impermeabilização característica de cada classe. Essa entidade é especializada em *urbanizado* e *nao_urbanizado*.

Os solos, classificados de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS), são representados pela entidade *solos*. A distribuição dos solos na bacia hidrográfica é um fenômeno contínuo, delimitado pela área da bacia hidrográfica. Da mesma maneira que a cobertura superficial do terreno, optou-se por representar a entidade *solos* pelo modelo de dados objeto. A entidade *solos* possui domínio temporal, seus atributos podem se alterar com o tempo, resultado da dinâmica de ocupação da bacia hidrográfica ou da realização de estudos que verifiquem a necessidade de alteração na classificação hidrológica dos solos.

A entidade *classe_ghs* pertence a entidade *solos*. Esta entidade possui como atributo os grupos hidrológicos de solos.

Os municípios são representados pela entidade *município*. Um município é definido como a unidade de menor hierarquia dentro da organização político-administrativa do Brasil, criado através de leis ordinárias das Assembleias Legislativas de cada Unidade da Federação e sancionadas pelo Governador. A entidade *município* possui domínio espacial e temporal. Seus atributos e geometria podem se alterar ao longo do tempo. Essa entidade é representada pelo modelo de dados objeto. Um município é identificado pelo seu geocódigo, que é o código

criado pelo IBGE para identificar as unidades político administrativas da divisão territorial brasileira e suas subdivisões operacionais (setor censitário), compondo chave única das unidades de coleta, apuração e disseminação de dados estatísticos e territoriais.

As zonas de uso e ocupação do solo são representadas pela entidade *zona_pd*. Essa entidade é representada pelo modelo de dados objeto. A entidade *zona_pd* possui domínio espacial e temporal. Seus atributos e geometria podem se alterar ao longo do tempo.

A precipitação que ocorre na bacia hidrográfica é representada pela entidade *Pac*. Essa entidade não possui domínio espacial nem temporal. É representada por um valor de atributo. Podem existir diversos valores de precipitação registrados para uma determinada bacia hidrográfica. Para possibilitar a verificação dos impactos das alterações da bacia hidrográfica nas quantidades de escoamento superficial entre dois cenários, é considerado um valor único de precipitação, para toda a bacia hidrográfica. Cada precipitação armazenada contém a informação de sua origem (se obtida a partir de dados de estações de monitoramento, a partir de mapas de precipitação ou calculadas usando equações intensidade-duração-frequência – IDF).

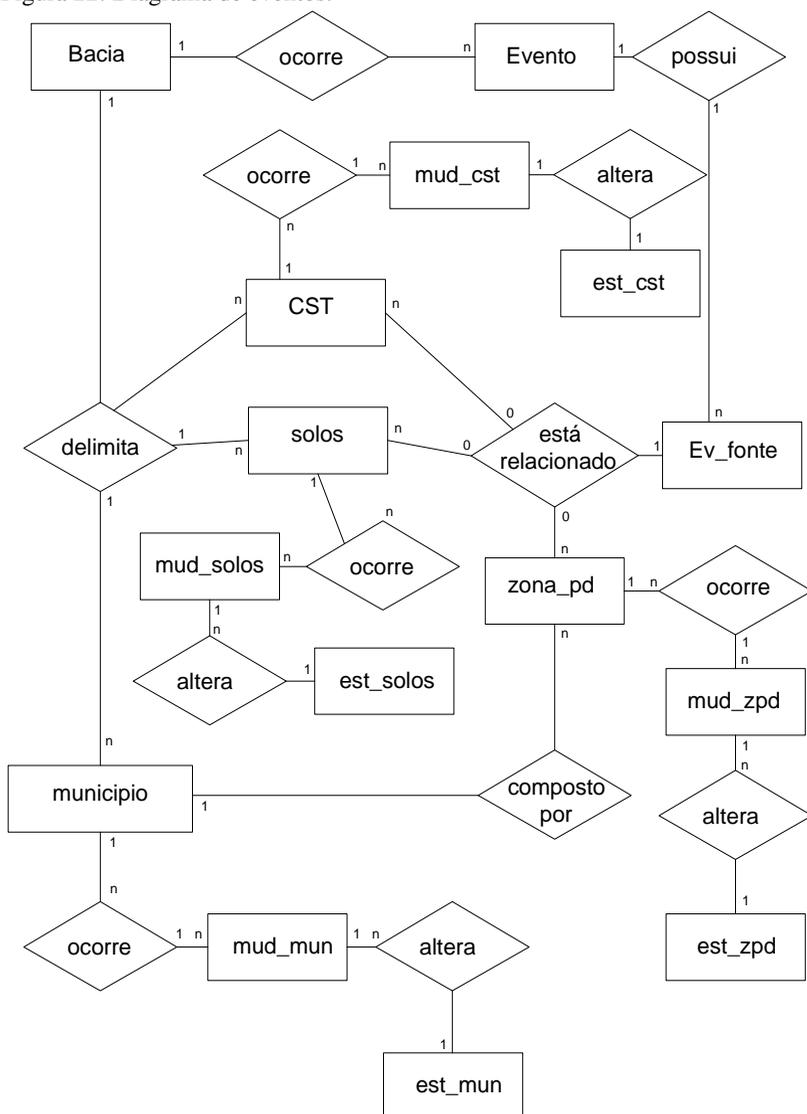
A heterogeneidade espacial na bacia hidrográfica é representada em três classes hierárquicas. A bacia hidrográfica (1), a sub-bacia (2) e as unidades de recurso hidrológico (URH). Como as URHs são obtidas pela combinação da cobertura superficial do terreno e dos solos, elas não são armazenadas no banco de dados e, conseqüentemente, não estão representadas no modelo conceitual. Sempre que necessário, as URHs são definidas a partir de uma operação de sobreposição espacial entre a cobertura superficial do terreno e os solos, válidos no instante ou intervalo temporal especificado.

b) Descrição do diagrama de eventos

O diagrama de eventos é apresentado na figura 22.

As alterações nas características da bacia hidrográfica e no escoamento superficial direto podem ser determinadas pelos eventos relacionados aos agentes envolvidos na sua determinação. A entidade *Evento* possui a descrição dos eventos que alteram as condições do escoamento superficial direto na bacia hidrográfica, ou as condições limites admissíveis. O evento é um dado temporal, pois possui somente o domínio temporal (neste caso a data de ocorrência). Esta entidade não é ordenada temporalmente, admitindo o cadastramento de eventos presentes, passados e futuros.

Figura 22: Diagrama de eventos.



A entidade *Evento_Fonte* relaciona o evento com as entidades envolvidas na ocorrência desse evento. Contém uma notação específica

da mudança ocorrida. As entidades relacionadas aos eventos são: *CST*, *solos* e *zona_pd*.

Os eventos considerados neste trabalho são únicos, ou seja, ocorrem uma única vez e de forma instantânea, não têm duração nem periodicidade. Embora as mudanças ocorridas na cobertura superficial do terreno e solos possam ser graduais, não são quantificadas constantemente, sendo conhecidas a partir de levantamentos realizados com algum intervalo de tempo, e serão tratadas como repentinas. Um evento pode ser relativo a apenas uma ou a várias mudanças, e pode, desta maneira, estar relacionado às mudanças referentes a diversas entidades.

Além dos eventos que ocorrem na bacia, são registradas também a ocorrência de mudanças nas entidades de interesse. Dessa maneira, as mudanças nas entidades *solos*, *CST*, *município*, *sub-bacia* e *zona_pd* são representadas pelas entidades *mud_solos*, *mud_cst*, *mud_mun*, *mud_sb* e *mud_zpd*, respectivamente. Essas entidades possuem somente domínio temporal, armazenam a data de ocorrência da mudança e a causa da mudança.

As mudanças que ocorrem nas entidades alteram o estado dessas entidades. Essas alterações também são registradas no BDET. Os estados das entidades *solos*, *CST*, *município*, *sub-bacia* e *zona_pd* são representadas pelas entidades *est_solos*, *est_cst*, *est_mun*, *est_sb* e *est_zpd*, respectivamente. Essas entidades possuem somente domínio temporal, armazenam a data inicial e a data final de validade de cada estado apresentado pela entidade.

c) Descrição do diagrama de verificação das características da bacia hidrográfica e simulação do escoamento superficial direto

O diagrama de verificação das características da bacia hidrográfica e simulação do escoamento superficial direto é apresentado na figura 23.

Para se conhecer os valores relacionados às características da bacia hidrográfica e ao escoamento superficial direto na bacia hidrográfica em um determinado cenário, são realizadas verificações e simulações, representadas pela entidade *verif_simula*.

A verificação das características da bacia hidrográfica e a simulação do escoamento superficial direto podem ser realizados com base nos estados das entidades que influenciam esses valores, ou com base nos eventos que ocorrem na bacia e são responsáveis pela alteração no estado de uma ou mais dessas entidades. A entidade *verif_simula* possibilita essa definição, além de definir a precipitação, a condição de ARC, o coeficiente de escoamento superficial e se a alteração das características hidrológicas dos solos com a ocorrência de urbanização será ou não considerada. Armazena ainda a data de realização da verificação e simulação.

A entidade *ARC* armazena as condições de ARC, a entidade *coefai* armazena os valores de coeficiente de abstração inicial. A entidade *cond_ghs* armazena as duas possibilidades com relação à alteração nas características hidrológicas dos solos, ou seja, se as alterações na urbanização causam ou não, alteração nas características hidrológicas dos solos.

Podem existir diversas verificações e simulações para a bacia hidrográfica, suas sub-bacias, municípios ou zonas de uso e ocupação do solo, possibilitando a análise da influência de diversas configurações referentes aos cenários de cobertura superficial do terreno, características hidrológicas dos solos e zonas de uso e ocupação do solo nas condições de escoamento superficial direto. Os resultados da verificação e simulação são armazenados através do relacionamento *caracver_escsim* (características da bacia hidrográfica verificadas e escoamento superficial direto simulado).

4.3 PROJETO LÓGICO

Após a modelagem conceitual do banco de dados, foi realizado o projeto lógico. A estruturação das tabelas do projeto lógico foi realizada levando em consideração os tipos de dados de cada entidade. As entidades foram divididas em:

- Entidades sem representação espacial;
- Entidades com dados espaciais e/ou espaço-temporais;

a) Entidades sem representação espacial

Para as entidades sem representação espacial, as tabelas foram estruturadas de acordo com o quadro 4. Para os dados que possuem variação ao longo do tempo, foi adicionada uma coluna que armazena o momento de aquisição do dado, ou duas colunas que registram o intervalo de validade (data inicial e a data final) de determinado valor. Utilizou-se o rótulo ‘-infinity’ para especificar a data inicial de uma instância de uma entidade quando não existe a informação sobre a sua data inicial e o rótulo ‘infinity’ para especificar a data final das instâncias das entidades válidas atualmente. Exemplo desse tipo de entidade são as entidades *evento* e *pac* (precipitação).

Quadro 4: Armazenamento de dados sem representação espacial.

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3
Atributos	Atributos	Atributos

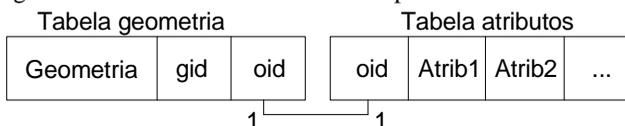
b) Entidades que possuem dados espaciais e espaço-temporais

Para as entidades que possuem dados espaciais ou espaço-temporais, as tabelas foram estruturadas seguindo a proposta de Ferreira et al. (2005), considerando o modelo Objeto Espaço-temporal de Worboys (1994). No entanto, foram realizadas algumas alterações na estruturação proposta pelos autores, visando evitar o armazenamento redundante de dados nas entidades que apresentam alteração no atributo ou na geometria e no atributo.

b1) Entidades que possuem dados espaciais estáticos

Para representar as entidades que possuem dados espaciais estáticos, as tabelas foram estruturadas de acordo com a figura 24. Nessa estrutura, as entidades são armazenadas em duas tabelas. Uma tabela armazena a geometria e a outra seus atributos alfanuméricos. Essas tabelas são relacionadas através de uma chave estrangeira.

Figura 24: Armazenamento de dados espaciais estáticos.



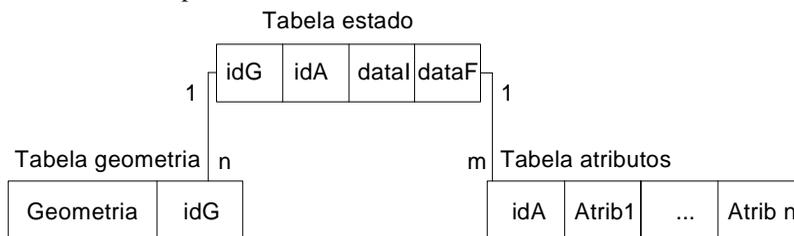
Esta alternativa permite a existência de mais de um atributo para cada entidade. Destaca-se por sua flexibilidade, apesar de exigir a navegação entre tabelas ou a realização de operações de junção para que se possa resgatar a estrutura completa de cada objeto geográfico (Ferreira et al., 2005).

b2) Entidades que possuem dados espaço-temporais

As entidades que possuem dados espaço-temporais podem apresentar variação: somente na geometria, somente nos atributos, na geometria e nos atributos.

Para as entidades que possuem alteração apenas na geometria, como é o caso da cobertura superficial do terreno, as tabelas foram estruturadas como mostra a figura 25.

Figura 25: Armazenamento de dados espaço-temporais cujos atributos não variam com o tempo.

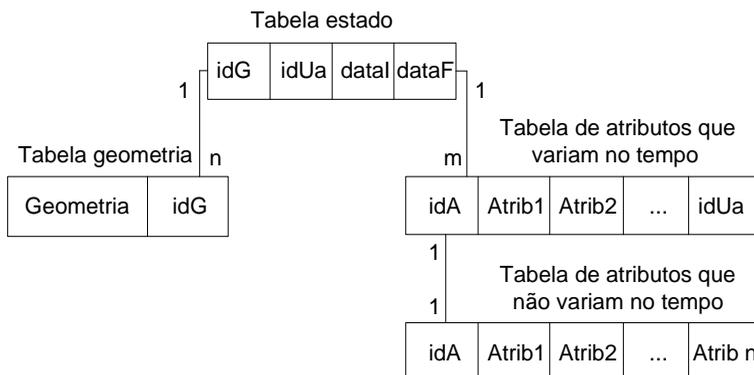


Essa estrutura consiste na implementação de três tabelas. A primeira tabela armazena a geometria da entidade, a segunda armazena o atributo. A terceira tabela viabiliza um relacionamento n:m entre representações geométricas e atributos alfanuméricos, tornando possível relacioná-los de acordo com a necessidade. Essa tabela contém duas chaves estrangeiras (a da tabela geometria e a da tabela atributos) que, juntas, compõem a chave primária da entidade. Essa tabela registra ainda o intervalo de validade das instâncias de cada objeto que compõe a entidade.

Para as entidades que podem sofrer alteração na geometria e nos atributos, ou apenas nos atributos, como é o caso das zonas de uso e ocupação do solo, as tabelas foram estruturadas como mostra a figura 26.

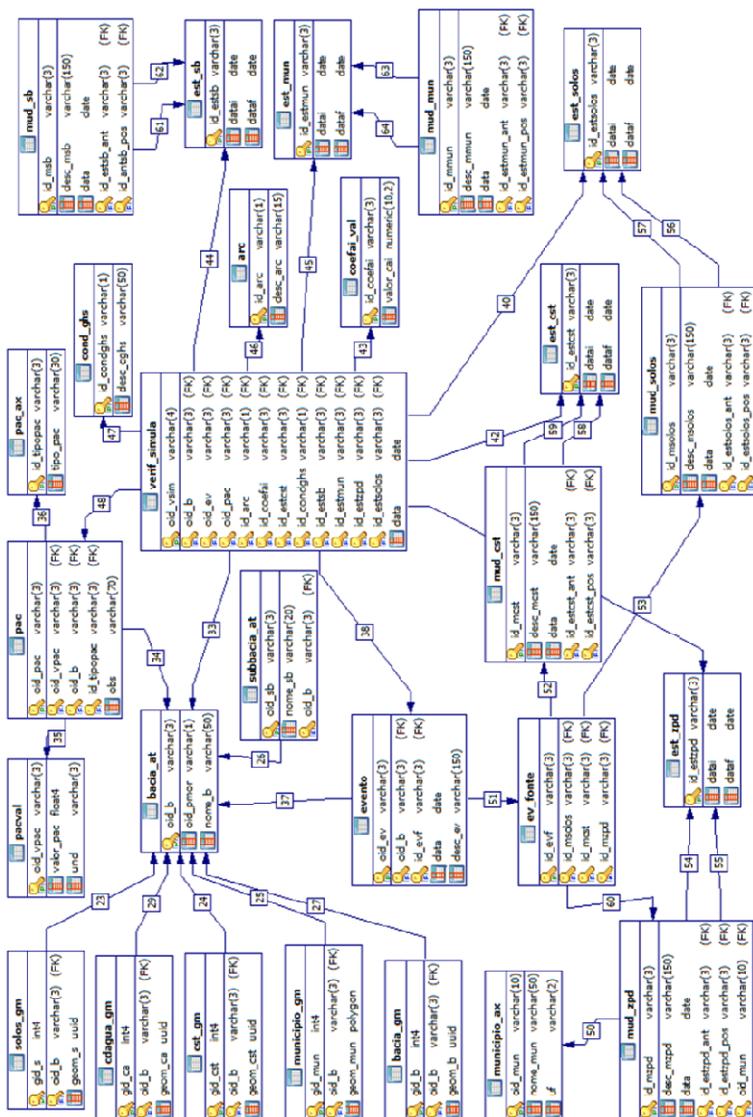
Na tabela de atributos que variam no tempo, se introduziu um identificador único (idUa) em cada relação de atributo. Este identificador permite a distinção entre diferentes instâncias de um atributo para uma determinada entidade. Como é possível que uma entidade tenha tanto sua geometria quanto seus atributos alterados, a tabela estado mapeia todas as instâncias da geometria (identificada pelo campo idG) para uma instância de valores dos atributos (identificada pelo campo idUa). Cada mapeamento tem um intervalo válido associado (identificado pelos campos dataI e dataF). Da mesma maneira que para os objetos que apresentam variação somente na geometria, a tabela estado contém duas chaves estrangeiras (a da tabela geometria e a da tabela atributos) que, juntas, compõem a chave primária da entidade.

Figura 26: Armazenamento de dados espaço-temporais.



Para fins de apresentação, dividiu-se o projeto lógico do BDET em dois diagramas, apresentados nas figuras 27 e 28.

Figura 28: Diagrama do projeto lógico – eventos e simulações.



4.4 PROJETO FÍSICO

Na fase de projeto físico foram escritos os *scripts*, em SQL, para a criação de todas as tabelas definidas no projeto lógico e para implementação dos relacionamentos entre as tabelas. Exemplos dos principais *scripts* criados são apresentados a seguir.

Criação de tabela:

```
CREATE TABLE "bacia_at" (
    "oid_b" varchar(3) NOT NULL,
    "oid_pmor" varchar(1),
    "nome_b" varchar(50) NOT NULL,
    PRIMARY KEY("oid_b"))
WITH (OIDS = False);
```

Definição de chave estrangeira:

```
ALTER TABLE "bacia_at" ADD CONSTRAINT "r_bpmor" FOREIGN
KEY ("oid_pmor")
REFERENCES "par_morfo"("oid_pmor")
MATCH SIMPLE
ON DELETE NO ACTION
ON UPDATE NO ACTION
NOT DEFERRABLE;
```

Para as entidades que possuem componente espacial, após a criação da tabela, deve-se adicionar a coluna que armazena o dado geométrico. A sintaxe utilizada é a seguinte:

```
ADDGEOMETRYCOLUMN ( < t a b e l a >, < coluna >, < s r i d >, < t i
p o >, < dimensao >)
```

Onde:

tabela: nome da tabela onde será adicionada uma componente espacial.

coluna: nome da coluna que armazena a componente espacial.

srid: especifica o sistema de referência espacial usado para aquela componente espacial. Em outras palavras, é uma chave estrangeira para a tabela SPATIAL_REF_SYS.

tipo: define qual dos tipos espaciais proporcionados pelo banco de dados aquele componente representa.

dimensão: uma componente pode ser bi, tri ou quadri-dimensional.

Um exemplo de *script* para fins de indexação espacial das tabelas que possuem dados do tipo geométrico é apresentado a seguir:

```
CREATE INDEX idx_baciagm
ON bacia_gm
USING gist(geom_b);
```

Para as tabelas que armazenam informação temporal, um exemplo de *script* é apresentado abaixo:

```
CREATE TABLE "cst_st" (
    "instat_cst" varchar(3) NOT NULL,
    "instg_cst" int4 NOT NULL,
    "datai" date,
    "dataf" date);
```

4.5 DESENVOLVIMENTO DAS CONSULTAS

A verificação das características da bacia hidrográfica (áreas ocupadas pelas classes de cobertura superficial do terreno e solos, médias ponderadas de impermeabilização) e a estimativa do escoamento superficial direto (definição das URHs e valores de CN, escoamento superficial direto e volume de escoamento superficial direto) foram realizadas utilizando operadores matemáticos e funções construtoras agregadas da linguagem SQL.

Grande parte das consultas desenvolvidas para a execução das verificações e simulações consistiu de consultas espaciais. Uma consulta espacial é uma consulta a um banco de dados que faz uso de funções geométricas para proporcionar resposta a questões sobre o espaço e os objetos no espaço. Extensões espaciais de banco de dados (como o PostGIS) adicionam à linguagem padrão SQL um corpo de funções que trabalham com a geometria dos objetos, de maneira similar às funções que trabalham com dados alfanuméricos (OBE; HSU, 2010). As funções geométricas utilizadas para compor as consultas espaciais nesta pesquisa foram: *ST_AREA*, *ST_INTERSECTION*, *ST_INTERSECTS*, *ST_ISVALID*, *ST_BUFFER*, *ST_MULTI*, *ST_UNION*, *ST_DIFFERENCE*. Essas funções podem ser utilizadas tanto na cláusula *SELECT* quanto nas cláusulas *FROM* e *WHERE*. Alguns exemplos de

operações desenvolvidas para o BDET que fazem uso de funções geométricas, operadores matemáticos e funções construtoras agregadas da linguagem SQL são apresentados no quadro 5.

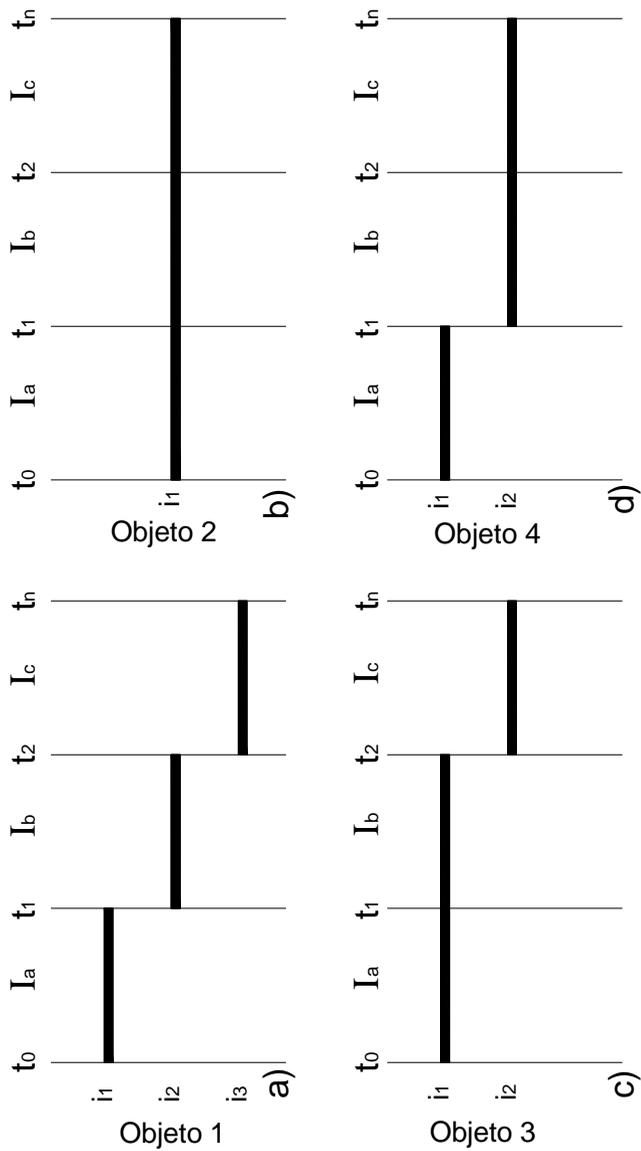
Quadro 5: Operações utilizadas na verificação das características da bacia hidrográfica e na estimativa do escoamento superficial direto.

Parâmetro	Fórmula	Operação
Taxa de impermeabilização	$\overline{TI}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times TI_{cob}}{\sum_{i=1}^n A_i}$	<i>SELECT SUM(TI*ST_AREA(g.geom))/ SUM(ST_AREA(g.geom))</i>
Cálculo do CN médio	$\overline{CN} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times CN_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$	<i>SELECT SUM(CN*ST_AREA(ST_INT ERSECTION(cg.geom_cst, sg.geom_solos))/SUM(ST_A REA(bacia_gm))</i>
Escoamento superficial direto para uma URH	$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a}$ $S = \frac{25400}{CN} - 254$	<i>SELECT ((P-(λ*((25400/CN)- 254)))^2/(P+(25400/CN- 254)-(λ*((25400/CN)-254)))</i>
Volume de escoamento superficial direto	$Q = \sum_{i=1}^n A_i \times P e_i$	<i>SELECT SUM(st_area(geom_urh)* ((P-(λ*((25400/CN)- 254)))^2/(P+(25400/CN- 254)-(λ*((25400/CN)-254))))</i>

Para lidar com as entidades que possuem componente temporal, foram desenvolvidas consultas temporais. A partir dessas, é possível realizar as seguintes funções: recuperação da versão de um objeto válida em um determinado intervalo ou instante temporal; consulta aos eventos armazenados no banco de dados; consulta aos estados de uma determinada entidade e às mudanças que esta sofreu ao longo do tempo. Os operadores temporais utilizados nas consultas temporais foram: *BEFORE, AFTER E OVERLAP*.

Para exemplificar o desenvolvimento das consultas temporais voltadas à recuperação da versão de um objeto, ou conjunto de objetos, válidos em um determinado instante ou intervalo temporal, apresenta-se na figura 29 a evolução de 4 objetos ao longo do tempo, todos pertencentes ao mesmo tema.

Figura 29: Quatro possibilidades de alterações em um objeto ao longo de um determinado período de tempo.



As instâncias (versões) dos objetos são representadas pela letra 'i'. São considerados quatro instantes no tempo (t_0 , t_1 , t_2 e t_n), que dão origem a três intervalos temporais (I_a , I_b e I_c).

Em 4a, o objeto 1 sofre alterações (na geometria ou nos atributos) nos pontos t_1 e t_2 , apresentando três diferentes instâncias ao longo do período considerado. A instância 1 no intervalo a , a instância 2 no intervalo b e a instância 3 no intervalo c .

Em 4b, o objeto 2 não sofre alterações ao longo do período considerado, apresentando uma única instância (instância 1) nos três intervalos de tempo.

Em 4c, o objeto 3 sofre alterações no instante t_1 , apresentado duas instâncias ao longo do período considerado. A instância 1 nos intervalos a e b a instância 2 no intervalo c .

Em 4d, o objeto 4 sofre alterações no instante t_2 , apresentando duas instâncias ao longo do período considerado. A instância 1 no intervalo a , e a instância 2 nos intervalos b e c .

Considerando que um determinado tema é formado por estes quatro objetos, apresentam-se no quadro 6 as consultas temporais desenvolvidas para recuperar um cenário completo do tema em qualquer instante ou intervalo temporal.

Quadro 6: Consultas temporais.

Descrição	Consulta
Recuperar a primeira instância de cada objeto	<i>SELECT * FROM cst WHERE datai='-infinity'</i>
Recuperar a instância dos objetos válida atualmente	<i>SELECT * FROM cst WHERE dataf='infinity'</i>
Recuperar a instância dos objetos válida entre t_1 e t_2	<i>SELECT * FROM cst WHERE (datai, dataf) OVERLAPS (t1, t2)</i>
Recuperar a instância dos objetos válida em uma data	<i>SELECT * FROM cst WHERE (t1) OVERLAPS (datai, dataf)</i>
Recuperar todas as instâncias dos objetos válidas antes de uma determinada data	<i>SELECT * FROM cst WHERE (dataf) BEFORE (t1)</i>
Recuperar todas as instâncias dos objetos válidas após uma determinada data	<i>SELECT * FROM cst WHERE (datai) AFTER (t1)</i>

As consultas apresentadas acima consideram a recuperação de um cenário referente a uma única entidade. Se houverem outras entidades participando da consulta (por exemplo, a entidade solos), então um critério adicional como *'AND solos.dataf = 'infinity''* deve ser adicionado na cláusula WHERE.

O desenvolvimento das consultas espaço-temporais é exemplificado a partir do caso da definição das mudanças nas geometrias de um objeto entre dois cenários. Para esse caso, é aplicado o conjunto de consultas apresentado no quadro 7.

Quadro 7: Operações envolvidas na verificação das mudanças em um objeto.

Descrição	Operação
Verificar o que existia no cenário 1 e não existe mais no cenário 2	<i>ST_DIFFERENCE (g1.geom, g2.geom)</i>
Verificar as áreas cobertas pela classe de CST nos dois cenários	<i>ST_INTERSECTION (g1.geom, g2.geom)</i>
Verificar as áreas cobertas pela classe de CST no cenário 2 que não eram cobertas por essa classe no cenário 1	<i>ST_DIFFERENCE (g2.geom, g1.geom)</i>
Calcular a área total ocupada pelo objeto no cenário 1	<i>(ST_AREA(ST_DIFFERENCE (g1.geom, g2.geom)))+ (ST_AREA(ST_INTERSECTION (g1.geom, g2.geom)))</i>
Calcular a área total ocupada pelo objeto no cenário 2	<i>(ST_AREA(ST_DIFFERENCE (g2.geom, g1.geom)))+(ST_AREA(ST_INTERSECTION (g1.geom, g2.geom)))</i>

Todas as consultas desenvolvidas foram definidas como visões no BDET. As visões são apresentações personalizadas dos dados de uma ou mais tabelas ou de outras visões. A visão não é materializada fisicamente, toda vez que uma visão é chamada em uma consulta, o banco de dados executa a consulta definida para essa visão. A visão também pode ser considerada uma consulta armazenada. As visões não contêm dados, elas derivam seus dados a partir das tabelas as quais estão referenciadas, chamadas de tabelas base das visões. Como as tabelas, as visões podem ser consultadas, atualizadas, e pode haver inserção ou

exclusão de dados (com algumas restrições). As visões fornecem um nível adicional de segurança para as tabelas, pois restringem o acesso a determinados conjuntos de linhas ou de colunas dessas tabelas (CYRAN; LANE, 2003).

5 PROJETO PILOTO

O projeto piloto teve como objetivo verificar a capacidade do BDET em atender aos requisitos e proporcionar respostas às consultas definidas na contextualização do problema. Inicialmente, verificam-se as capacidades do BDET com relação à recuperação dos dados armazenados e de consultas aos estados, mudanças e eventos.

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo utilizada para implementar e testar o banco de dados desenvolvido foi a bacia hidrográfica do rio Atuba. Esta área foi escolhida devido a existência prévia de mapas de uso e cobertura da terra, inclusive mapa da cobertura superficial do terreno voltado à aplicação do método SCS-CN.

A bacia hidrográfica do rio Atuba (figura 30) está localizada na bacia do Alto Iguaçu e abrange a porção nordeste do município de Curitiba e partes dos municípios de Almirante Tamandaré, Colombo, Pinhais e São José dos Pinhais.

A bacia do rio Atuba vem sofrendo um grande processo de urbanização no decorrer dos últimos trinta anos, sendo considerada como a segunda bacia mais urbanizada de Curitiba e suas imediações (NUNES, 2007). O canal principal, com aproximadamente 32,43 km de extensão possui boa parte do seu percurso e de seus afluentes canalizados, tendo como afluente principal o rio Bacacheri. Segundo Nunes e Fiori (2007), a cidade de Curitiba e seus núcleos marginais apresentam um amplo registro de inundações ao longo de sua história. No período compreendido entre 1911 até os dias atuais, foram registrados diversos episódios pluviais intensos, o que provocou, em determinados lugares, inundações com ocorrência de grande número de desabrigados e incalculáveis danos materiais para o poder público e para a população local.

Devido aos constantes e crescentes eventos de inundações na bacia do Atuba, atualmente estão sendo realizados estudos visando à execução de obras de contenção de cheias e melhorias no rio Atuba (PMC, 2011).

5.1.1 Parâmetros morfométricos

Os parâmetros morfométricos da bacia do rio Atuba são apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros morfométricos da bacia hidrográfica do rio Atuba.

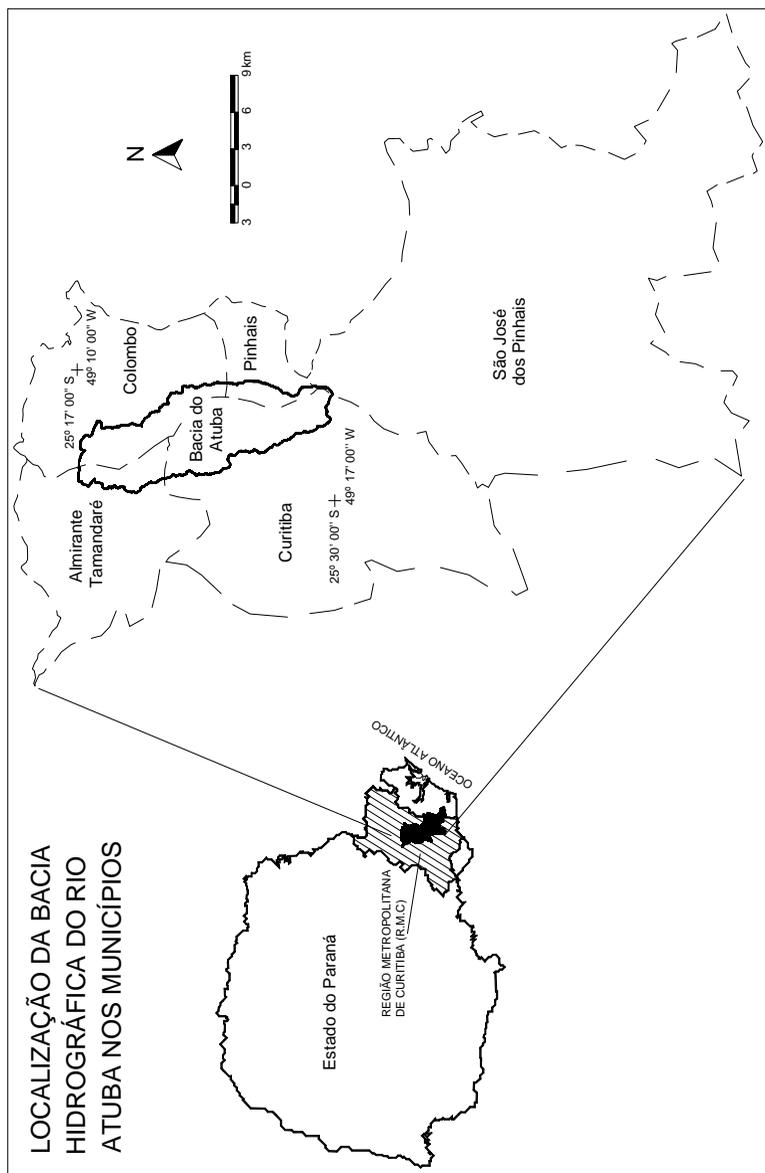
Parâmetro	Valor
Área da bacia – (A)	127,43 km ²
Perímetro da bacia – (P)	64,92 km
Extensão do canal principal – (L _{cp})	32,43 km
Densidade de drenagem – (D _d)	3 km/km ²
Densidade hidrográfica – (D _h)	1,66 rios/km ²
Coeficiente de compacidade – (K _c)	1,61
Fator de forma (K _t)	0,12
Extensão do talvegue – (L _{tal})	23,50 km
Sinuosidade – (S _{in})	1,40
Extensão do percurso superficial – (E _{ps})	16,66 m
Desnível topográfico da bacia – (H _b)	227,3 m
Comprimento da bacia – (L _b)	23,87 km
Desnível geométrico do canal principal (H _{cp})	146 m
Relação de relevo – (R _r)	9,67 m/km
Gradiente do canal principal – (G _{cp})	4,5 m/km

Fonte: Organizado a partir de Nunes (2006).

5.1.2 Clima e precipitação

De acordo com a carta climática do estado do Paraná (Caviglione et al., 2000), a bacia hidrográfica do rio Atuba apresenta clima tipo Cfb (subtropical úmido mesotérmico), conforme a classificação de Köppen, com verões frescos e sem estação seca definida. A temperatura média é de 16,5⁰C, sendo a média para o mês mais frio de 12,6⁰C e para o mês mais quente igual a 20,1⁰C (IPEA, 2001). As chuvas são bem distribuídas, a precipitação pluviométrica média anual está na faixa de 904mm a 1451mm (Miranda, 2001).

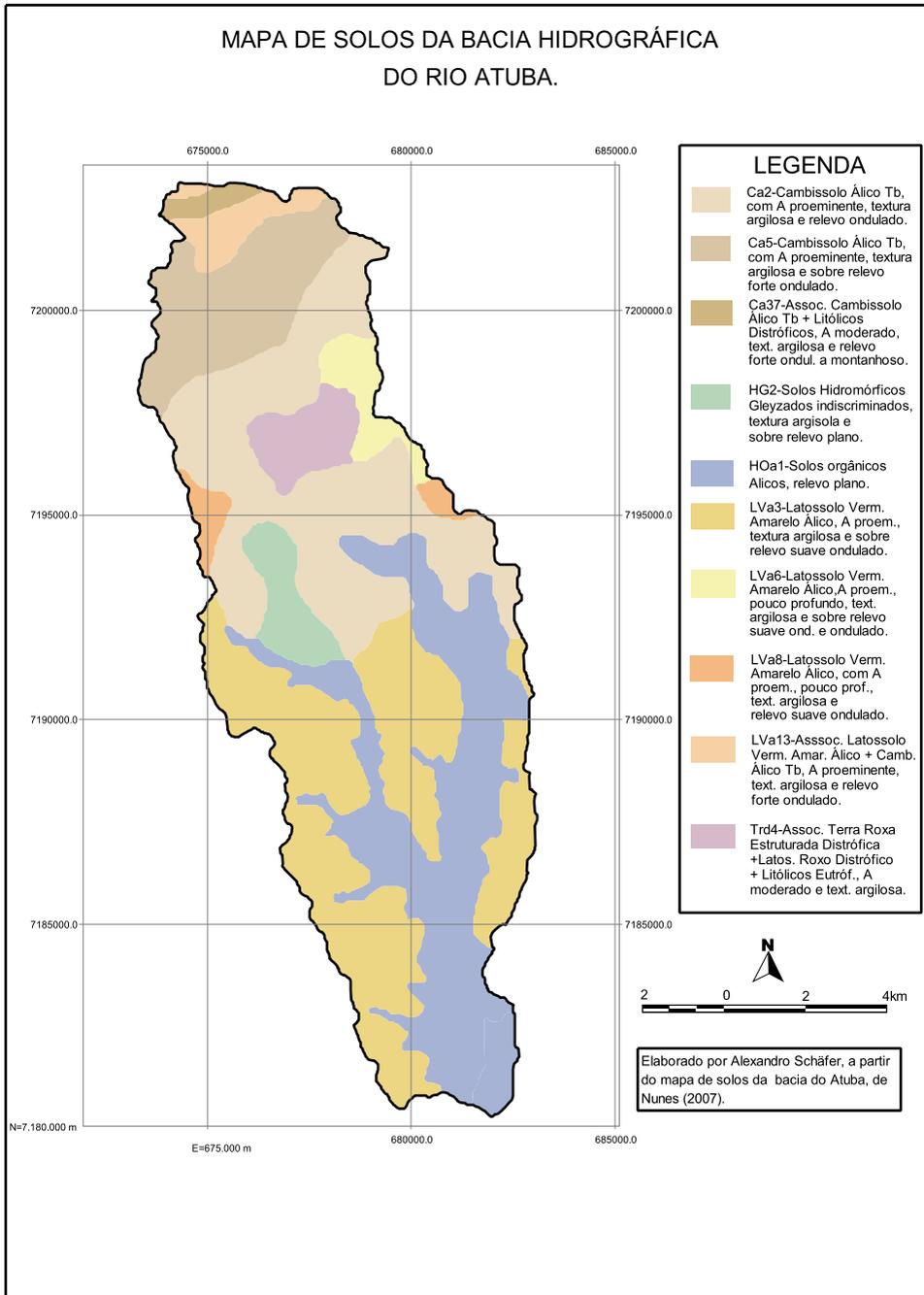
Figura 30: Localização da bacia hidrográfica do rio Atuba.



5.1.3 Solos

Na figura 31, apresenta-se a carta de solos da bacia hidrográfica do rio Atuba. Os latossolos são predominantes na área da bacia, com perfis profundos, textura argilosa, bem porosos e drenados. Localizam-se principalmente nas regiões das declividades menos acentuadas, onde os depósitos das encostas são mais espessos. Nas áreas das maiores declividades ocorrem os Cambissolos, que também são solos com textura argilosa, bem porosos e drenados, porém, com perfis de menor profundidade. Ao longo das margens do rio principal e junto a sua foz, são verificados os solos hidromórficos e orgânicos (Nunes, 2007).

Figura 31: Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Atuba.



5.1.4 Documentos, dados e produtos cartográficos

Para a implementação do BDET, os seguintes dados, documentos e produtos cartográficos foram utilizados:

- Arquivo shapefile 'sub-bacias do Alto Iguaçu', na escala 1:10.000, do ano de 2000. Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2000);

- Arquivo shapefile 'hidrografia da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu', na escala 1:10.000, do ano de 2000. Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2000).

- Arquivo shapefile 'altimetria da bacia do Alto Iguaçu', na escala 1:10.000 nas áreas rurais e 1:2.000 nas áreas urbanas (que foram sintetizadas a partir de dados de projetos já existentes do Paranacidade e do IPPUC).

- Arquivo shapefile 'uso do solo da bacia hidrográfica do Alto Iguaçu', na escala 1:20.000, do ano de 2000. Fonte: Instituto das Águas do Paraná (2000).

- Mapa de cobertura superficial do terreno da bacia hidrográfica do rio Atuba de 1962, confeccionada por Nunes (2007) a partir das fotografias aéreas pancromáticas da Cobertura aerofotogramétrica Cruzeiro do Sul do ano de 1962, na escala de vôo 1:70.000;

- Mapa de cobertura superficial do terreno da bacia hidrográfica do rio Atuba de 2000, confeccionada por Nunes (2007) a partir das fotografias aéreas coloridas da Cobertura aerofotogramétrica da Região Metropolitana de Curitiba do ano de 2000, na escala de vôo 1:30.000;

- Mapa de cobertura superficial do terreno do cenário de pré-desenvolvimento. Elaborado pelo autor, a partir do mapa de cobertura superficial do terreno de 1962. Considerou-se que todos os locais que se apresentavam urbanizados em 1962 estavam anteriormente ocupados pela classe campos e áreas verdes. As demais classes permaneceram inalteradas.

- Mapa de solos da bacia hidrográfica do rio Atuba. Escala 1:150.000, confeccionada por Nunes (2007);

- Arquivo shapefile 'malha de setor censitário do ano de 2010' do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Segundo o IBGE, o arquivo digital foi disponibilizado para ser compatível com escalas cartográficas na faixa de 1:2.000 a 1:10.000 nas áreas urbanas e nas áreas rurais, compatível com escalas na faixa de 1:25.000 a 1:250.000;

- Mapas de zoneamento do uso do solo dos municípios de: Almirante Tamandaré, Lei Complementar 2/2006 (sem indicação de escala); Colombo, Lei 875/2004 (escala 1:75.000); Curitiba, Lei

9800/2000 (escala 1:25.000); Pinhais, Lei 1233/2011 (escala 1:40.000) e São José dos Pinhais, Lei complementar 16/2005 (escala 1:20.000). Embora os mapas de zoneamento dos municípios tenham sido publicados em diferentes escalas, todos foram elaborados a partir da base cartográfica da SUDERHSA, do ano de 2000, na escala 1:10.000.

- Parâmetros das zonas de uso e ocupação do solo de cada município: taxa de ocupação e taxa de permeabilidade mínima, obtidas a partir dos planos diretores de desenvolvimento urbano de cada município;

- Dados de precipitação: O volume de precipitação adotado para a estimativa do escoamento superficial direto foi obtido a partir da equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) elaborada por Fendrich (2000) (equação 18). Essa equação foi obtida pelo autor através da análise dos dados de precipitação da estação do Prado Velho (Curitiba-PR) registrados entre os anos de 1981 a 1999. A equação é válida para chuvas com duração de 10 min a 24 horas.

$$i_m = \frac{5726,64 \cdot T_r^{0,159}}{(t_d + 41)^{1,041}} \quad (18)$$

Onde, i_m é a intensidade máxima média da chuva (em mm/h), T_r é o período de retorno (em anos) e T_d é o tempo da duração da chuva (em minutos).

Para a estimativa do escoamento superficial no presente estudo, adotou-se um tempo de duração de 120 min e tempo de retorno de 25 anos. Estes foram os parâmetros utilizados no Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) e em SUDERHSA (2007), para o estudo do agravamento de inundações na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu.

Devido à dificuldade encontrada em obter dados cartográficos de uma bacia hidrográfica adequados para a realização do projeto piloto, adotou-se os mapeamentos disponibilizados por Nunes (2007) e também os disponibilizados pelo Instituto das Águas do Paraná (no endereço eletrônico <http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=78>), os quais estão em escalas que variam entre 1:2.000 a 1:70.000. Esta tamanha variação em escala não é recomendada para uma integração visando análise espacial. Para uma análise mais consistente deveria ser avaliada esta questão, buscado uma adequação de escalas, fato de demandaria um retrabalho consumindo um tempo que não existe neste momento para esta pesquisa. Todavia, considerando que o foco é validar as funcionalidades do BDET e a sua aplicabilidade no

gerenciamento integrado de bacias hidrográficas, utilizou-se os dados cartográficos nas escalas em que foram disponibilizados. Portanto, os resultados das quantificações das características da bacia hidrográfica e das estimativas de escoamento superficial direto que serão apresentados no decorrer do capítulo cinco devem ser analisados com cautela.

5.2 CENÁRIOS DE ANÁLISE

Com o objetivo de monitorar o aumento da urbanização e seu impacto no escoamento superficial direto, os cenários analisados foram:

Cenário 1: condição de pré-desenvolvimento, sem a presença de urbanização;

Cenário 2: corresponde ao estágio de desenvolvimento urbano na bacia do Atuba no ano de 1962 (figura 32);

Cenário 3: corresponde ao estágio de desenvolvimento urbano na bacia do Atuba no ano de 2000 (figura 33);

Cenário 4: cenário do Plano Diretor. Considera as condições de impermeabilização máxima, utilizando como parâmetro as taxas mínimas de permeabilidade previstas para cada zona de uso e ocupação do solo descritas nos Planos Diretores de cada município que compõe a bacia do Atuba. Apesar dos Planos Diretores terem sido publicados entre os anos de 2000 (município de Curitiba e de 2011 (município de Pinhais), prevendo horizontes de desenvolvimento urbano em torno de 10 anos, algumas zonas de uso e ocupação do solo apresentavam, já no ano de 2000, condições iguais ou superiores às condições limites descritas nesses Planos Diretores.

Os cenários de 1962 e de 2000 foram definidos em função dos mapeamentos de cobertura superficial do terreno disponíveis. Os mapas dos cenários de pré-desenvolvimento e de plano diretor foram definidos com o objetivo de comparar a situação em um determinado momento com uma situação inicial de referência (o cenário de pré-desenvolvimento), e uma situação aqui considerada como limite de desenvolvimento urbano (o cenário de plano diretor).

Figura 32: Mapa de cobertura superficial do terreno da bacia hidrográfica do rio Atuba, ano de 1962.

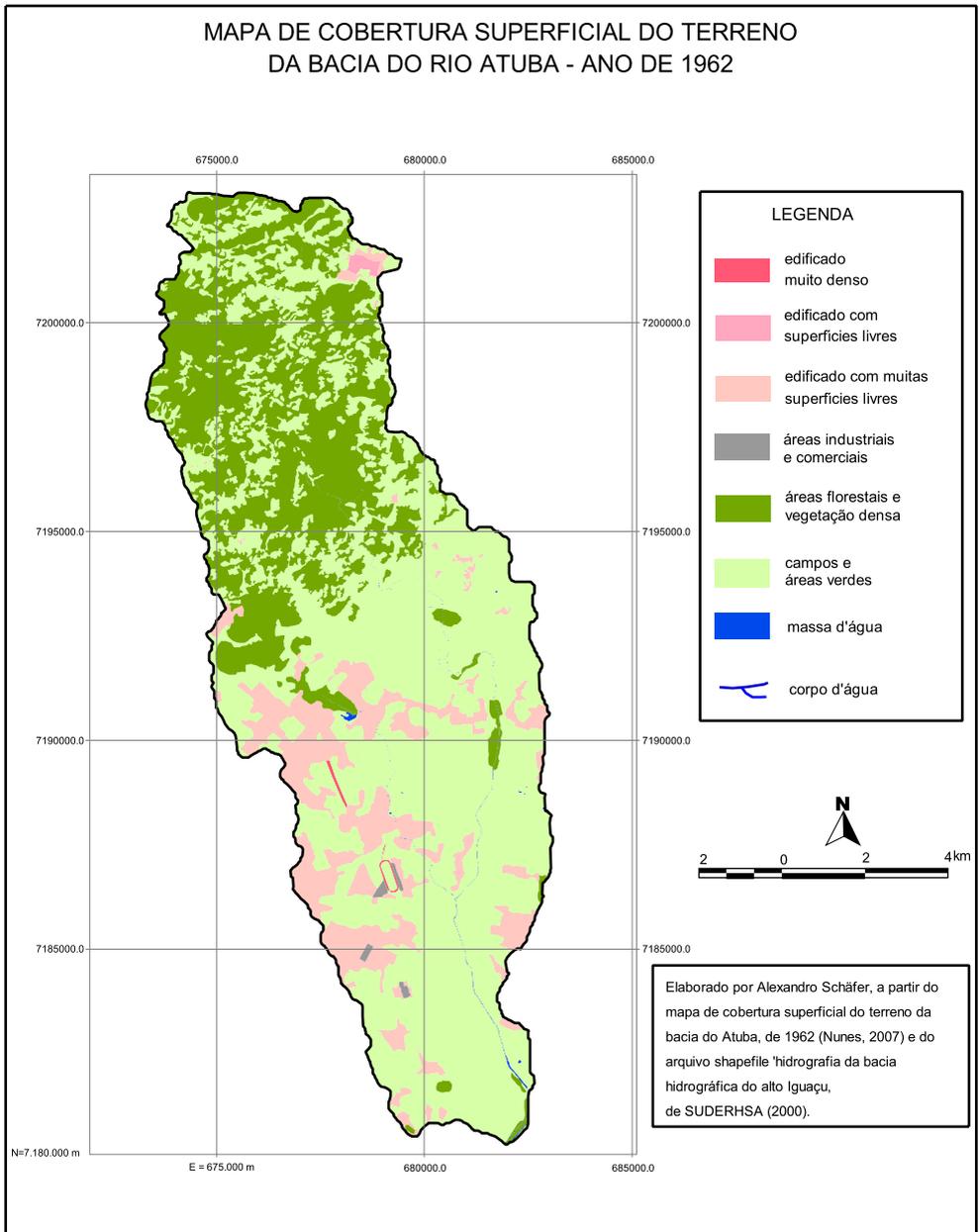
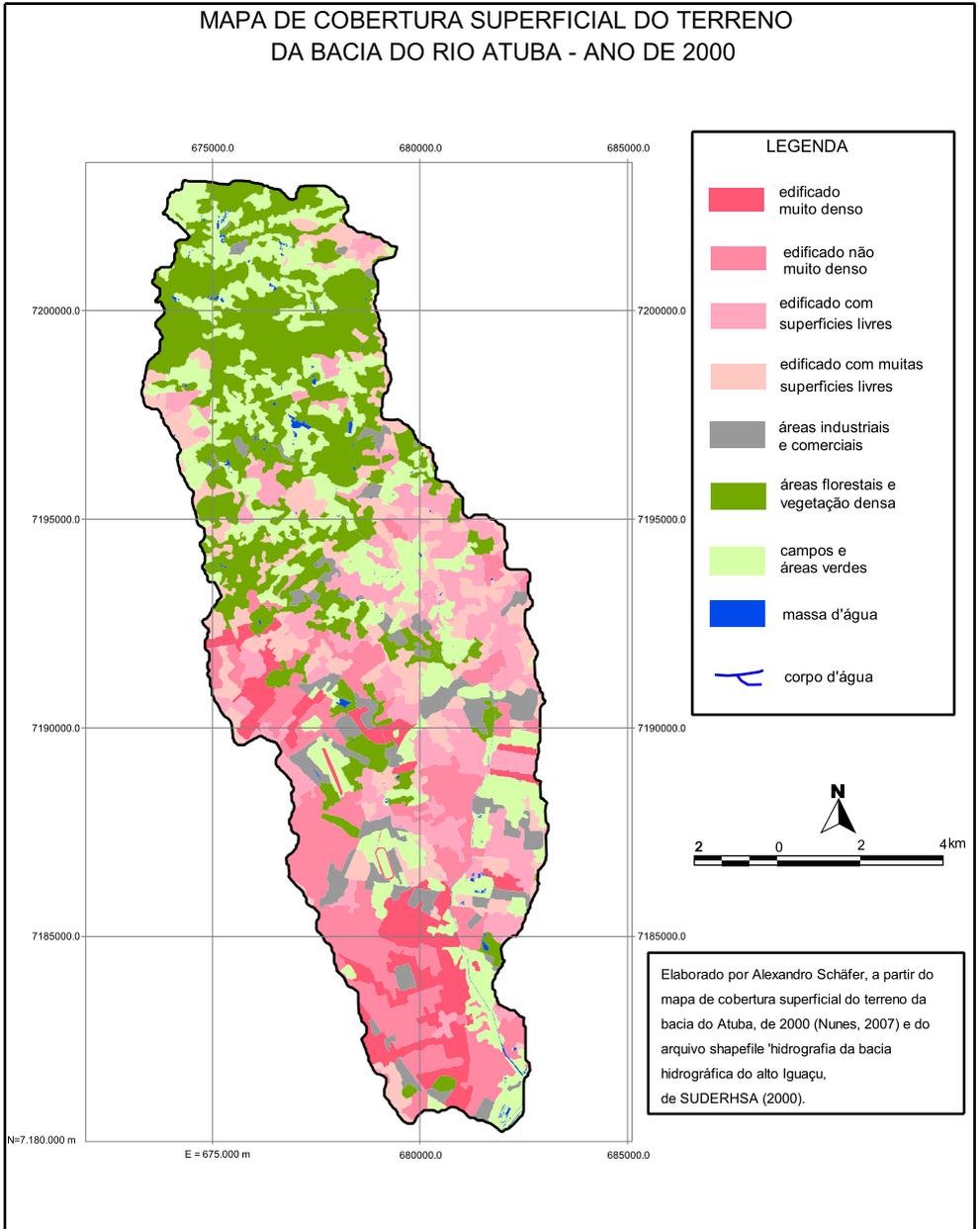


Figura 33: Mapa de cobertura superficial do terreno da bacia hidrográfica do rio Atuba, ano de 2000.



5.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS

Na etapa de preparação dos dados, inicialmente converteu-se os documentos cartográficos que estavam originalmente em formato *shapefile* para o formato SQL. Para tanto, utilizou-se a ferramenta (o conversor) chamada *shp2pgsql*. Desta maneira, todos os arquivos em formato *shapefile* existentes foram inseridos em um banco de dados, criado no POSTGRESQL especificamente para a edição dos dados.

Alguns mapas importados para o PostgreSQL apresentaram inconsistências (polígonos sobrepostos e/ou abertos), não possibilitando a realização de operações espaciais. Foi necessário então corrigir as geometrias. Isto foi feito no próprio PostGIS, verificando a validade das geometrias e criando novas geometrias para as geometrias não válidas, usando operações de *buffer*. Um exemplo dos *scripts* utilizados no processo de correção das geometrias referentes ao mapa temático de cobertura superficial do terreno de 2000 é apresentado no quadro 8.

Quadro 8: *Script* para verificação da validade e correção de geometrias.

Descrição	Script
Verificação da validade das geometrias	<i>create table validade_cst as Select c.gid_cst, c.oid_cst, c.cst_geom, st_isvalid (d.cst_geom) as validade from cst_original as c</i>
Criação de tabela com as geometrias que contém algum tipo de erro. Criação de uma nova geometria a partir da criação de um buffer com largura zero.	<i>create table validade_cst_false as Select c.gid_cst, c.oid_cst, ST_Buffer(v.cst_geom,0) as cst_geom from validade_cst as v where validade = false</i>
Criação de uma tabela com as geometrias que não contém erros.	<i>create table validade_cst_true as Select c.gid_cst, c.oid_cst, c.cst_geom from validade_cst as v where validade = true</i>
União das geometrias que não contém erro com as geometrias corrigidas.	<i>create table cst_corrigido as SELECT c.gid_cst, c.oid_cst, c.cst_geom FROM validade_cst_true UNION SELECT c.gid_cst, c.oid_cst, c.cst_geom FROM validade_cst_false</i>

5.3.1 Cobertura superficial do terreno

As classes de cobertura superficial do terreno e a porcentagem de impermeabilização associada a cada classe são apresentadas no quadro 9.

Quadro 9: Classes de cobertura superficial do terreno e porcentagem de impermeabilização. Fonte: Adaptado de NUNES (2007).

Classe	Descrição	Imp. (%)
Edificações muito densas	Partes centrais densamente construídas de uma cidade	85
Edificações não muito densas	Áreas residenciais adjacentes ao centro, de menor densidade de habitação que as regiões centrais	65
Edificações com superfícies livres	Áreas residenciais em locais com menor densidade de habitação do que na classe 'edificações não muito densas'.	38
Edificações com muitas superfícies livres	Áreas residenciais possuindo construções esparsas	30
Zonas industriais e comerciais	Áreas industriais e barracões de comércio	72
Campos e áreas verdes	Parques com vegetação rasteira, áreas cultivadas, áreas com gramados e terrenos sem cobertura vegetal.	0
Áreas florestais e vegetação densa	Abrange todas as áreas com vegetação de portes arbóreos naturais ou reflorestamento em boas condições	0
Massa d'água	Lagos, açudes, reservatórios	
Curso d'água	Rios e canais	

As classes de cobertura superficial do terreno seguiram o estipulado em Nunes (2007), que por sua vez adotou as classes apresentadas em Tucci et al. (1995). Para o presente estudo, a classe 'corpos d'água' apresentada originalmente foi renomeada para 'massa d'água', seguindo a terminologia de CONCAR (2007). Foi criada ainda

a classe ‘curso d’água’, que contém os polígonos referentes aos rios, obtidos a partir do shapefile da hidrografia da bacia hidrográfica do Alto Iguçu. Os rios foram considerados como polígonos para permitir a atribuição de valores de CN a essas entidades.

Para estimar o valor do CN e verificar a situação do escoamento superficial direto em um cenário sem urbanização, alguns estudos consideram um valor único de CN para toda a bacia hidrográfica no cenário de pré-urbanização. SUDERHSA (2007) considerou um CN de 60 para os estudos de agravamento de inundações da bacia hidrográfica do rio Atuba. No entanto, a consideração desse valor único não leva em conta a variação dos grupos hidrológicos de solos presentes em uma bacia. Desta maneira, é possível que valor do escoamento superficial direto seja subestimado no cenário de pré-desenvolvimento e, conseqüentemente, que os aumentos ocorridos no escoamento superficial direto nos outros cenários, em comparação com esse cenário inicial, sejam superestimados. Visando evitar esse problema, optou-se por confeccionar uma carta de cobertura superficial do terreno para o cenário de pré-desenvolvimento a partir da carta de cobertura superficial do terreno de 1962. Para tanto, considerou-se que todos os locais que se apresentavam urbanizados em 1962 estavam anteriormente ocupados pela classe campos e áreas verdes. As demais classes permaneceram inalteradas.

Com relação aos grupos hidrológicos de solos, armazenou-se no banco de dados tanto a classificação original do NRCS, adotada em Nunes (2007), quanto a classificação proposta por Sartori (2010). O quadro 10 apresenta a classificação hidrológica dos solos presentes na bacia do Atuba, de acordo com essas duas classificações. Verifica-se que os solos que tiveram a classificação hidrológica alterada foram os Cambissolos.

Quadro 10: Classes de solos existentes na bacia hidrográfica do rio Atuba e classificação quanto ao grupo hidrológico.

Descrição da classe de solo	Grupo hidrológico	
	Classificação segundo o NRCS	Classificação segundo Sartori (2010)
Latossolo Vermelho Amarelo Álico, com A proeminente, textura argilosa e sobre relevo suave ondulado.	C	

Latossolo Vermelho Amarelo Álico, com A proeminente, pouco profundo, textura argilosa e sobre relevo suave ondulado e ondulado.	C	
Latossolo Vermelho Amarelo Álico, com A proeminente, pouco profundo, textura argilosa e sobre relevo suave ondulado.	C	
Associação de Latossolo Vermelho-Amarelo Álico + Cambissolo Álico Tb, ambos com A proeminente, textura argilosa e sobre relevo forte ondulado.	C	
Cambissolo Álico Tb, com A proeminente, textura argilosa e sobre relevo ondulado.	C	B
Cambissolo Álico Tb, com A proeminente, textura argilosa e sobre relevo forte ondulado.	C	B
Associação de Cambissolo Álico Tb = Solos Litólicos Distróficos, ambos A moderado, textura argilosa e sobre relevo forte ondulado a montanhoso.	C	B
Associação de Terra Roxa Estruturada Distrófica + Latossolo Roxo Distrófico + Solos Litólicos Eutróficos, todos A moderado e textura Argilosa.	C	
Solos Hidromórficos Gleyzados Indiscriminados, textura argilosa e sobre relevo plano.	D	
Solos orgânicos Álicos, sobre relevo plano	D	

5.3.2 Municípios e zonas de uso e ocupação do solo

Para que fosse possível realizar verificações com relação à urbanização e ao escoamento superficial direto em nível de município, foi criado um tema contendo os limites dos municípios presentes na bacia do Atuba. O tema foi criado a partir da malha de setores censitários do IBGE do ano de 2010. Optou-se por utilizar a malha do

ano de 2010 ao invés da malha do ano de 2000 devido ao fato de a primeira englobar tanto os setores censitários urbanos quanto os setores censitários rurais em um único documento. Adotou-se o geocódigo como identificador único dos municípios no banco de dados.

Para possibilitar a realização de consultas temporais ao tema municípios, foi inserido no BDET o histórico das alterações que ocorreram em cada município, desde a sua fundação. A data inicial considerada foi a fundação de Curitiba, em 1693. A partir desta data, considerou-se todos os desmembramentos que ocorreram nos municípios até hoje. Para tanto, tomou-se como base os documentos disponíveis na biblioteca do IBGE, na ferramenta cidades@ (<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>).

As zonas de uso e ocupação do solo dos municípios presentes na bacia foram obtidas a partir dos mapas de zoneamento do uso e ocupação do solo de cada município.

A taxa de permeabilidade mínima e a taxa de ocupação de cada uma das zonas de uso e ocupação do solo foram retiradas das leis do plano diretor de cada município. Para o município de Colombo, que não possui valores de taxa mínima de permeabilidade, foram arbitrados valores com base nas taxas de ocupação e nas características das zonas dos planos diretores dos demais municípios presentes na bacia hidrográfica do rio Atuba. O quadro 11 apresenta a relação das zonas de uso e ocupação do solo presentes na bacia, bem como suas siglas, taxa de permeabilidade mínima, taxa de ocupação e município a qual pertencem.

Quadro 11: Zonas de uso e ocupação do solo presentes na bacia hidrográfica do rio Atuba.

Nome	Sigla	Taxa de ocupação (%)	Taxa de permeabilidade de mínima (%)	Município
Zona residencial 3	ZR3	60	20	Almirante Tamandaré
Zona residencial 2	ZR2	60	20	Almirante Tamandaré
Zona residencial 1	ZR1	50	20	Almirante Tamandaré
Zona industrial	ZI	60	20	Almirante Tamandaré

Zona especial de parque	ZEP	30	50	Almirante Tamandaré
Zona especial de interesse social	ZEIS	60	15	Almirante Tamandaré
Zona de chácaras	ZCH	40	40	Almirante Tamandaré
Zona rural agrícola	ZRU-A	10	50	Almirante Tamandaré
Zona residencial especial	ZRE	40	20	Almirante Tamandaré
Zona de uso predominantemente industrial 1	ZUP I1	70	20	Colombo
Zona de uso diversificado 3	ZUD 3	50	25	Colombo
Zona de uso diversificado 1	ZUD 1	50	25	Colombo
Zona de preservação do ambiente cultural 2	ZPA C2	70	20	Colombo
Zona de preservação do ambiente cultural 1	ZPA C1	70	20	Colombo
Zona de desenvolvimento rural	ZDR	10	50	Colombo
Parques e áreas verdes	PAV		90	Colombo
Zona de uso predominantemente industrial 2	ZUP I2	10	50	Colombo
Zona de uso diversificado 4	ZUD 4	70	20	Colombo
Setor especial de habitação de interesse social	SEH IS	50	25	Curitiba
Zona de transição BR-116	ZT-BR116	50	25	Curitiba
Zona de serviço 1	ZS-1	50	25	Curitiba
Zona residencial de ocupação controlada	ZR-OC	30	50	Curitiba

Zona residencial 4	ZR-4	50	25	Curitiba
Zona residencial 3	ZR-3	50	25	Curitiba
Zona residencial 2	ZR-2	50	25	Curitiba
Zona residencial 1	ZR-1	50	25	Curitiba
Zona especial M	ZE-M	30	25	Curitiba
Zona especial D	ZE-D	30	25	Curitiba
Praças, parques e bosques públicos	PPB		90	Curitiba
Sector especial Costa Barros	SE-CB	50	25	Curitiba
Sector especial Afonso Camargo	SE-AC	50	25	Curitiba
Sector especial estrutural	SE	50	25	Curitiba
Área de proteção ambiental do Iguaçu	APA Iguacu		90	Curitiba
Eixo de comercio e serviço 1	ECS 1	70	20	Pinhais
Zona de serviço	ZS	65	25	Pinhais
Zona de restrição a ocupação	ZRO		90	Pinhais
Zona residencial	ZR	50	40	Pinhais
Zona mista consolidada	ZMC	50	40	Pinhais
Zona central	ZC	50	25	Pinhais
Zona do autódromo	ZA	30	60	Pinhais
Eixo de comercio e serviço 4	ECS 4	60	30	Pinhais
Eixo de comercio e serviço 3	ECS 3	60	20	Pinhais
Eixo de comercio e serviço 2	ECS 2	70	25	Pinhais
Nome	Sigla	Taxa de ocupação (%)	Taxa de permeabilidade de minima (%)	Município
Zona residencial 3	ZR3	60	20	Almirante Tamandaré
Zona residencial 2	ZR2	60	20	Almirante

				Tamandaré
Zona residencial 1	ZR1	50	20	Almirante Tamandaré
Zona industrial	ZI	60	20	Almirante Tamandaré
Zona especial de parque	ZEP	30	50	Almirante Tamandaré
Zona especial de interesse social	ZEIS	60	15	Almirante Tamandaré
Zona de chácaras	ZCH	40	40	Almirante Tamandaré
Zona rural agrícola	ZRU -A	10	50	Almirante Tamandaré
Zona residencial especial	ZRE	40	20	Almirante Tamandaré
Zona de uso predominantemente industrial 1	ZUP I1	70	20	Colombo
Zona de uso diversificado 3	ZUD 3	50	25	Colombo
Zona de uso diversificado 1	ZUD 1	50	25	Colombo
Zona de preservação do ambiente cultural 2	ZPA C2	70	20	Colombo
Zona de preservação do ambiente cultural 1	ZPA C1	70	20	Colombo
Zona de desenvolvimento rural	ZDR	10	50	Colombo
Parques e áreas verdes	PAV		90	Colombo
Zona de uso predominantemente industrial 2	ZUP I2	10	50	Colombo
Zona de uso diversificado 4	ZUD 4	70	20	Colombo
Setor especial de habitação de interesse social	SEH IS	50	25	Curitiba

Zona de transição BR-116	ZT-BR116	50	25	Curitiba
Zona de serviço 1	ZS-1	50	25	Curitiba
Zona residencial de ocupação controlada	ZR-OC	30	50	Curitiba
Zona de restrição a ocupação	ZRO		90	São José dos Pinhais

5.3.3 Número de curva (CN)

No caso dos valores de CN referentes ao coeficiente de abstração de 0,20, os valores de CN considerados no estudo foram os oficiais definidos pelo NRCS, de acordo com a classe de cobertura superficial do terreno e grupo hidrológico de solos (tabela 2). Para as áreas urbanizadas, os valores da tabela correspondem ao CN composto, calculado a partir da equação 19.

$$CN_C = CN_P + \left(\frac{TI}{100}\right) (CN_{imp} - CN_P) \quad (19)$$

Onde: CN_C = Número de curva de escoamento superficial composto; CN_P = Número de curva de escoamento relativo à área permeável (considerada como tendo condições semelhantes à pastagens); TI = Taxa de impermeabilização; CN_{imp} = Número de curva de escoamento relativo à área impermeável (igual a 98).

Tabela 2: Valores de CN para $\lambda=0,20$.

Classe	TI	Grupo hidrológico de solos			
		A	B	C	D
Edificações muito densas	85	89,15	92,45	94,4	95,3
Edificações não muito densas	65	77,35	85,05	89,6	91,7
Edificações com superfícies livres	38	61,42	75,06	83,12	86,84
Edificações com muitas superfícies livres	30	56,7	72,1	81,2	85,4
Zonas industriais e comerciais	72	81,48	87,64	91,28	92,96
Campo e áreas verdes		30	58	71	78
Áreas florestais e veg.. densa		30	55	70	77
Pastagem com boas condições hidrológicas		39	61	74	80

A partir dos valores de CN para o coeficiente de abstração inicial de 0,20, foram calculados os valores de CN para o coeficiente de abstração inicial de 0,05, a partir da equação 11 (apresentada no capítulo 2). Estes valores são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Valores de CN para $\lambda=0,05$.

Classe	TI	Grupo hidrológico de solos			
		A	B	C	D
Edificações muito densas	85	88,71	90,47	93,20	94,43
Edificações não muito densas	65	68,61	79,72	86,37	89,40
Edificações com superfícies livres	38	47,61	65,40	76,90	82,34
Edificações com muitas superfícies livres	30	42,06	61,33	74,11	80,23
Zonas industriais e comerciais	72	74,52	83,51	88,80	91,19
Campo e áreas verdes		16,73	43,55	59,85	69,53
Áreas florestais e vegetação densa		16,73	40,14	58,51	68,11
Pastagem com boas condições hidrológicas		19,52	45,66	69,54	73,87

5.3.4 Inserção dos dados no BDET

Após a preparação e correção dos dados espaciais e da definição dos demais conjuntos de dados e parâmetros, procedeu-se a inserção destes no banco de dados espaço-temporal criado na fase de projeto físico.

As tabelas do banco de dados foram preenchidas usando o comando *insert* da linguagem SQL. Esse comando tem a seguinte sintaxe:

Insert into <nome_tabela> (<campos_tabela>) values (<valores_que_serao_inseridos>);

A DML (Data Manipulation Language) para a inserção de todos os dados no banco de dados é apresentada integralmente no anexo B.

5.4 REALIZAÇÃO DE TESTES E VERIFICAÇÃO DAS FUNCIONALIDADES DO BANCO DE DADOS ESPAÇO-TEMPORAL

Uma vez inseridas todas as informações para os quatro cenários de análise, a próxima etapa do estudo consistiu em realizar testes, para verificar a funcionalidade do banco de dados espaço-temporal em atender aos requisitos e possibilitar a realização das consultas definidas na contextualização do problema. Inicialmente, verificam-se as capacidades do BDET com relação à recuperação dos dados armazenados e de consultas aos estados, eventos e mudanças. Em seguida, realiza-se a verificação das características da bacia hidrográfica do rio Atuba e a estimativa do escoamento superficial direto, considerando os quatro cenários de análise anteriormente apresentados: pré-desenvolvimento, 1962, 2000 e plano diretor. Ressalta-se que as consultas aqui aplicadas e as análises realizadas são apenas exemplos das potencialidades do BDET. Existem várias outras possibilidades de análise e de realização das operações utilizando o BDET.

5.4.1 Aspectos gerais do Banco de Dados Espaço-Temporal (BDET)

Nesta seção apresentam-se as consultas realizadas referentes às principais funções de manipulação de dados que devem ser realizadas pelo BDET.

5.4.1.1 Recuperação de dados

Para exemplificar a recuperação dos dados referentes a uma determinada entidade, inicialmente se apresentam as tabelas referentes à entidade *CST*. Como especificado no projeto lógico, esta entidade é formada por três tabelas, a tabela *cst_st*, a tabela *cst_gm* e a tabela *cst_at*. A figura 34 apresenta a tabela *cst_st*, onde constam os identificadores das instâncias dos atributos (*instat_cst*) e das geometrias (*instg_cst*) das classes pertencentes à entidade *CST*, bem como sua data de validade inicial e final.

Figura 34: Tabela cst_st.

	instg_cst	instat_cst	datai	dataf
1	1	6	-infinity	1961-12-31
2	2	7	-infinity	1961-12-31
3	3	8	-infinity	1999-12-31
4	4	9	-infinity	infinity
5	5	1	1962-01-01	1999-12-31
6	6	3	1962-01-01	1999-12-31
7	7	4	1962-01-01	1999-12-31
8	8	5	1962-01-01	1999-12-31
9	9	6	1962-01-01	1999-12-31
10	10	7	1962-01-01	1999-12-31
11	11	1	2000-01-01	infinity
12	12	2	2000-01-01	infinity
13	13	3	2000-01-01	infinity
14	14	4	2000-01-01	infinity
15	15	5	2000-01-01	infinity
16	16	6	2000-01-01	infinity
17	17	7	2000-01-01	infinity
18	18	8	2000-01-01	infinity

Na figura 35 apresenta-se a tabela *cst_gm*, que é a tabela que armazena as geometrias referentes à entidade *CST*. A tabela contém o identificador das geometrias (*gid_cst*), e a indicação da bacia a qual essas geometrias pertencem (*oid_b*). A coluna *geom_cst* é a coluna que armazena o dado geométrico.

Na figura 36 apresenta-se a tabela *cst_at*, que é a tabela que armazena os atributos referentes à entidade *CST*. Essa tabela armazena todas as classes presentes em qualquer cenário. No caso da entidade *CST*, os atributos são o identificador do atributo (*oid_cst*), a classe de cobertura superficial do terreno, a taxa de impermeabilização (*ti*) e o tipo de cobertura superficial do terreno.

Para definir as geometrias válidas em um determinado intervalo temporal (nesse caso, 01/01/1962 a 31/12/1999) e gerar uma tabela que relacione os atributos às geometrias, aplica-se a seguinte consulta:

```

SELECT csg.gid_cst, csa.oid_cst, csa.classe, csa.tipo, csa.ti,
csg.geom_cst
FROM cst_gm AS csg natural join cst_at AS csa natural join cst_st AS
csst
WHERE csg.gid_cst=csst.instg_cst and csa.oid_cst=csst.instat_cst and
(csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE '1962-01-01', DATE '1999-
12-31');

```

O resultado da consulta é apresentado na figura 37.

Figura 35: Tabela cst_gm.

	gid_cst	oid_b	geom_cst
1	1	1	01060000006E0000000103000000010000000600000023A7341704D4...
2	2	1	010600000053000000010300000027000000A10F000093DD0536DA...
3	3	1	0106000000D00000000103000000100000014000000D64AF9B1D0D...
4	4	1	01060000001300000001030000000100000082000000CABA341704D4...
5	5	1	01060000002000000001030000000200000021000000510289DE27B9...
6	6	1	01060000000100000001030000000100000063000000F47726DC8CB3...
7	7	1	01060000003600000001030000000100000012000000DAD9462D7AC...
8	8	1	010600000040000000010300000001000000390000006621B1E3C7BC...
9	9	1	01060000007B000000010300000001000000160000007231068681B9...
10	10	1	0106000000530000000103000000027000000A20F000093DD0536DA...
11	11	1	01060000001000000001030000000100000022000000B248070437CB...
12	12	1	01060000002E0000000103000000010000001B0000004A48BE5F46B9...
13	13	1	01060000003C0000000103000000010000001A0000001FD148BCA1B7...
14	14	1	0106000000590000000103000000010000000B000000058BE8932DD8...
15	15	1	0106000000360000000103000000010000003900000005F55FCC52CA...
16	16	1	01060000006000000001030000000100000029000000AC6FAE4429C2...
17	17	1	0106000000460000000103000000010000002600000000581D9135BD...
18	18	1	0106000000E1000000010300000001000000A000000466C47F7AFD1...

Figura 36: Tabela cst_at.

	oid_cst	classe	ti	tipo
1	1	edificado muito denso	85	urbanizado
2	2	edificado nao muito denso	65	urbanizado
3	3	edificado com superficies livres	38	urbanizado
4	4	edificado com muitas superficies livres	30	urbanizado
5	5	areas industriais e comerciais	72	urbanizado
6	6	campos e areas verdes	0	nao urbanizado
7	7	areas florestais e vegetacao densa	0	nao urbanizado
8	8	massa dagua	0	nao urbanizado
9	9	corpo dagua	0	nao urbanizado
10	10	pastagem boas condicoes hidrologicas		urbanizado

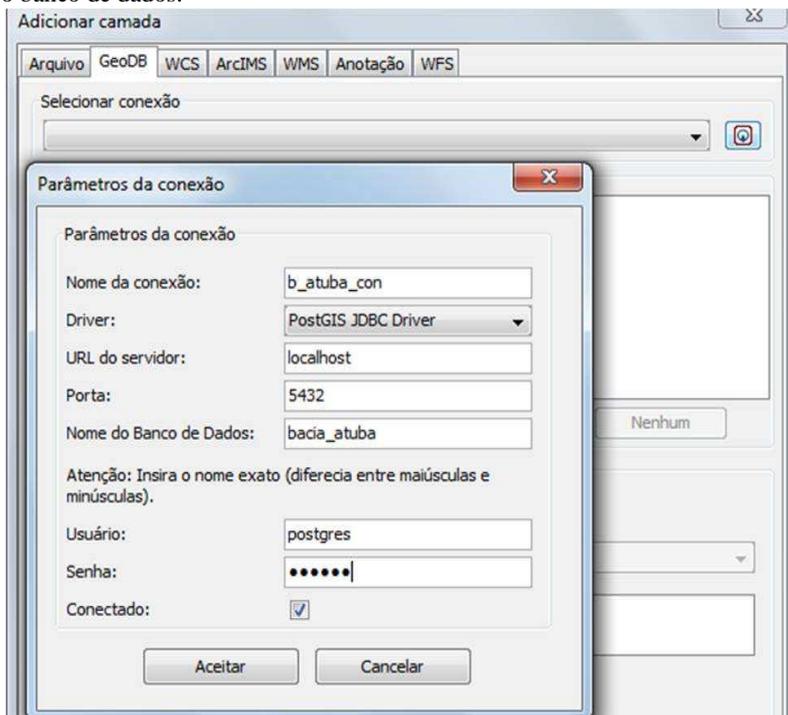
Figura 37: Visão com todas as instâncias da entidade CST, válidas entre 01/01/1962 e 31/12/1999.

gid_cst	oid_cst	classe	tipo	ti	geom_cst
1	3	massa dagua	nao urbanizado	0	01060000000D000000010300000001000000140...
2	4	corpo dagua	nao urbanizado	0	0106000000130000000103000000010000000820...
3	5	edificado muito denso	urbanizado	85	010600000002000000010300000002000000210...
4	6	edificado com superficies livres	urbanizado	38	0106000000010000000103000000010000000630...
5	7	edificado com muitas superficies livres	urbanizado	30	01060000000360000000010300000001000000120...
6	8	areas industriais e comerciais	urbanizado	72	0106000000040000000103000000010000000390...
7	9	campos e areas verdes	nao urbanizado	0	01060000000780000000010300000001000000160...
8	10	areas florestais e vegetacao densa	nao urbanizado	0	010600000005300000000103000000027000000AZ0...

Para que seja possível visualizar o resultado da consulta, é necessário utilizar um software que permita a conexão com o banco de dados e a visualização da visão resultante. Exemplos desse tipo de *software* são o TerraView, o QuantumGIS e o gvSIG. Nesta pesquisa, utilizou-se o gvSIG.

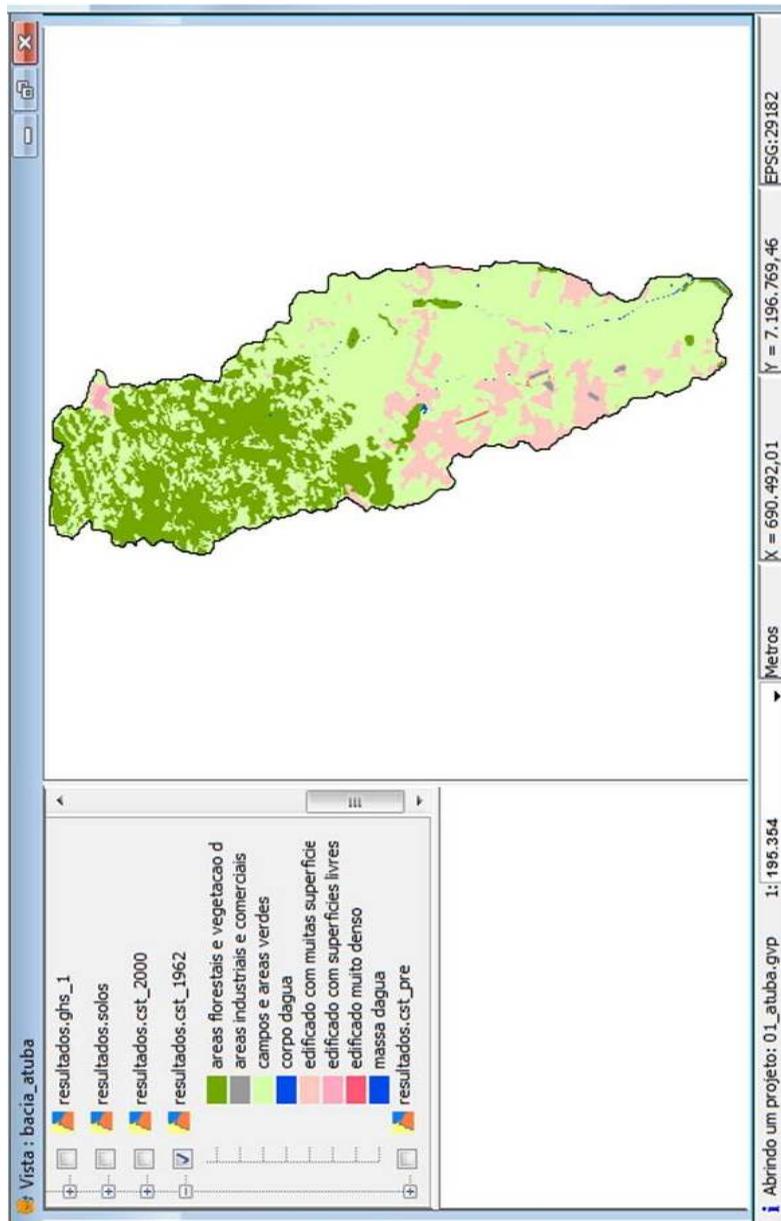
No gvSIG, a conexão com o banco de dados é realizada a partir da ferramenta “adicionar camada”. A figura 38 apresenta a janela adicionar camada, em segundo plano, e a janela “parâmetros de conexão” no plano principal. Após configurar os parâmetros de conexão, basta selecionar as tabelas e/ou visões a serem carregadas e visualizadas no gvSIG. A edição das tabelas ou visões é realizada no próprio gvSIG.

Figura 38: Janela de configuração dos parâmetros de conexão do gvSIG com o banco de dados.



Na figura 39 apresenta-se a visualização da visão obtida como resultado da consulta acerca da entidade “cobertura superficial do terreno” apresentada na figura 37.

Figura 39: Visualização da consulta referente à cobertura superficial do terreno no gvSIG.



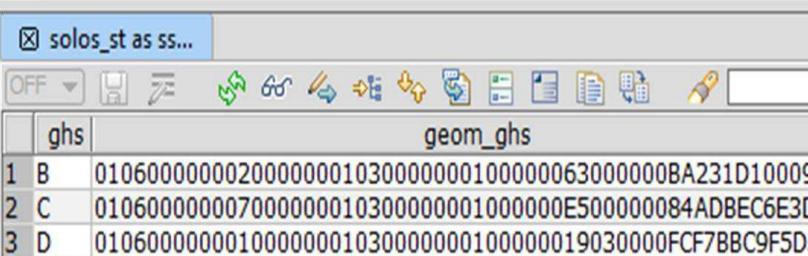
Outro exemplo é a recuperação da entidade *GHS* válida atualmente. A consulta é apresentada abaixo.

```
SELECT gx.ghs, ST_Multi (ST_Union(sg.geom_s)) as geom_ghs
FROM solos_st as sst, solos_gm as sg, solos_at as sa, ghs_ax as gx
WHERE sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.uid_s and
sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and dataf='infinity'
GROUP BY gx.ghs;
```

Pode-se verificar que, além da especificação da data de validade das instâncias (*dataf='infinity'*), a consulta possui uma operação de união (*ST_UNION*). Esta operação é responsável por unir as geometrias dos solos que possuem a mesma classificação hidrológica.

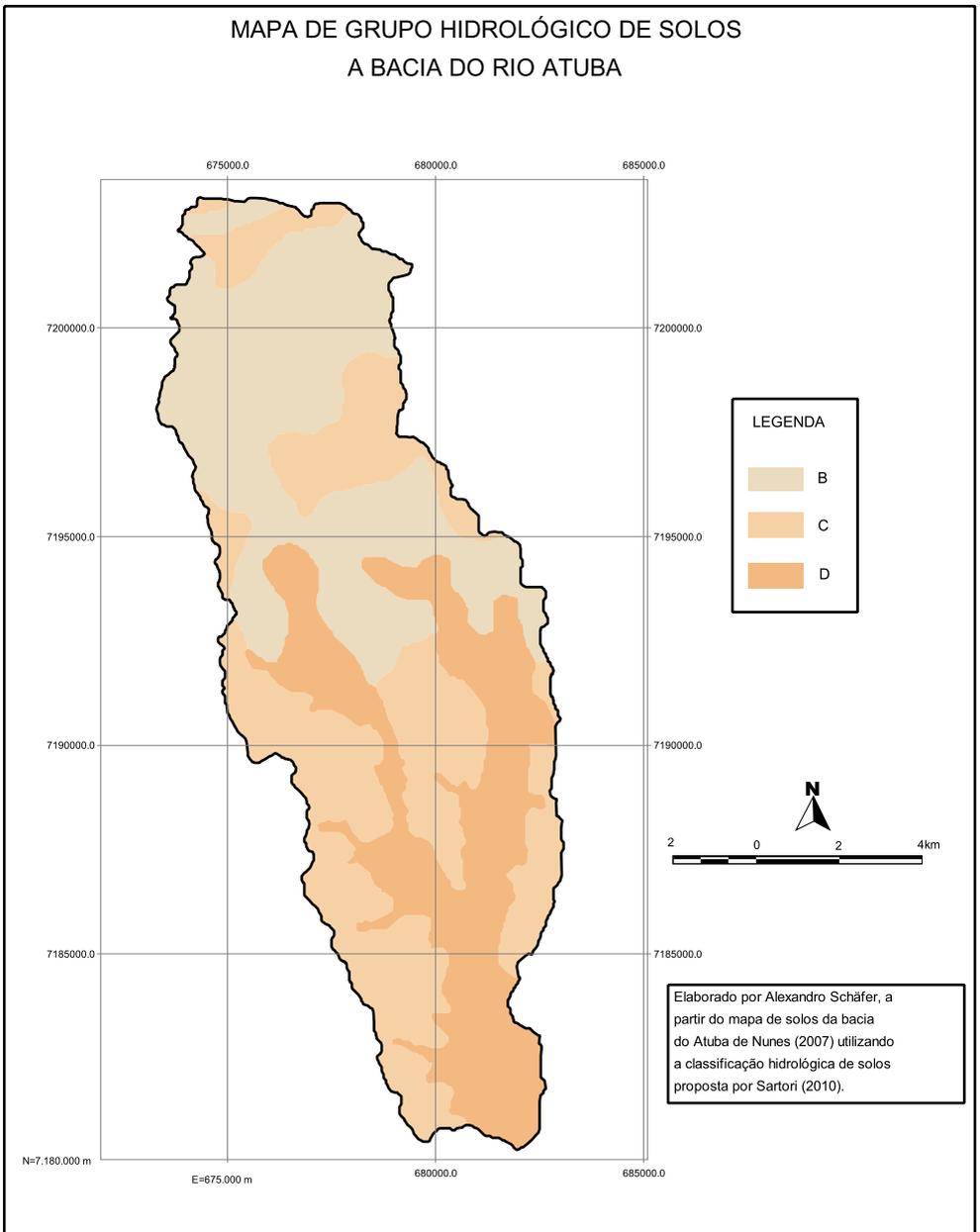
O resultado da consulta é apresentado na figura 40. A visualização dessa visão é apresentada na figura 41.

Figura 40: Grupos hidrológicos de solos na bacia hidrográfica do rio Atuba e suas respectivas geometrias.



	ghs	geom_ghs
1	B	0106000000002000000010300000001000000630000008A231D10009
2	C	0106000000007000000010300000001000000E500000084ADBEC6E30
3	D	010600000000100000001030000000100000019030000FCF7BBC9F5D

Figura 41: Mapa de grupo hidrológico de solos da bacia hidrográfica do rio Atuba.



5.4.1.2 Estados e mudanças das entidades

Os estados que uma entidade apresenta ao longo do tempo são armazenados em tabelas específicas. A figura 42 apresenta um exemplo dos três estados armazenados no banco de dados pela entidade *CST* (42a) e dos seis estados apresentados pela entidade *zona_pd* (42b).

Figura 42: Tabelas que armazenam os estados da entidade *cst* (a) e *zona_pd* (b).

a)

est_cst			
	id_estcst	datai	dataf
1	1	-infinity	1961-12-31
2	2	1962-01-01	1999-12-31
3	3	2000-01-01	infinity

b)

est_zpd			
	id_estzpd	datai	dataf
1	1	-infinity	2000-01-02
2	2	2000-01-03	2004-02-15
3	3	2004-02-16	2005-11-10
4	4	2005-11-11	2006-10-02
5	5	2006-10-03	2011-09-29
6	6	2011-09-30	infinity

A partir das datas inicial e final registradas nessas tabelas para cada entidade, é possível recuperar as geometrias dessa entidade referentes a cada estado.

Nas figuras 43 a 45, apresentam-se as tabelas *mud_cst*, *mud_zpd* e *mud_solos*, que armazenam as mudanças sofridas pelas entidades *cst*, *zona_pd* e *solos*, respectivamente. Além de armazenar as mudanças, são armazenadas as descrições das mudanças, data de ocorrência da mudança e os identificadores do estado anterior e posterior à ocorrência de cada mudança. Desta maneira, é possível associar a mudança à alteração no estado da entidade.

Figura 43: Tabela mud_cst.

	id_mcst	desc_mcst	data	id_estcst_ant	id_estcst
1	1	Levantamento aerofotogrametrico	1962-01-01	1	2
2	2	Levantamento aerofotogrametrico	2000-01-01	2	3

Figura 44: Tabela mud_zpd.

	id_mzpd	oid_mun	desc_mzpd
1	1	4106902	Lei 9800/2000 - Dispoe sobre o zoneamento, uso e ocupacao c
2	2	4105805	Lei 875/2004 - Institui o plano diretor do municipio de Colombo
3	3	4125506	Lei complementar 16/2005 - Dispoe sobre o zoneamento, o uso
4	4	4100400	Lei complementar 2/2006 - dispoe sobre o codigo de zoneamer
5	5	4119509	Lei 1233/2011 - Dispoe sobre o zoneamento, o uso e a ocupac

Figura 45: Tabela mud_solos.

	id_msolos	desc_msolos	data	id_e
1	1	Novos criterios para a classificacao hidrologica de solos	2010-07-02	1

É possível ainda verificar se existe alguma mudança em uma entidade em um determinado período de tempo. A consulta abaixo verifica se ocorreu alguma mudança na cobertura superficial do terreno na bacia entre 10/10/1980 e 10/10/2005.

```
SELECT mc.id_mcst, mc.desc_mcst, mc.data
FROM mud_cst as mc
WHERE (mc.data, mc.data) OVERLAPS (DATE '1980-10-10', DATE
'2005-10-10');
```

O resultado da consulta é apresentado na figura 46.

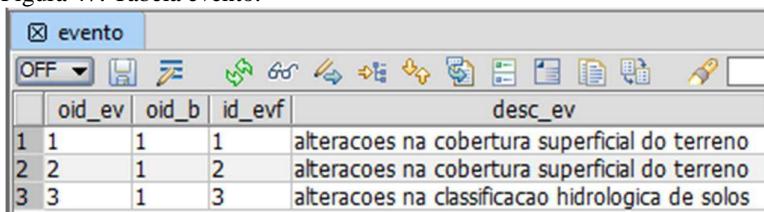
Figura 46: Mudanças na cobertura superficial do terreno entre 10/10/1980 e 10/10/2005.

	id_mcst	desc_mcst	data
1	2	Levantamento aerofotogrametrico	2000-01-01

5.4.1.3 Eventos

Para consultar os eventos registrados para a bacia hidrográfica, basta recuperar a tabela evento. A figura 47 apresenta esta tabela.

Figura 47: Tabela evento.



	oid_ev	oid_b	id_evf	desc_ev
1	1	1	1	alteracoes na cobertura superficial do terreno
2	2	1	2	alteracoes na cobertura superficial do terreno
3	3	1	3	alteracoes na classificacao hidrologica de solos

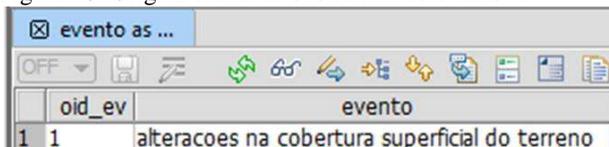
As mudanças referentes às zonas de uso e ocupação do solo, apresentadas na figura 44, não são consideradas eventos, pois se tratam da primeira versão do zoneamento de uso e ocupação do solo registrada para cada município.

Para verificar o que ocasionou o evento (e a sua data de ocorrência), deve-se relacionar o evento à entidade que o ocasionou. Por exemplo, para realizar essa verificação para o evento '1', aplica-se a seguinte consulta:

```
SELECT e.oid_ev, e.desc_ev as evento, m.desc_mcst as origem, m.data
as data_evento
FROM evento as e, ev_fonte as ef, mud_cst as m
WHERE e.id_evf=ef.id_evf and ef.id_mcst=m.id_mcst and e.oid_ev='1'
```

O resultado da consulta é apresentado na figura 48.

Figura 48: Origem e data de ocorrência do evento '1'.



oid_ev	evento
1	alteracoes na cobertura superficial do terreno

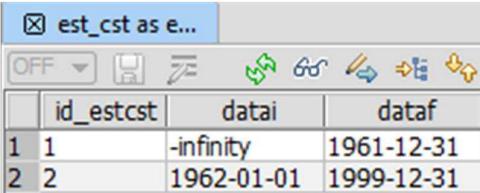
origem	data_evento
Levantamento aerofotogrametrico	1962-01-01

Para verificar quais entidades foram alteradas por esse evento e qual a situação inicial e final de cada entidade, aplica-se a seguinte consulta:

```
SELECT ec.id_estcst, ec.datai, ec.dataf
FROM est_cst as ec, mud_cst as m, ev_fonte as ef, evento as e
WHERE e.id_evf=ef.id_evf and ef.id_mcst=m.id_mcst and e.oid_ev='1'
and m.id_estcst_ant=ec.id_estcst
UNION
SELECT ec.id_estcst, ec.datai, ec.dataf
FROM est_cst as ec, mud_cst as m, ev_fonte as ef, evento as e
WHERE e.id_evf=ef.id_evf and ef.id_mcst=m.id_mcst and e.oid_ev='1'
and m.id_estcst_pos=ec.id_estcst
```

O resultado da consulta é apresentado na figura 49.

Figura 49: Estado anterior e posterior à ocorrência do evento um.



	id_estcst	datai	dataf
1	1	-infinity	1961-12-31
2	2	1962-01-01	1999-12-31

Verifica-se que os estados anterior e posterior à ocorrência do evento são o estado um (com intervalo de validade entre '-infinity' e 31/12/1961) e o estado dois (com intervalo de validade entre 01/01/1961 e 31/12/1999). Conhecendo-se esses intervalos, é possível recuperar todas as instâncias das classes de cobertura superficial do terreno válidas para esses dois intervalos e, a partir daí, proceder as análises da bacia hidrográfica para o evento um.

5.4.1.4 Verificações e simulações

É possível registrar, no banco de dados, cada verificação e simulação realizada e, a partir de uma consulta, verificar os parâmetros considerados nas verificações e simulações. Na figura 50, apresenta-se a tabela verif_simula, com várias simulações e verificações cadastradas.

Por meio de consultas, é possível relacionar a tabela verif_simula às tabelas que contém os parâmetros e informações relevantes à

execução da verificação e simulação, através dos identificadores (ids) armazenados nessa tabela. Para saber do que trata a verificação e simulação armazenada no banco de dados com identificador 'um', por exemplo, aplica-se a seguinte consulta:

```
SELECT vs.oid_vsim, ba.nome_b as bacia, pv.valor_pac as
precipitacao, pv.und as und, px.tipo_pac, arc.desc_arc as arc,
cv.valor_cai as coef_abst, cdg.desc_cghs as cond_ghs, ec.datai as
datai_cst, ec.dataf as dataf_cst, es.datai as datai_solos, es.dataf as
dataf_solos, esb.datai as datai_subbacia, esb.dataf as dataf_subbacia,
ez.datai as datai_zpd, ez.dataf as dataf_zpd, vs.data
FROM bacia_at as ba, pacval as pv, pac as p, pac_ax as px, arc,
cond_ghs as cdg, coefai_val as cv, est_cst as ec, est_solos as es, est_sb
as esb, est_zpd as ez, verif_simula as vs
WHERE vs.oid_b=ba.oid_b and vs.oid_pac=p.oid_pac and
p.oid_vpac=pv.oid_vpac and p.id_tipopac=px.id_tipopac and
vs.id_arc=arc.id_arc and vs.id_coefai=cv.id_coefai and
vs.id_condghs=cdg.id_condghs and vs.id_estcst=ec.id_estcst and
vs.id_estsolos=es.id_estsolos and vs.id_estzpd=ez.id_estzpd and
vs.oid_vsim='1';
```


Verifica-se que foi uma verificação e simulação realizada utilizando uma precipitação de 96,32mm, calculada a partir de uma equação de IDF (ou equação de chuvas intensas – ECI), com coeficiente de abstração de 0,05 e considerando condições de ARC-II. Não foi considerada a alteração nos grupos hidrológicos de solos devido à ocorrência de urbanização. Verifica-se ainda que a verificação e simulação foi realizada para as instâncias das entidades *CST*, *solos*, *sub-bacia* e *zona_pd* válidas atualmente.

5.4.2 Simulação de análise das características da bacia hidrográfica do rio Atuba/Pr-Brasil e estimativas do escoamento superficial direto

A simulação de análise da bacia hidrográfica do rio Atuba é apresentada em três etapas. Inicialmente se apresenta os resultados das quantificações das alterações na cobertura superficial do terreno ocorridas entre os cenários de 1962 e 2000. Em seguida, são apresentados os resultados referentes à estimativa do escoamento superficial direto, considerando os cenários de pré-urbanização, de 1962, de 2000 e de plano diretor. Por fim, as alterações na cobertura superficial do terreno são relacionadas às alterações no escoamento superficial direto, levando em consideração a questão da variação nas características hidrológicas dos solos existentes na bacia do Atuba. Optou-se por utilizar o termo “simulação de análise” ao invés de análise, pois o autor considera que os produtos cartográficos da área de estudo a que teve acesso e utilizou na presente tese não permitem que os resultados obtidos reflitam as reais condições da bacia hidrográfica. Desta maneira, não é possível afirmar que esses resultados sejam confiáveis a ponto de serem aplicados no processo de tomada de decisão relacionado à gestão integrada da bacia hidrográfica do rio Atuba.

5.4.2.1 Verificação das características da bacia hidrográfica

Na tabela 4 apresenta-se a quantificação das alterações ocorridas em cada classe de cobertura superficial do terreno, entre os cenários de 1962 e de 2000, bem como da diferença em cada classe com relação a área total da bacia hidrográfica. O quadro 12 apresenta o conjunto de consultas para a realização desta quantificação.

Quadro 12: *Script* das consultas para a quantificação das alterações na cobertura superficial do terreno entre 1962 e 2000.

Descrição	Script das consultas
Cálculo da área ocupada por cada classe de cobertura superficial do terreno no cenário de 1962.	<pre> SELECT classe, (select st_area(geom_cst)/1000000) AS acst_1962 from cst_gm as csg, cst_st as csst, cst_at as csa where (csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE'1962-01-01', DATE '1999-12-31') and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst; </pre>
Cálculo da área ocupada por cada classe de cobertura superficial do terreno no cenário de 2000.	<pre> SELECT classe, (select st_area(geom_cst)/1000000) as acst_2000 from cst_gm as csg, cst_st as csst, cst_at as csa where csst.dataf='infinity' and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst; </pre>
Cálculo das alterações nas áreas ocupadas por cada classe de cobertura superficial do terreno entre 1962 e 2000.	<pre> SELECT ca.classe, (select (ca.acst_2000/(st_area(bg.geom_b)/1000000)* 100) - (ca.acst_1962/(st_area(bg.geom_b)/1000000)* 100)) as diferenca FROM resultados.area_cst as ca, bacia_gm as bg; </pre>

Tabela 4: Quantificação das classes de cobertura superficial do terreno nos cenários de 1962 e de 2000.

Classe de cobertura superficial do terreno	Área 1962 (km²)	Área 2000 (km²)	Diferenças entre 1962 e 2000 (% com relação à área total da bacia)
Edificações muito densas	0,16	9,40	7,25
Edificações não muito densas	0,00	18,66	14,64
Edificações com superfícies livres	0,27	17,68	13,66
Edificações com muitas superfícies livres	15,59	15,16	-0,34
Áreas comerciais e industriais	0,27	8,11	6,15
Campos e áreas verdes	76,11	26,94	-38,54
Áreas florestais e com vegetação densa	34,68	30,68	-3,14
Massa d'água	0,06	0,51	0,35
Curso d'água	0,29	0,29	-

De acordo com os dados apresentados na tabela 4, verifica-se que houve não só o aumento nas áreas urbanizadas, mas também a densificação dessas áreas entre os dois cenários. Isto é evidenciado pelo expressivo aumento nas áreas ocupadas pelas classes que apresentam maior taxa de impermeabilização do terreno e pela redução na área ocupada pela classe 'edificações com muitas superfícies livres'. Verifica-se ainda que as mudanças na cobertura superficial do terreno associadas à ocupação da bacia do Atuba foram mais pronunciadas em áreas anteriormente ocupadas pela classe 'campos e áreas verdes' do que em áreas ocupadas pela classe 'áreas florestais e vegetação densa'.

Em termos gerais, as áreas urbanizadas passaram a ocupar 54,16% da bacia, contra 12,78% em 1962. Consequentemente, as áreas não urbanizadas foram reduzidas de 87,22% da área total da bacia em 1962 para 45,84% em 2000.

A taxa de impermeabilização média na bacia, para os cenários de 1962, de 2000 e de plano diretor foi obtida a partir da seguinte consulta:

```

SELECT '1962' as cenario,
(cast((sum(ti*(st_area(geom_cst)))/sum(st_area(geom_cst))) as numeric
(10,2))) as taxa_imp FROM cst_st as cs, cst_gm as cg, cst_at as ca
WHERE cs.instat_cst=ca.oid_cst and cs.instg_cst=cg.gid_cst and
(cs.datai, cs.dataf) OVERLAPS (DATE'1962-01-01', DATE '1999-12-
31')
UNION
SELECT '2000' as cenario,
(cast((sum(ti*(st_area(geom_cst)))/sum(st_area(geom_cst))) as numeric
(10,2))) as taxa_imp
FROM cst_st as cs, cst_gm as cg, cst_at as ca
WHERE cs.instat_cst=ca.oid_cst and cs.instg_cst=cg.gid_cst and
cs.dataf='infinity'
UNION
SELECT 'plano diretor' as cenario, (cast((sum((100-
tmp)*area)/sum(area)) as numeric (10,2))) as taxa_imp
FROM resultados.base_urhzipd_pd
ORDER BY cenário

```

O resultado da consulta é apresentado na figura 52.

Figura 52: Taxa de impermeabilização média na bacia hidrográfica.

	cenario	taxa_imp
1	1962	4.01
2	2000	29.20
3	plano diretor	67.62

Verifica-se que o aumento das áreas urbanizadas, bem como o seu adensamento, ocasionou um aumento de 25,19% na impermeabilização da bacia, que passou de 4,01% em 1962 para 29,20% em 2000. No entanto, verifica-se que ela ainda está longe da taxa de impermeabilização máxima prevista para o cenário de plano diretor.

O BDET possibilita que se verifique onde ocorreram as alterações em cada classe de cobertura superficial do terreno entre dois cenários. O conjunto de consultas apresentadas no quadro 13 possibilita

a verificação das áreas cobertas pela classe ‘edificado com muitas superfícies livres’ entre os cenários de 1962 e de 2000.

Quadro 13: *Script* das consultas para a determinação das alterações na classe ‘edificado com muitas superfícies livres’ entre os cenários de 1962 e de 2000.

Descrição	Script
<p>Recuperação das geometrias referentes à classe ‘edificado muito denso’ dos cenários de 1962 e de 2000 e sobreposição espacial (overlay) dessas geometrias</p>	<pre>select '1962 e 2000' as id, g1.oid_cst, g1.gid_cst as gid_1962, g2.gid_cst as gid_2000, ST_intersection (g1.geom_cst, g2.geom_cst) as geom_cst from (SELECT csa.oid_cst, csg.gid_cst, csg.geom_cst from cst_st as csst natural join cst_gm as csg natural join cst_at as csa where csg.gid_cst=csst.instg_cst and csa.oid_cst=csst.instat_cst and oid_cst='4' and (csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE'1962-01- 01', DATE '1999-12-31')) as g1 inner join (SELECT csa.oid_cst, csg.gid_cst, csg.geom_cst from cst_st as csst natural join cst_gm as csg natural join cst_at as csa where csg.gid_cst=csst.instg_cst and csa.oid_cst=csst.instat_cst and oid_cst='1' and csst.dataf='infinity') as g2 on intersects (g1.geom_cst, g2.geom_cst)</pre>
<p>Operação de diferença entre as geometrias relativas aos cenários de 1962 e de 2000.</p>	<pre>select '1962' as id, g1.oid_cst, g1.gid_cst as gid_1962, null as gid_2000, ST_difference (g1.geom_cst, g2.geom_cst) as geom_cst from (SELECT csa.oid_cst, csg.gid_cst, csg.geom_cst from cst_st as csst natural join cst_gm as csg natural join cst_at as csa where csg.gid_cst=csst.instg_cst and csa.oid_cst=csst.instat_cst and oid_cst='4' and (csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE'1962-01- 01', DATE '1999-12-31')) as g1 inner join (SELECT csa.oid_cst, csg.gid_cst, csg.geom_cst from cst_st as csst natural join cst_gm as csg natural join cst_at as csa where csg.gid_cst=csst.instg_cst and csa.oid_cst=csst.instat_cst and oid_cst='1' and csst.dataf='infinity') as g2 on g1.oid_cst='1'</pre>

<p>Operação de diferença entre as geometrias relativas aos cenários de 2000 e de 1962.</p>	<pre>select '2000' as id, g1.oid_cst, null as gid_1962, g2.gid_cst as gid_2000, ST_difference (g2.geom_cst, g1.geom_cst) as geom_cst from (SELECT csa.oid_cst, csg.gid_cst, csg.geom_cst from cst_st as csst natural join cst_gm as csg natural join cst_at as csa where csg.gid_cst=csst.instg_cst and csa.oid_cst=csst.instat_cst and oid_cst='4' and (csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE'1962-01- 01', DATE '1999-12-31')) as g1 inner join (SELECT csa.oid_cst, csg.gid_cst, csg.geom_cst from cst_st as csst natural join cst_gm as csg natural join cst_at as csa where csg.gid_cst=csst.instg_cst and csa.oid_cst=csst.instat_cst and oid_cst='1' and csst.dataf='infinity') as g2 on g1.oid_cst='1';</pre>
<p>Cálculo da área ocupada pela classe de cobertura superficial do terreno em 1962, em 2000 e em 1962 e 2000.</p>	<pre>select id, cast((st_area(geom_cst)/1000000) as numeric(10,2)) as area, 'km2' as und from resultados.dif4_62_2000 where id='1962' UNION select id, cast((st_area(geom_cst)/1000000) as numeric(10,2)) as area, 'km2' as und from resultados.dif4_62_2000 where id='1962 e 2000' UNION select id, cast((st_area(geom_cst)/1000000) as numeric(10,2)) as area, 'km2' as und from resultados.dif4_62_2000 where id='2000' order by id</pre>

A visualização do resultado dessa consulta é apresentada na figura 53. A visão com o resultado dos cálculos de áreas é apresentado na figura 55. A primeira linha dessa visão refere-se ao que existia em 1962 e não existe mais em 2000. A segunda linha refere-se ao que existia em 1962 e continuou existindo em 2000. A terceira linha refere-se ao que não existia em 1962 e passou a existir em 2000. Nas figuras 54 e 56, apresentam-se os resultados das mesmas consultas, aplicadas à classe “campos e áreas verdes”.

Figura 53: Mapa de alterações na classe de cobertura superficial do terreno 'Edificado com muitas superfícies livres', entre os cenários de 1962 e de 2000.

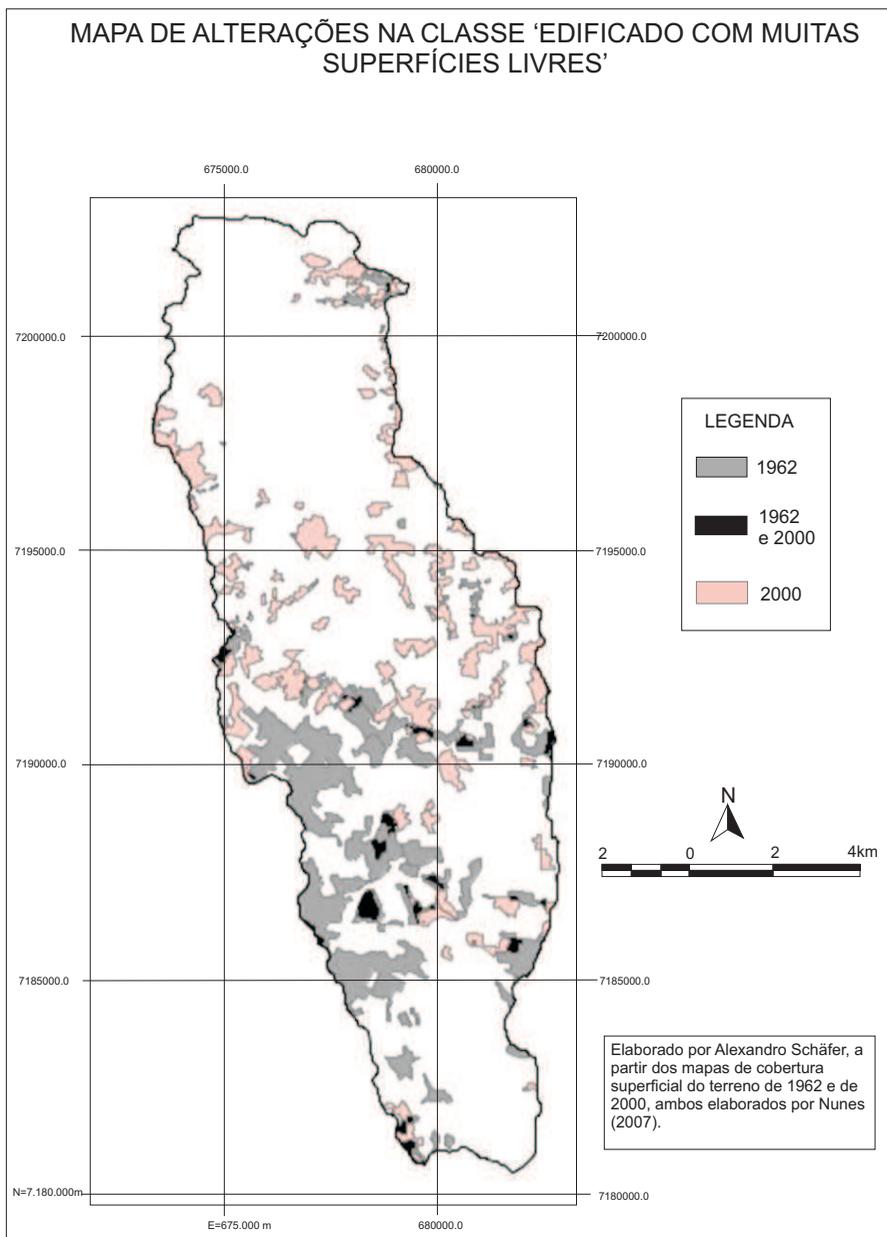


Figura 54: Mapa de alterações na classe de cobertura superficial do terreno 'Campos e áreas verdes', entre os cenários de 1962 e de 2000.

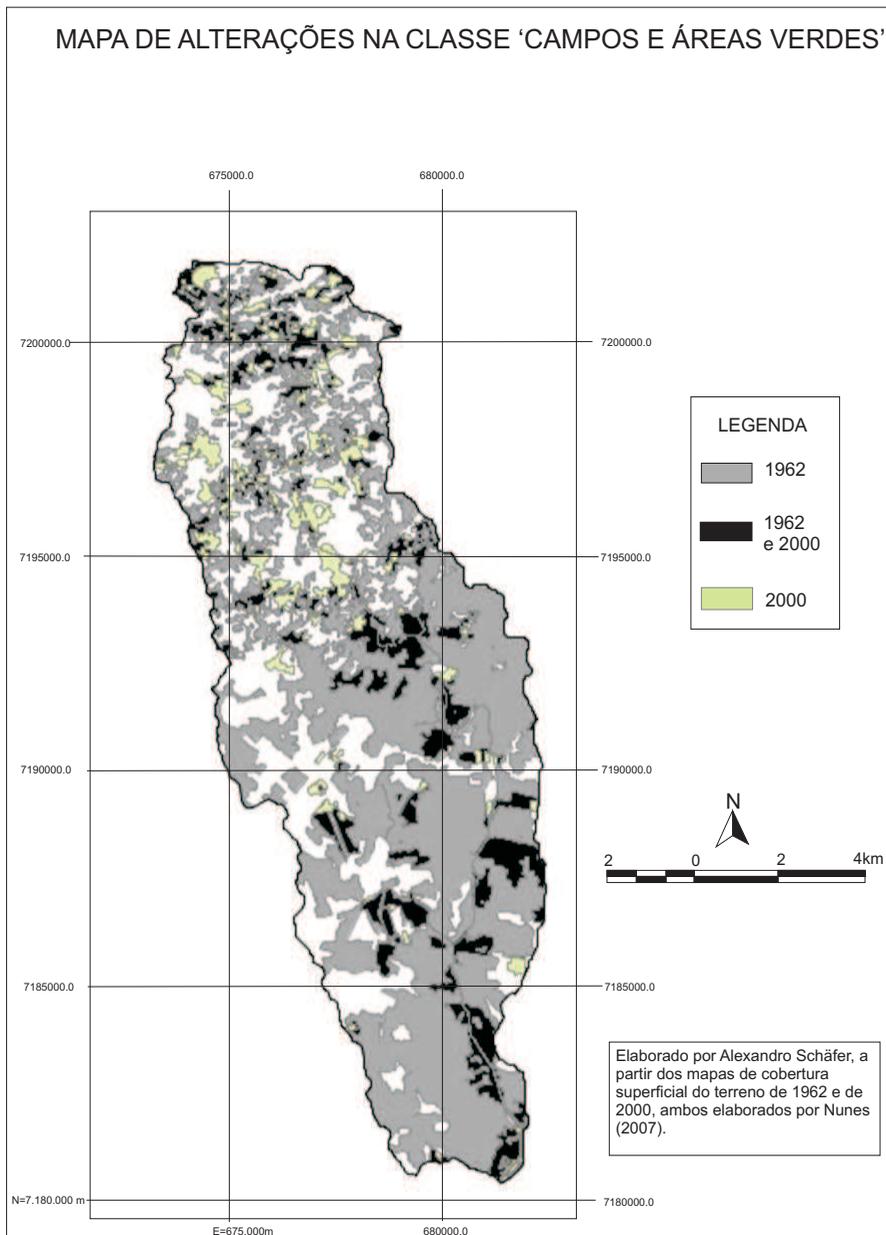


Figura 55: Visão com o cálculo das áreas referentes à classe 'edificado com muitas superfícies livres'.

	id	area	und
1	1962	13.89	km2
2	1962 e 2000	1.70	km2
3	2000	13.45	km2

Figura 56: Visão com o cálculo das áreas referentes à classe 'campos e áreas verdes'.

	id	area	und
1	1962	58.35	km2
2	1962 e 2000	17.75	km2
3	2000	9.25	km2

5.4.2.1.1 Verificação das características da bacia hidrográfica em cada município e zona de uso e ocupação do solo no interior da bacia do Atuba

O BDET possibilita que se verifique as características da bacia hidrográfica em nível de município e zona de plano diretor, o que permite averiguar quem é o responsável por quais alterações na bacia hidrográfica.

Na tabela 5 apresentam-se os resultados da quantificação da evolução da taxa de impermeabilização e a relação entre as taxas de impermeabilização dos cenários de 1962 e de 2000 com relação ao cenário de plano diretor. Apresentam-se, na tabela 6, os resultados com relação ao aumento da taxa de urbanização e a relação entre esse aumento e o aumento na taxa de impermeabilização.

Tabela 5: Evolução da taxa de impermeabilização (TI) nas áreas pertencentes a cada município.

Município	Área ocupada na bacia (%)	TI 1962 (%)	TI 2000 (%)	TI PD (%)	TI 1962/ TI PD	TI 2000/ TI PD
Almirante Tamandaré	13,53	0,03	6,82	70,27	0,04	9,71
Colombo	27,73	1,06	14,50	63,47	1,67	22,84
Curitiba	50,34	6,75	42,47	69,35	9,74	61,24
Pinhais	8,3	3,77	34,87	67,28	5,61	51,84
São José dos Pinhais	0,1	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00

Tabela 6: Relação entre o aumento da taxa de urbanização (TU) e o aumento da taxa de impermeabilização (TI).

Município	Aumento na TU (%)	Aumento na TI (%)	Relação TI/TU
Almirante Tamandaré	2,6	0,91	0,35
Colombo	9,31	3,72	0,40
Curitiba	25,11	17,97	0,72
Pinhais	4,35	2,58	0,59
S. J. dos Pinhais	0	0	0

Verifica-se que entre os cenários de 1962 e de 2000 houve um aumento da mancha urbana nas áreas de todos os municípios que compõem a bacia do Atuba e, conseqüentemente, um aumento na taxa de impermeabilização (com exceção de São José dos Pinhais, cuja área no interior da bacia não apresentava urbanização nesses cenários). Desses municípios, Curitiba foi o que apresentou o maior aumento na mancha urbana (25,11% com relação a área total da bacia) e na taxa de impermeabilização (17,97% com relação a área total da bacia). Com base na relação entre a taxa de impermeabilização e a taxa de urbanização apresentada na Tabela 6, verifica-se que as áreas urbanizadas de Curitiba sofreram também o maior adensamento. As áreas referentes ao município de Colombo ocupavam a terceira posição com relação à taxa de impermeabilização em 1962 (0,33%), e passaram a ocupar a segunda posição em 2000 (4,05%). O município de Pinhais, apesar de ter apresentado um aumento na taxa de impermeabilização

menor do que o município de Colombo, apresentou uma maior densificação da urbanização.

Com o objetivo de verificar a taxa de impermeabilização média em cada zona de uso e ocupação do solo, foi desenvolvido o conjunto de consultas apresentado no quadro 14. Os resultados das consultas são apresentados no quadro 15.

Quadro 14: *Script* das consultas para o cálculo da taxa de impermeabilização média em cada zona de uso e ocupação do solo.

Descrição	Script
Sobreposição espacial entre a cobertura superficial do terreno válida em 2000 e as zonas de uso e ocupação do solo	<i>Select csa.classe, csa.tipo, csa.ti, instg_zpd, sigla_zpd, ST_INTERSECTION (csg.geom_cst, zg.geom_zpd) as geom_cstzpd from cst_st as csst, cst_gm as csg, cst_at as csa, zonapd_st as zst, zonapd_gm as zg, zonapd_at as za, zonapd_ax as zx where csst.dataf='infinity' and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst and zst.dataf='infinity' and zst.instg_zpd=zg.gid_zpd and zst.instat_zpd=za.oid_zpd and za.oid_zpd=zx.oid_zpd</i>
Cálculo da taxa de impermeabilização média em cada zona de uso e ocupação do solo, no cenário de 2000.	<i>Select instg_zpd, sigla_zpd, ((sum(ti*st_area(geom_cstzpd))/(sum(st_area(geom_cstzpd)))) as ti_zpd from resultados.imp_tese_2000_zpd group by instg_zpd, sigla_zpd order by instg_zpd, sigla_zpd;</i>
Cálculo da impermeabilização em cada zona de uso e ocupação do solo, no cenário de plano diretor.	<i>SELECT zst.instg_zpd, zx.sigla_zpd, (100-za.tmp) as ti_zpd from zonapd_at as za, zonapd_st as zst, zonapd_ax as zx, municipio_ax as mx where zst.instat_zpd=za.oid_zpd and za.oid_zpd=zx.oid_zpd ORDER BY instg_zpd, sigla_zpd;</i>
Sobreposição espacial entre a CST e zonas de uso e ocupação do solo e cálculo da relação	<i>SELECT a.instg_zpd, a.sigla_zpd, a.municipio, (cast((a.ti_zpd/b.ti_zpd*100) as numeric (10,2))) as rel_imp,</i>

entre a taxa de impermeabilização do cenário de 2000 com relação à taxa de impermeabilização permitida no plano diretor.	$zg.geom_zpd$ $FROM resultados.imp_zpd_2000$ as a, $resultados.imp_zpd_pd$ as b, $zonapd_st$ as zst, $zonapd_gm$ as zg $WHERE a.instg_zpd=b.instg_zpd$ and $a.instg_zpd=zst.instg_zpd$ and $zst.instg_zpd=zg.gid_zpd$;
--	--

Quadro 15: Taxa de impermeabilização média (TI) em cada zona de uso e ocupação do solo e situação da impermeabilização nos cenários de 1962 e 2000, com relação ao cenário de plano diretor (TI “cenário”/TI PD).

Município	gid_zpd	sigla_zpd	TI 1962 (%)	TI 2000 (%)	TI PD (%)	TI 1962/ TI PD	TI 2000/ TI PD
Almirante Tamandaré	1	ZRU-A	0,00	0,40	50	0,00	0,79
	2	ZEIS	0,00	8,90	85	0,00	10,47
	3	ZR1	0,00	22,91	80	0,00	28,64
	4	ZRE	0,00	0,15	80	0,00	0,18
	5	ZR1	0,00	0,00	80	0,00	0,00
	6	ZR3	0,00	14,66	80	0,00	18,32
	7	ZR1	0,00	11,52	80	0,00	14,40
	8	ZEIS	0,00	29,25	85	0,00	34,41
	9	ZCH	0,00	0,00	60	0,00	0,00
	10	ZEP	0,00	0,00	50	0,00	0,00
	11	ZI	0,00	10,89	80	0,00	13,62
	12	ZR2	0,21	13,35	80	0,27	16,69
	13	ZEIS	0,00	25,36	85	0,00	29,84
Colombo	14	PAV	0,00	4,37	10	0,00	43,66
	15	ZUD3	0,32	15,59	75	0,43	20,78
	16	ZUPI1	0,02	39,91	85	0,02	46,95
	17	ZUD3	1,79	35,54	75	2,39	47,38
	18	ZUD4	1,95	22,63	85	2,29	26,62
	19	ZUPI2	0,00	0,88	30	0,00	2,92
	20	ZUD1	0,39	3,67	75	0,52	4,90
	21	ZPAC2	2,82	10,72	85	3,32	12,61
	22	ZDR	0,00	1,85	30	0,00	6,16
	23	ZPAC1	26,41	34,94	85	31,07	41,11
	24	ZDR	0,00	0,00	30	0,00	0,00
	25	PAV	0,00	0,00	10	0,00	0,00
	26	ZUD1	0,03	13,02	75	0,04	17,36

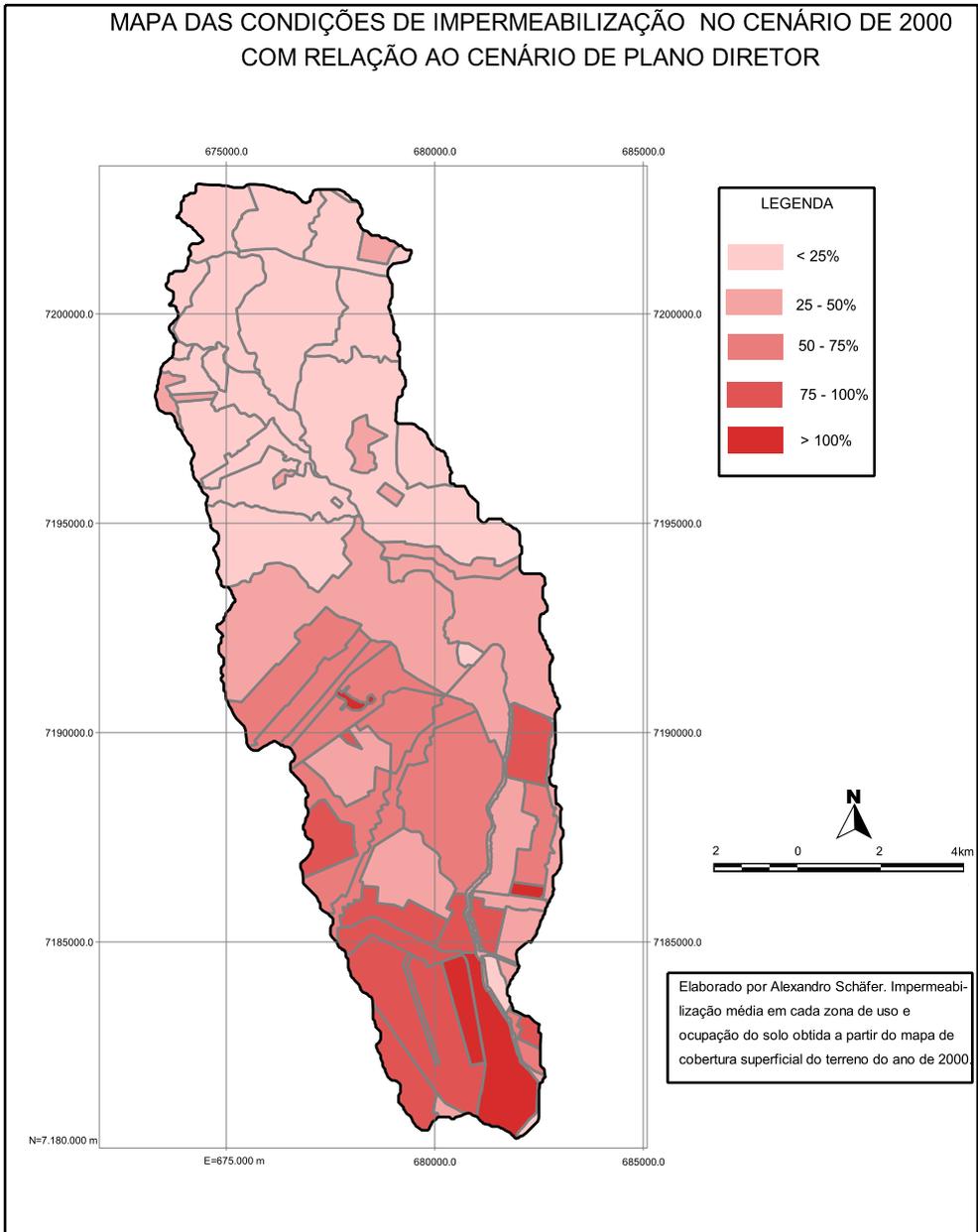
Curitiba	27	ZR-4	12,64	50,36	75	16,85	67,15	
	28	ZR-3	6,97	69,10	75	9,30	92,14	
	29	SEHIS	11,90	30,13	75	15,87	40,17	
	30	ZR-3	12,70	48,58	75	16,94	64,78	
	31	ZS-1	5,12	35,81	75	6,83	47,75	
	32	ZR-3	8,81	66,10	75	11,75	88,13	
	33	SE-AC	18,83	70,73	75	25,11	94,31	
	34	APA Iguacu	0,00	40,74	10	0,00	407,4	
	35	ZT-BR116	14,13	50,19	75	18,83	66,92	
	36	ZR-1	12,57	62,28	75	16,76	83,04	
	37	ZR-3	24,79	64,40	75	33,06	85,87	
	38	ZE-M	10,82	31,13	75	14,43	41,51	
	39	ZR-3	18,72	50,84	75	24,96	67,79	
	40	PPB	4,89	20,34	10	48,86	203,3	
	41	ZR-4	17,37	48,34	75	23,16	64,45	
	42	SEHIS	0,00	78,93	75	0,00	105,2	
	43	SE	11,82	54,54	75	15,77	72,72	
	44	SE-CB	11,49	73,76	75	15,32	98,35	
	45	ZR-2	4,35	59,06	75	5,79	78,74	
	46	ZR-3	7,22	43,29	75	9,63	57,71	
	47	SEHIS	0,00	59,54	75	0,00	79,38	
	48	ZR-2	0,90	24,56	75	1,20	32,75	
	49	ZE-D	12,98	33,32	75	17,31	44,43	
	50	ZR-OC	0,09	5,81	50	0,17	11,62	
	51	ZR-2	3,96	43,94	75	5,28	58,59	
	59	ZR-3	0,77	19,81	75	1,03	26,41	
	Pinhais	52	ZMC	5,59	58,87	60	9,32	98,11
		53	ZC	19,32	24,76	75	25,76	33,01
		54	ZMC	2,86	32,29	60	4,77	53,81
55		ZR	0,00	72,25	60	0,00	120,4	
56		ZS	0,23	27,35	75	0,30	36,47	
57		ECS1	7,52	37,85	80	9,40	47,31	
58		ZA	0,00	6,84	40	0,00	17,10	
60		ECS4	0,00	49,94	70	0,00	71,34	
61		ZR	2,91	48,43	60	4,86	80,71	
62		ECS3	2,82	43,24	80	3,52	54,05	
63		ZMC	7,81	29,16	60	13,02	48,60	
64		ZMC	0,46	55,26	60	0,76	92,10	
65		ECS2	4,74	27,72	75	6,32	36,96	

São José dos Pinhais	66	ZRO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	67	ZRO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Verifica-se que já em 2000 havia algumas zonas de uso e ocupação do solo que apresentam impermeabilização média acima do previsto nos planos diretores dos respectivos municípios. Enquanto várias outras se aproximavam do valor limite.

Na figura 57, apresenta-se a visualização da visão resultante da consulta apresentada no quadro 15, com as zonas de uso e ocupação do solo classificadas de acordo com a relação entre a taxa de impermeabilização no cenário de 2000 e a taxa de impermeabilização (TI) no cenário de plano diretor.

Figura 57: Mapa da impermeabilização no cenário de 2000 com relação ao cenário de plano diretor.

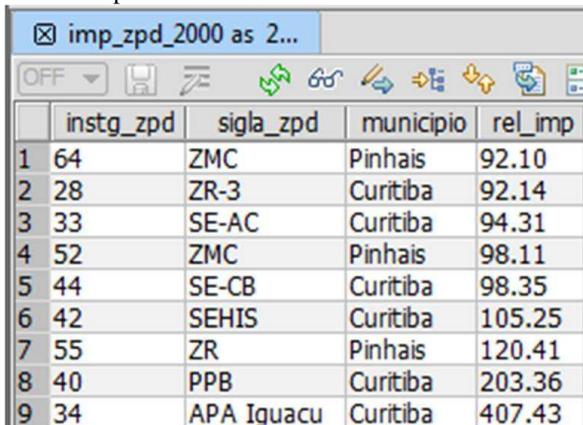


Para listar as zonas de uso e ocupação que apresentam um determinado valor entre a taxa de impermeabilização do cenário de 2000 e de plano diretor (maior que 90%, por exemplo), é possível aplicar a consulta abaixo.

```
SELECT a.instg_zpd, a.sigla_zpd, a.municipio,
(cast((a.ti_zpd/b.ti_zpd*100) as numeric (10,2))) as rel_imp,
zg.geom_zpd
FROM resultados.imp_zpd_2000 as a, resultados.imp_zpd_pd as b,
zonapd_st as zst, zonapd_gm as zg
WHERE a.instg_zpd=b.instg_zpd and a.instg_zpd=zst.instg_zpd and
zst.instg_zpd=zg.gid_zpd and (a.ti_zpd/b.ti_zpd*100) > 90
ORDER BY rel_imp, municipio, instg_zpd
```

O resultado da consulta é apresentado na figura 58.

Figura 58: Zonas que apresentam, no cenário de 2000, taxa de impermeabilização superior a 90% da prevista no cenário de plano diretor.



	instg_zpd	sigla_zpd	municipio	rel_imp
1	64	ZMC	Pinhais	92.10
2	28	ZR-3	Curitiba	92.14
3	33	SE-AC	Curitiba	94.31
4	52	ZMC	Pinhais	98.11
5	44	SE-CB	Curitiba	98.35
6	42	SEHIS	Curitiba	105.25
7	55	ZR	Pinhais	120.41
8	40	PPB	Curitiba	203.36
9	34	APA Iguacu	Curitiba	407.43

É possível verificar que existia, já no cenário de 2000, zonas de uso e ocupação do solo (nos municípios de Curitiba e Pinhais) que apresentavam uma taxa de impermeabilização superior às taxas previstas nos planos diretores dos municípios abrangidos pela bacia do rio Atuba.

5.4.2.2 Estimativa do escoamento superficial direto na bacia hidrográfica

A etapa de estimativa do escoamento superficial direto compreende o cálculo do CN, do escoamento superficial direto e do volume de escoamento superficial direto para cada área de interesse (a bacia, sub-bacia, município ou zona de uso e ocupação do solo). Na figura 59 apresentam-se os valores do CN ponderado na bacia hidrográfica do rio Atuba, para os cenários de pré-desenvolvimento, de 1962 e de 2000, para condições de ARC-II e considerando um coeficiente de abstração inicial de 0,05. As consultas escritas para a definição desses valores encontram-se no quadro 16.

Quadro 16: *Script* das consultas para o cálculo do CN ponderado para a bacia hidrográfica.

Definição	<i>Script</i>
Determinação do CN de cada URH, para o cenário de pré-desenvolvimento.	<pre>Select cnv.valorc5, ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst) as geom_urh from cst_st as csst, cst_gm as csg, cst_at as csa, solos_st as sst, solos_at as sa, solos_gm as sg, ghs_ax as gx, cn_ax as cnx, cn_val as cnv where csst.datai='-infinity' and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst and csa.oid_cst=cnx.oid_cst and sst.dataf='infinity' and sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.uid_s and sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and gx.oid_ghs=cnx.oid_ghs and cnx.oid_cn=cnv.oid_cn;</pre>
Determinação do CN de cada URH, para o cenário de 1962.	<pre>Select cnv.valorc5, ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst) as geom_urh from cst_st as csst, cst_gm as csg, cst_at as csa, solos_st as sst, solos_at as sa, solos_gm as sg, ghs_ax as gx, cn_ax as cnx, cn_val as cnv where (csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE'1962-01-01', DATE '1999-12-31') and csst.instg_cst=csg.gid_cst and</pre>

	<pre> csst.instat_cst=csa.oid_cst and csa.oid_cst=cnx.oid_cst and sst.dataf='infinity' and sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.uid_s and sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and gx.oid_ghs=cnx.oid_ghs and cnx.oid_cn=cnv.oid_cn;</pre>
Determinação do CN de cada URH, para o cenário de 2000.	<pre> select cnv.valorcn5, ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst) as geom_urh from cst_st as csst, cst_gm as csg, cst_at as csa, solos_st as sst, solos_at as sa, solos_gm as sg, ghs_ax as gx, cn_ax as cnx, cn_val as cnv where csst.dataf='infinity' and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst and csa.oid_cst=cnx.oid_cst and sst.dataf='infinity' and sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.uid_s and sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and gx.oid_ghs=cnx.oid_ghs and cnx.oid_cn=cnv.oid_cn;</pre>
Determinação do CN de cada zona de uso e ocupação do solo, para o cenário de plano diretor.	<pre> Select zst.instg_zpd, zx.sigla_zpd, sa.oid_ghs, za.tmp, (cnv.valorcn5+((100-za.tmp)/100*(98- cnv.valorcn5))) as valorcn5, (cnv.valorcn20+((100-za.tmp)/100*(98- cnv.valorcn20))) as valorcn20, st_area(ST_INTERSECTION (sg.geom_s, zg.geom_zpd)) as area, ST_INTERSECTION (sg.geom_s, zg.geom_zpd) as geom_urh from zonapd_st as zst, zonapd_gm as zg,zonapd_at as za,zonapd_ax as zx, solos_st as sst, solos_at as sa, solos_gm as sg, ghs_ax as gx, cn_ax as cnx, cn_val as cnv, municipio_ax as mx where zst.dataf='infinity' and zst.instg_zpd=zg.gid_zpd and</pre>

	<pre> zst.instat_zpd=za.uid_zpd and za.oid_zpd=zx.oid_zpd and za.oid_cstepd=cnx.oid_cst and sst.dataf='infinity' and sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.uid_s and sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and gx.oid_ghs=cnx.oid_ghs and cnx.oid_cn=cnv.oid_cn and zx.oid_mun=mx.oid_mun and intersects (zg.geom_zpd, sg.geom_s) order by municipio, sigla_zpd, oid_ghs; </pre>
<p>Cálculo do CN médio ponderado para a bacia hidrográfica, nos quatro cenários considerados.</p>	<pre> SELECT '1' as id, 'pre-desenvolvimento' as cenario, (cast((SUM (valorcn5*st_area(geom_urh))/ sum(st_area(geom_urh))) as numeric (10,2))) AS cn_medio from resultados.base_cn_pre UNION Select '2' as id, 'plano diretor' AS cenario, (cast((SUM ((valorcn5+((100-tmp)/100*(98- valorcn5))*st_area(geom_urh))/ SUM (st_area(geom_urh))) as numeric (10,2))) AS cn_medio from resultados.base_cn_pd UNION SELECT '3' as id, '1962' as cenario, (cast((SUM (valorcn5*st_area(geom_urh))/ sum(st_area(geom_urh))) as numeric (10,2))) AS cn_medio from resultados.base_cn_1962 UNION SELECT '4' as id, '2000' as cenario, (cast((SUM (valorcn5*st_area(geom_urh))/ sum(st_area(geom_urh))) as numeric (10,2))) AS cn_medio from resultados.base_cn_2000 ORDER BY id; </pre>

Figura 59: CN ponderado na bacia hidrográfica do Rio Atuba.

base_cn_pre UNION Select '2' as i...			
OFF			
	id	cenario	cn_medio
1	1	pre-desenvolvimento	56.17
2	2	plano diretor	92.86
3	3	1962	57.98
4	4	2000	67.81

Houve um aumento nos valores do CN ao longo do período analisado, ocasionado pelas alterações na cobertura superficial do terreno. Com relação ao cenário de pré-desenvolvimento, a média ponderada do CN para condições de ARC-II aumentou em 1,81 no cenário de 1962 e em 11,64 no cenário de 2000.

O escoamento superficial direto é estimado a partir do conjunto de consultas apresentado no quadro 17, desenvolvidas a partir das equações do método SCS-CN. As estimativas do escoamento superficial foram realizadas considerando um período de retorno de 25 anos e chuva com tempo de duração de 120 min., sob condições de ARC-II, conforme especificado anteriormente.

Quadro 17: *Script* das consultas para o cálculo do escoamento superficial direto nos cenários de 1962 e de 2000.

Descrição	<i>Script</i> das consultas
Sobreposição espacial (overlay) dos layers solos e CST para o cenário de 1962 e atribuição dos valores de CN para cada URH	<pre> SELECT valorcns5, ST_AREA(ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst)) as area, ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst) AS geom_urh FROM cst_st AS csst, cst_gm AS csg, cst_at AS csa, solos_st AS sst, solos_at AS sa, solos_gm AS sg, ghs_ax AS gx, cn_ax AS cnx, cn_val AS cnv WHERE (csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE '1962-01-01', DATE '1999-12-31') and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst and sst.dataf='infinity' and sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.uid_s and sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and </pre>

	<pre> gx.oid_ghs=cnx.oid_ghs and csa.oid_cst=cnx.oid_cst and cnx.oid_cn=cnv.oid_cn </pre>
<p>Sobreposição espacial (overlay) dos layers solos e CST para o cenário de 2000 e atribuição dos valores de CN para cada URH</p>	<pre> SELECT valorcn5, ST_AREA(ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst)) as area, ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst) AS geom_urh FROM cst_st AS csst, cst_gm AS csg, cst_at AS csa, solos_st AS sst, solos_at AS sa, solos_gm AS sg, ghs_ax AS gx, cn_ax AS cnx, cn_val AS cnv WHERE csst.dataf = 'infinity' and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst and sst.dataf='infinity' and sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.uid_s and sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and gx.oid_ghs=cnx.oid_ghs and csa.oid_cst=cnx.oid_cst and cnx.oid_cn=cnv.oid_cn </pre>
<p>Carta de precipitação efetiva para o cenário de 1962</p>	<pre> SELECT ((96.32 - (0.05*((25400/valorcn5)- 254)))^2)/(96.32+(25400/valorcn5-254)- (0.05*((25400/valorcn5)-254))) as pe, bu.geom_urh from resultados.base_urh_1962 AS bu where area<>0; </pre>
<p>Carta de precipitação efetiva para o cenário de 2000</p>	<pre> SELECT ((96.32 - (0.05*((25400/valorcn5)- 254)))^2)/(96.32+(25400/valorcn5-254)- (0.05*((25400/valorcn5)-254))) as pe, bu.geom_urh from resultados.base_urh_2000 AS bu where area<>0; </pre>

A distribuição espacial do escoamento superficial direto nos cenários de 1962 e de 2000 é apresentada nas figuras 60 e 61. Nessas figuras, os valores de escoamento superficial direto foram agrupados em intervalos de 15mm.

Figura 60: Mapa da distribuição espacial do escoamento superficial direto no cenário de 1962.

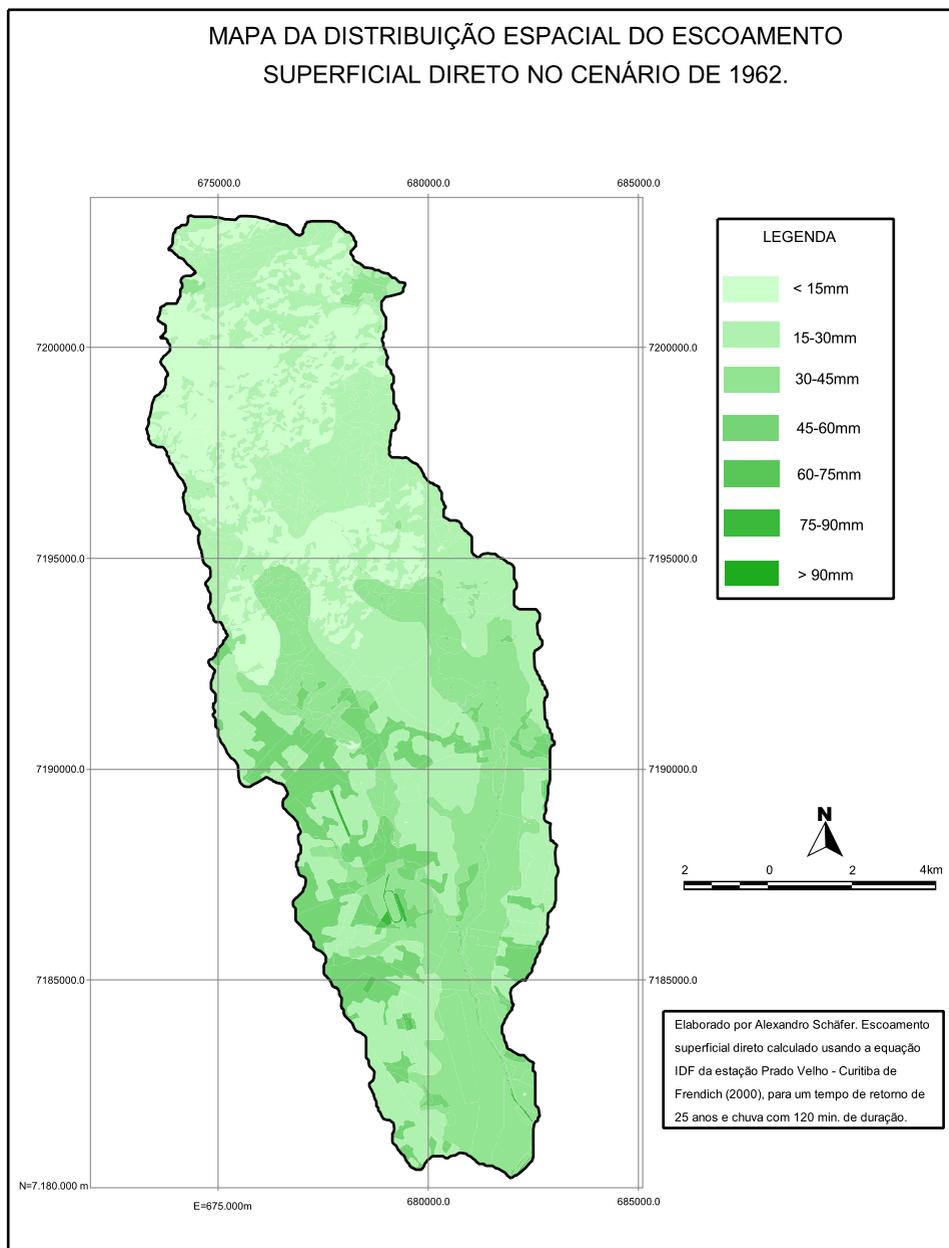
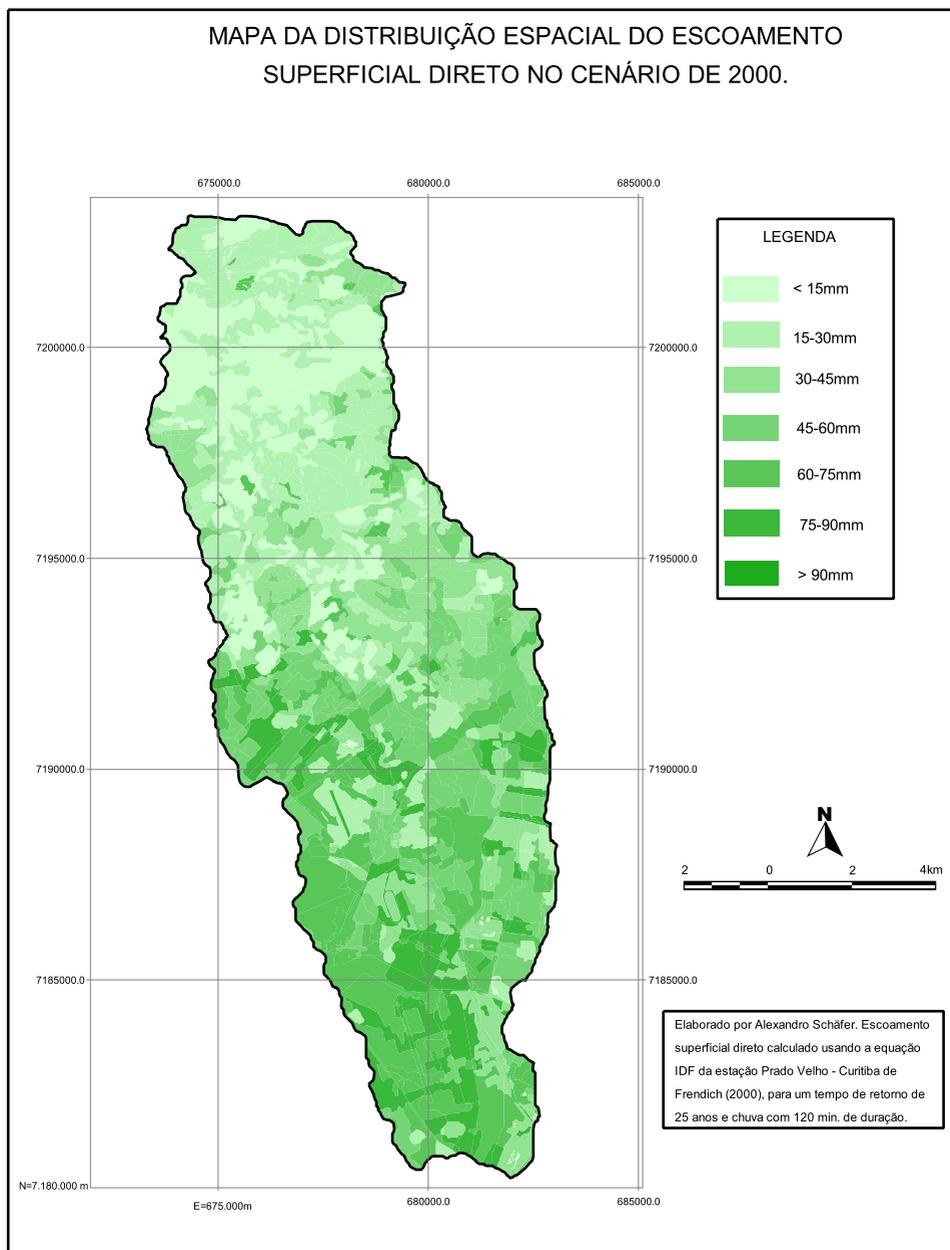


Figura 61: Mapa da distribuição espacial do escoamento superficial direto no cenário de 2000.



A visualização das tabelas criadas pelo conjunto de consultas apresentados no quadro 18 permite verificar a distribuição espacial do escoamento superficial direto, possibilitando identificar as áreas mais críticas ao escoamento das águas pluviais. É possível concluir que, à medida que as áreas urbanas se intensificam, ocorre a diminuição das áreas com os maiores índices de capacidade de armazenamento superficial, em detrimento das áreas de menor capacidade de armazenamento, causando o aumento no escoamento superficial direto.

O volume de escoamento superficial na bacia hidrográfica foi estimado a partir do conjunto de consultas apresentadas no quadro 18. Os resultados do conjunto de consultas são apresentados na tabela 7.

Quadro 18: *Script* das consultas para os cálculos de volume de escoamento superficial direto

Descrição	Script
Sobreposição espacial (overlay) dos layers solos e CST para cada cenário e atribuição dos valores de CN para cada URH (o <i>script</i> é referente ao cálculo da PE para o cenário de 1962)	<i>SELECT</i> valorcn5, <i>ST_AREA(ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst)) as area,</i> <i>ST_INTERSECTION (sg.geom_s, csg.geom_cst)</i> <i>AS geom_urh</i> <i>FROM cst_st AS csst, cst_gm AS csg, cst_at AS csa, solos_st AS sst, solos_at AS sa, solos_gm AS sg, ghs_ax AS gx, cn_ax AS cnx, cn_val AS cnv</i> <i>WHERE (csst.datai, csst.dataf) OVERLAPS (DATE'1962-01-01', DATE '1999-12-31') and csst.instg_cst=csg.gid_cst and csst.instat_cst=csa.oid_cst and sst.dataf='infinity' and sst.instg_s=sg.gid_s and sst.instat_s=sa.oid_s and sa.oid_ghs=gx.oid_ghs and gx.oid_ghs=cnx.oid_ghs and csa.oid_cst=cnx.oid_cst and cnx.oid_cn=cnv.oid_cn</i>
Cálculo da precipitação efetiva (PE) para cada cenário analisado (o <i>script</i> é referente ao cálculo da PE para o cenário de 1962)	<i>Select</i> <i>((96.32 - (0.05*((25400/bu.valorcn5)-254)))^2)/(96.32+(25400/bu.valorcn5-254)- (0.05*((25400/bu.valorcn5)-254))) as pe,</i> <i>bu.geom_urh</i> <i>from resultados.base_urh_1962 AS bu;</i>
Cálculo do VES	<i>SELECT sum(pe*area)/1000000 as ves</i>

para cada cenário analisado (o <i>script</i> é referente ao cálculo do VES para o cenário de 1962)	<i>FROM resultados.base_pezpd_1962;</i>
Cálculo VES com relação ao cenário de pré-desenvolvimento e com relação ao cenário de plano diretor.	<pre> SELECT sum(a.ves) as ves_pre, sum(b.ves) as ves_1962, sum(c.ves) as ves_2000, sum(d.ves) as ves_pd, ((sum(b.ves)- sum(a.ves))/sum(a.ves))*100 as ves_dif_1962pre, ((sum(c.ves)- sum(a.ves))/sum(a.ves))*100 as ves_dif_2000pre, ((sum(d.ves)- sum(a.ves))/sum(a.ves))*100 as ves_dif_pdpre, (sum(a.ves)/sum(d.ves))*100 as ves_dif_prepd, (sum(b.ves)/sum(d.ves))*100 as ves_dif_1962pd, (sum(c.ves)/sum(d.ves))*100 as ves_dif_2000pd from resultados.ves_zpd_pre as a, resultados.ves_zpd_1962 as b, resultados.ves_zpd_2000 as c, resultados.ves_zpd_pd as d where a.instg_zpd=b.instg_zpd and a.instg_zpd=c.instg_zpd and a.instg_zpd=d.instg_zpd; </pre>

Tabela 7: Variação no volume de escoamento superficial (VES) acumulado na bacia hidrográfica entre os cenários considerados.

Cenário	VES (hm ³)	Aumento com relação ao cenário de pré-desenvolvimento (%)	Taxa com relação ao cenário de plano diretor (%)
Pré-desenvolvimento	3,498	-	41,47
1962	3,777	7,98	44,77
2000	5,492	56,99	65,10
Plano-diretor	8,436	141,15	-

Em termos de volume total de escoamento superficial acumulado na bacia, as estimativas mostram (tabela 7) que houve um aumento,

com relação ao cenário de pré-desenvolvimento, de 7,98% em 1962 e de 56,99% em 2000.

Ainda com relação ao escoamento superficial direto, é importante verificar os locais em que houve aumento na precipitação efetiva (e de quanto foi esse aumento), se houve redução (e em que locais) e se houveram locais em que a precipitação efetiva permaneceu inalterada entre os cenários de 1962 e de 2000. Para essa verificação, foi realizada uma operação de sobreposição espacial entre as tabelas de escoamento superficial direto dos anos de 1962 e de 2000. A consulta utilizada é apresentada no quadro 19. A visualização espacial da tabela resultante é apresentada na figura 62. As áreas foram classificadas em três classes:

Quadro 19: Classificação das áreas com relação às alterações no escoamento superficial direto entre os cenários de 1962 e 2000

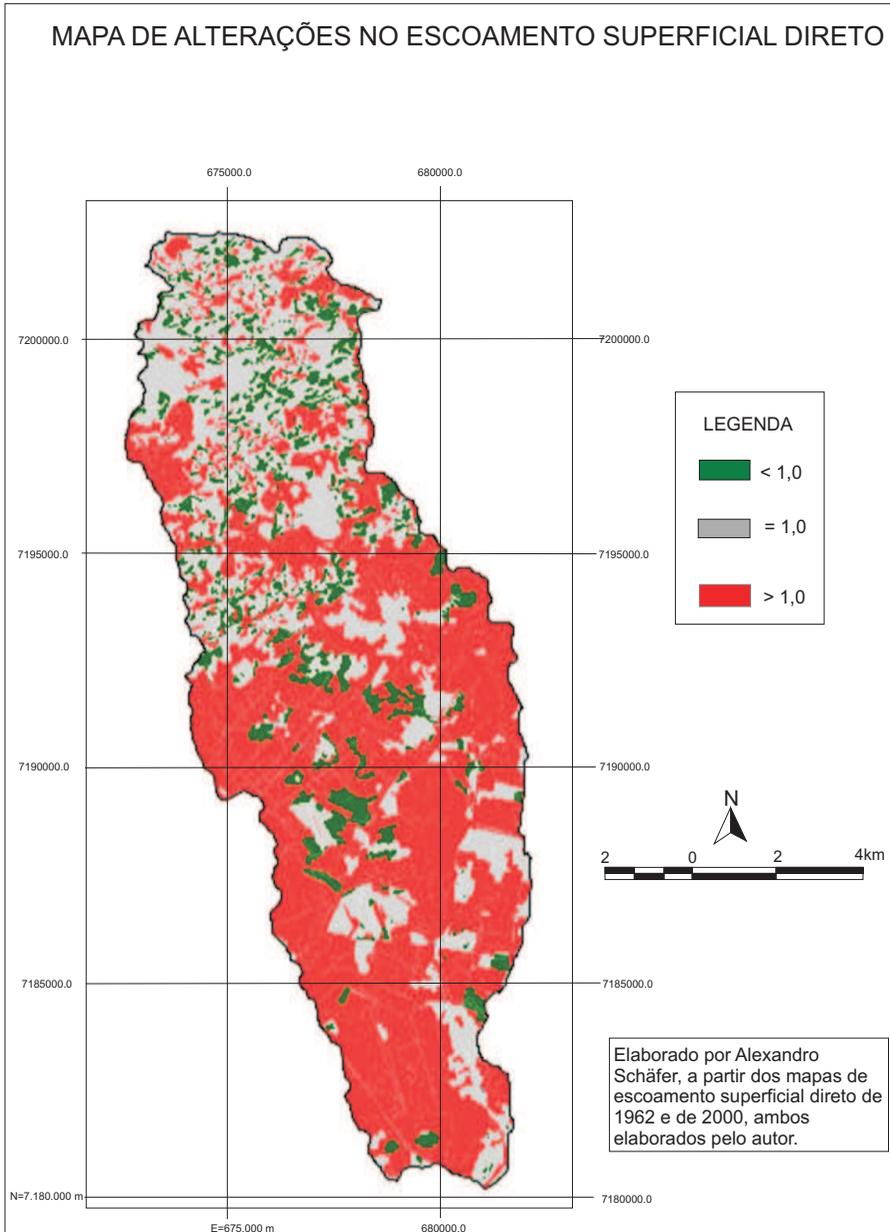
Intervalo	Descrição
< 1,0	Áreas que apresentaram redução no escoamento superficial direto entre os dois cenários.
= 1,0	Áreas que não apresentaram alteração no escoamento superficial direto entre os dois cenários.
> 1,0	Áreas que apresentaram aumento no escoamento superficial direto entre os dois cenários.

Para quantificar os volumes produzidos em cada uma dessas áreas, foi aplicado o conjunto de consultas apresentados no quadro 20.

Quadro 20: *Script* da consulta para a verificação das alterações no escoamento superficial direto entre os cenários de 1962 e 2000.

Descrição	Script
Cálculo da diferença na precipitação efetiva entre os cenários de 1962 e 2000 a partir de uma operação de sobreposição espacial (overlay) entre os dois layers	<pre> SELECT a.pe AS pe_2000, b.pe AS pe_1962, (a.pe/b.pe) AS dif_pe, ST_INTERSECTION (a.geom_urhzpd, b.geom_urhzpd) AS geom_urh FROM resultados.base_pe_2000 AS a, resultados.base_pe_1962 AS b; </pre>

Figura 62: Mapa de alterações no escoamento superficial direto, entre os cenários de 1962 e de 2000.

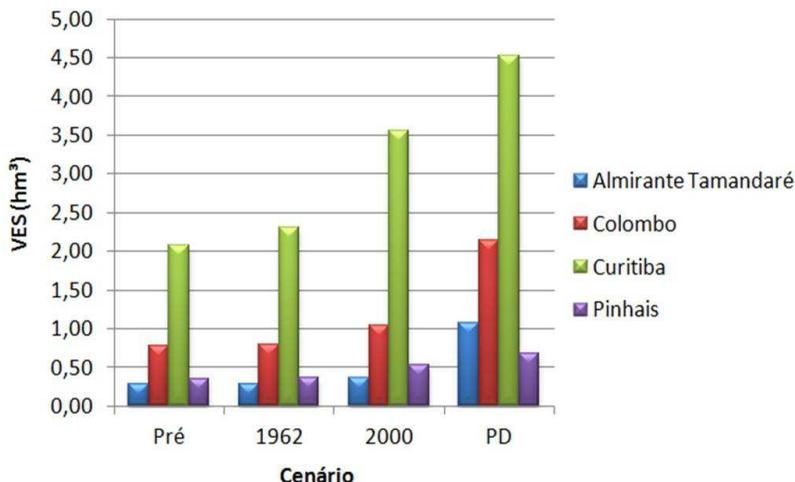


Entre os cenários de 1962 e 2000, não houve alteração nos valores de escoamento superficial direto em uma área correspondente a 30,73% da área total da bacia. Houve aumento na produção de escoamento superficial direto em 58,70% da área total da bacia, enquanto em 10,57% houve redução. Nas áreas onde houve aumento no escoamento superficial direto, o volume produzido aumentou em 1,78 hm³ (47,12%), entre 1962 e 2000. Nas áreas onde houve redução na precipitação efetiva, o volume de escoamento superficial diminuiu em 0,06 hm³ (1,59%) nesse mesmo período. O aumento no volume de escoamento superficial da bacia apresentado na tabela 07 (1,72 hm³, ou 45,41%) obscurece a questão da diminuição no volume de escoamento superficial em algumas áreas, e de certa forma, mascara o real aumento no volume de escoamento superficial, produzido pelas mudanças na cobertura superficial do terreno na bacia do Atuba, entre 1962 e 2000.

5.4.2.2.1 Estimativa do escoamento superficial direto em cada município e zona de uso e ocupação do solo no interior da bacia do Atuba

Na figura 63, apresenta-se o gráfico com os resultados da quantificação do volume de escoamento superficial (VES), produzido nas áreas referentes a cada município nos quatro cenários analisados.

Figura 63: Evolução do volume de escoamento superficial (VES) nas áreas referentes a cada município.



É possível verificar o papel predominante do município de Curitiba, com relação ao volume de escoamento superficial direto, estimado para cada cenário.

A quantificação das alterações no volume de escoamento superficial nas áreas referentes a cada município, entre os cenários de 1962 e 2000, é apresentada na tabela 8.

Tabela 8: Alteração no volume de escoamento superficial (VES).

Município	Área ocupada na bacia (%)	VES (% com relação ao total produzido em cada cenário)			
		Pré-des.	1962	2000	Plano diretor
		Almirante Tamandaré	13,53	8,25	7,65
Colombo	27,73	22,14	21,02	19,06	25,39
Curitiba	50,34	59,36	61,27	64,59	53,62
Pinhais	8,3	10,06	9,88	9,69	8,11
S. J. dos Pinhais	0,1	0,19	0,18	0,12	0,1

Comparando o volume de escoamento superficial com a área ocupada por cada município na bacia hidrográfica, verifica-se que somente as áreas referentes à Curitiba apresentaram contribuição percentual maior do que a área que este ocupa na bacia. Todos os outros municípios apresentaram contribuição percentual menor do que as áreas ocupadas por eles na bacia.

Verifica-se que não ocorreram alterações consideráveis na contribuição relativa ao volume de escoamento superficial nas áreas referentes a cada município, entre os cenários de 1962 e de 2000. As áreas referentes à Curitiba tiveram um aumento na contribuição ao volume total de escoamento superficial produzido na bacia do Atuba (64,59% em 2000 contra 61,27% em 1962). Nas áreas referentes aos demais municípios houve redução na contribuição relativa ao volume de escoamento superficial, entre os dois cenários.

A tabela 9 apresenta a verificação do aumento no volume de escoamento superficial nos cenários de 1962 e de 2000, com relação ao cenário de pré-desenvolvimento.

Tabela 9: Volume de escoamento superficial nos cenários de 1962 e de 2000 com relação ao cenário de pré-desenvolvimento.

Município	Aumento VES 1962 (%)	Aumento VES 2000 (%)
Almirante Tamandaré	0,12	24,42
Colombo	2,52	35,14
Curitiba	11,43	70,82
Pinhais	6,06	51,25
São José dos Pinhais	0,00	0,00

Verifica-se que os maiores aumentos no volume de escoamento superficial ocorreram nos municípios de Curitiba e Pinhais.

A tabela 10 apresenta a comparação entre os volumes de escoamento superficial produzidos nos cenários de 1962 e de 2000, com relação ao cenário de plano diretor.

Tabela 10: Volume de escoamento superficial nos cenários de 1962 e de 2000 com relação ao cenário de plano diretor.

Município	VES 1962 (%)	VES 2000 (%)
Almirante Tamandaré	26,80	33,30
Colombo	37,06	48,85
Curitiba	51,14	78,40
Pinhais	54,54	77,78
São José dos Pinhais	73,22	73,22

É possível verificar os casos mais preocupantes com relação ao volume de escoamento superficial são os dos municípios de Curitiba e Pinhas, que já em 2000 apresentavam um volume de escoamento superficial correspondente a mais de 75% dos valores máximos de referência, definidos a partir dos planos diretores.

Como visto anteriormente, os volumes absolutos de escoamento superficial obscureceram o aumento real no volume de escoamento superficial na bacia do Atuba, entre 1962 e 2000. Com o objetivo de verificar essa questão em nível de município, apresenta-se na tabela 11, a quantificação das alterações no volume de escoamento superficial, de acordo com as áreas referentes a cada município que compõe a bacia do Atuba.

Tabela 11: Quantificação do aumento e da redução do VES entre os cenários de 1962 e 2000.

Município	Alm. Tamandaré	Colombo	Curitiba	Pinhais
Área aumento (km²)	6,68	16,05	45,59	6,47
Aumento global do VES (hm³)	0,07	0,25	1,23	0,1
Aumento global do VES (%)	24,27	31,82	53,30	42,62
Aumento no VES (hm³)	0,08	0,27	1,26	0,16
Aumento proporcional no VES (%)	4,31	15,20	70,14	9,35
Área redução (km²)	1,93	4,80	6,26	0,49
Redução no VES (hm³)	0,006	0,018	0,030	0,007
Redução proporcional no VES (%)	10,28	29,71	48,58	11,43
Aumento real global no VES (%)	27,70	34,01	54,45	45,54

Com base na quantificação apresentada, verifica-se que as maiores porções tanto do aumento quanto da redução no volume de escoamento superficial entre os cenários de 1962 e de 2000 se deram no município de Curitiba.

O quadro 21 apresenta os volumes de escoamento superficial gerados em cada zona de uso e ocupação do solo nos cenários de pré-desenvolvimento, de 1962, de 2000 e de plano diretor. Apresenta ainda a comparação entre os volumes de escoamento superficial dos cenários de 1962 e de 2000 com a situação limite de desenvolvimento (o cenário de plano diretor).

Quadro 21: Volume de Escoamento Superficial (VES) por zona de uso e ocupação do solo.

gid	Sigla_zpd	Mun	VES ^[1] pré-des.	VES ^[1] 1962	VES ^[1] 2000	VES ^[1] plano diretor	VES 1962/ VES PD (%)	VES 2000/ VES PD (%)
1	ZRU-A	Amirante Tamandaré	52,52	52,52	53,44	157,15	33,42	34,01
2	ZEIS		0,41	0,41	0,63	2,29	17,76	27,44
3	ZR1		6,44	6,44	12,37	31,02	20,75	39,87
4	ZRE		41,57	41,57	42,64	184,25	22,56	23,14
5	ZR1		1,95	1,95	1,93	10,15	19,17	19,05
6	ZR3		58,47	58,47	86,53	228,85	25,55	37,81
7	ZR1		5,94	5,94	9,27	30,43	19,52	30,48
8	ZEIS		2,20	2,20	4,05	8,38	26,24	48,34
9	ZCH		47,13	47,13	46,44	125,74	37,48	36,93
10	ZEP		10,17	10,17	9,96	33,42	30,44	29,79
11	ZI		26,19	26,19	35,00	93,17	28,11	37,57
12	ZR2		33,31	33,66	51,96	160,95	20,91	32,28
13	ZEIS		2,21	2,21	4,72	12,10	18,24	38,99
14	PAV	Colombo	20,14	20,14	21,11	26,47	76,06	79,75
15	ZUD3		239,53	241,42	335,7	760,51	31,74	44,14
16	ZUPI1		2,35	2,35	6,58	12,06	19,46	54,53
17	ZUD3		205,51	211,16	320,3	451,99	46,72	70,87
18	ZUD4		26,22	27,36	40,09	85,40	32,04	46,94
19	ZUPI2		85,70	85,70	87,47	194,70	44,02	44,93
20	ZUD1		47,32	47,91	51,81	187,50	25,55	27,63
21	ZPAC 2		36,82	40,22	50,85	170,07	23,65	29,90
22	ZDR		58,10	58,10	60,38	103,30	56,25	58,46
23	ZPAC 1		7,58	14,39	16,65	35,93	40,07	46,35
24	ZDR	1,57	1,57	1,57	2,56	61,40	61,40	
25	PAV	10,50	10,50	10,52	12,15	86,46	86,62	
26	ZUD1	33,12	33,14	43,51	99,92	33,17	43,54	
27	ZR-4	Curitiba	56,21	68,11	102,4	124,67	54,63	82,18
28	ZR-3		206,43	230,17	436,9	452,05	50,92	96,66
29	SEHI S		6,06	7,42	9,50	14,62	50,79	65,00
30	ZR-3		64,06	77,57	114,9	141,56	54,79	81,17
31	ZS-1		73,64	78,80	111,0	145,83	54,04	76,18
32	ZR-3		51,03	58,72	107,6	113,52	51,72	94,83

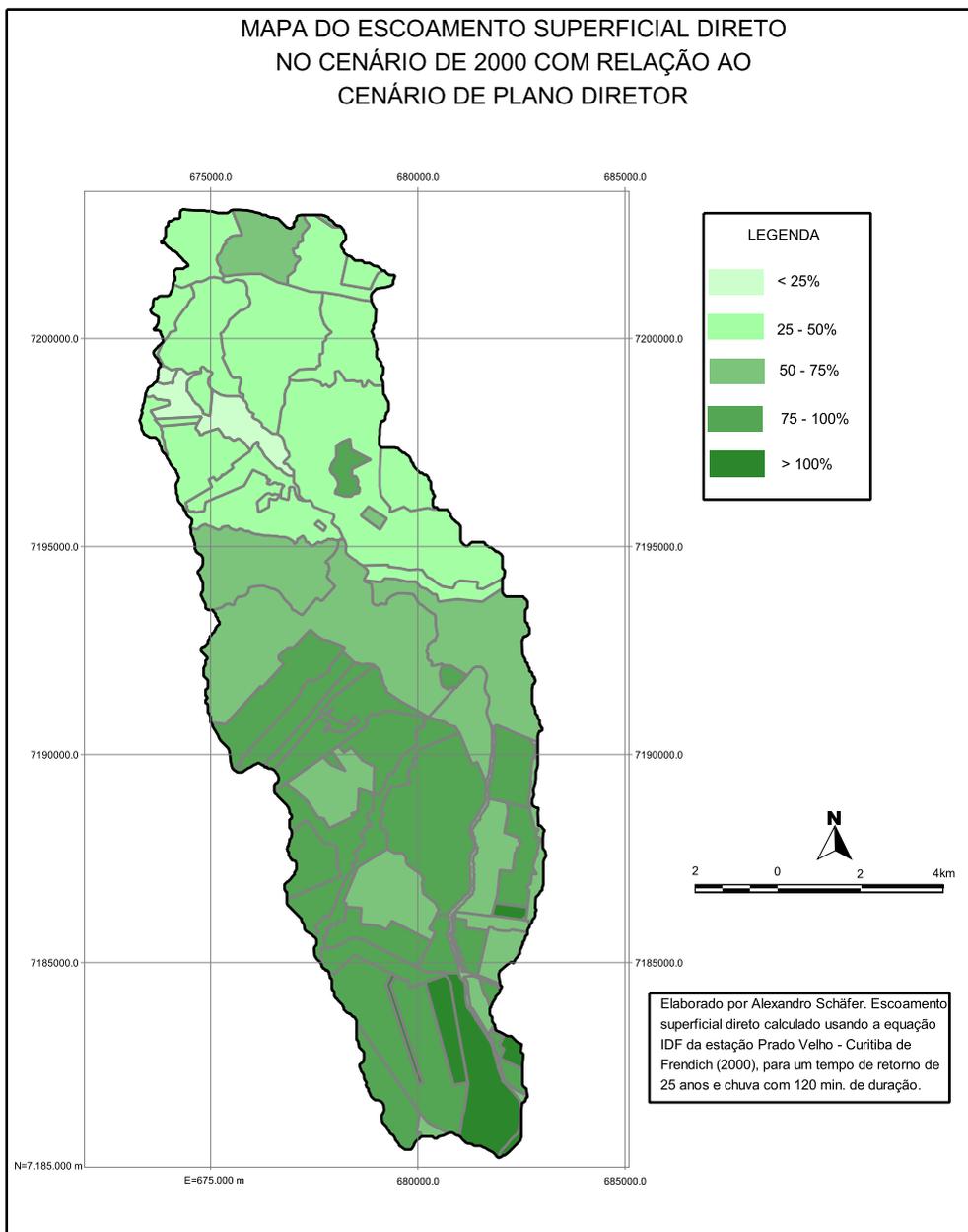
33	SE-AC		39,25	52,94	90,88	93,23	56,78	97,48	
34	APA Iguacu		142,85	142,85	209,8	165,27	86,43	126,9	
35	ZTBR 116		70,08	85,92	127,2	154,14	55,74	82,58	
36	ZR-1		46,79	57,38	98,31	108,99	52,65	90,20	
37	ZR-3		2,88	4,22	6,34	6,93	60,87	91,49	
38	ZE-M		69,77	83,72	108,4	163,57	51,18	66,31	
39	ZR-3		84,06	111,90	158,0	193,53	57,82	81,66	
40	PPB		7,39	7,89	9,11	9,61	82,06	94,72	
41	ZR-4		85,54	111,52	159,1	199,21	55,98	79,91	
42	SEHIS		49,49	49,49	96,63	92,90	53,27	104,0	
43	SE		23,52	28,63	47,55	56,97	50,27	83,46	
44	SE-CB		9,41	11,22	21,20	21,13	53,11	100,3	
45	ZR-2		52,74	57,06	112,6	127,17	44,87	88,60	
46	ZR-3		107,40	120,11	181,5	234,56	51,21	77,39	
47	SEHIS		32,23	32,23	56,20	60,64	53,15	92,68	
48	ZR-2		291,33	297,04	448,9	800,44	37,11	56,09	
49	ZE-D		117,95	137,75	167,9	227,03	60,67	73,99	
50	ZR-OC		115,70	115,93	132,0	258,34	44,88	51,13	
51	ZR-2		235,22	249,48	389,5	499,22	49,97	78,03	
59	ZR-3		35,81	36,14	43,19	60,00	60,23	71,98	
52	ZMC		Pinhais	13,21	14,11	22,37	22,28	63,33	100,4
53	ZC			27,49	37,43	38,96	65,86	56,83	59,15
54	ZMC			47,84	50,31	75,51	97,07	51,82	77,78
55	ZR			7,75	7,75	18,19	15,87	48,84	114,6
56	ZS			83,10	83,37	110,4	159,46	52,28	69,28
57	ECS1	18,13		20,33	28,45	40,19	50,57	70,79	
58	ZA	19,05		19,05	20,62	27,88	68,33	73,95	
60	ECS4	3,40		3,40	5,40	6,15	55,24	87,75	
61	ZR	60,16		62,58	100,4	108,54	57,66	92,57	
62	ECS3	16,75		17,33	25,39	32,84	52,78	77,31	
63	ZMC	6,60		7,23	8,80	11,14	64,91	79,00	
64	ZMC	27,79		27,97	46,10	47,27	59,17	97,54	
65	ECS2	20,70		22,43	31,63	49,88	44,97	63,41	
66	ZRO	S.J. Pinhais		0,12	0,12	0,12	0,12	100,0	100,0
67	ZRO			6,54	6,54	6,54	6,54	100,0	100,0

¹¹Valores em dam³.

A partir da consulta que gera os resultados apresentados no quadro 21, é possível verificar a situação de cada zona de uso e ocupação do solo com relação ao volume de escoamento superficial direto produzido em cada cenário, bem como com relação ao cenário definido como referência, que é o cenário de plano diretor.

O mapa com a visualização da distribuição espacial das condições de escoamento superficial em 2000 com relação ao cenário de plano diretor em cada zona de uso e ocupação do solo é apresentada na figura 64.

Figura 64: Mapa do escoamento superficial direto no cenário de 2000 com relação ao cenário de plano diretor



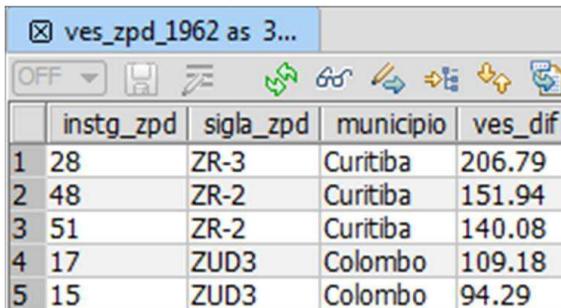
A partir da análise visual da figura 64, é possível verificar as condições de escoamento superficial direto num contexto de bacia hidrográfica e município. As zonas de uso e ocupação do solo que apresentam os maiores índices no cenário de 2000 com relação ao cenário de plano diretor estão localizadas nos municípios de Curitiba e Pinhás.

Além de recuperar a tabela com os valores para todas as zonas de uso e ocupação do solo, é possível realizar consultas com base em alguma restrição. Para verificar, por exemplo, quais foram as 5 zonas de uso e ocupação do solo que apresentaram os maiores aumentos nos volumes de escoamento superficial entre 1962 e 2000, aplica-se a seguinte consulta:

```
SELECT a.instg_zpd, a.sigla_zpd, a.municipio, (cast((b.ves - a.ves) as
numeric (10,2))) as ves_dif
FROM resultados.ves_zpd_1962 as a, resultados.ves_zpd_2000 as b
WHERE a.instg_zpd=b.instg_zpd
GROUP BY a.instg_zpd, a.sigla_zpd, a.municipio, b.ves, a.ves
ORDER BY (b.ves-a.ves)
DESC LIMIT 5
```

A figura 65 apresenta o resultado da consulta, indicando as cinco zonas de uso e ocupação do solo que sofreram os maiores aumentos no volume de escoamento superficial entre os cenários de 1962 e de 2000. Os valores estão indicados na coluna ves_dif, em dam³.

Figura 65: As cinco zonas de uso e ocupação do solo que apresentaram o maior aumento no VES entre os cenários de 1962 e de 2000.



	instg_zpd	sigla_zpd	municipio	ves_dif
1	28	ZR-3	Curitiba	206.79
2	48	ZR-2	Curitiba	151.94
3	51	ZR-2	Curitiba	140.08
4	17	ZUD3	Colombo	109.18
5	15	ZUD3	Colombo	94.29

A partir dos dados contidos na visão da figura 65 que, em 2000, quatro zonas de uso e ocupação do solo apresentavam um volume de escoamento superficial maior do que o volume de escoamento superficial que seria produzido no cenário de plano diretor. Estas zonas de uso e ocupação do solo estão localizadas nos municípios de Colombo e Curitiba.

5.4.2.3 Relação entre as alterações na cobertura superficial do terreno e as alterações no escoamento superficial direto

No gráfico da figura 66 apresenta-se uma comparação entre as áreas ocupadas na bacia hidrográfica pelas áreas urbanizadas e não urbanizadas, nos cenários de 1962 e de 2000. No gráfico da figura 67 apresenta-se uma comparação entre os volumes de escoamento superficial, produzidos pelas áreas urbanizadas e não urbanizadas, nos cenários de 1962 e de 2000.

Figura 66: Área total ocupada na bacia, por tipo de cobertura superficial do terreno.

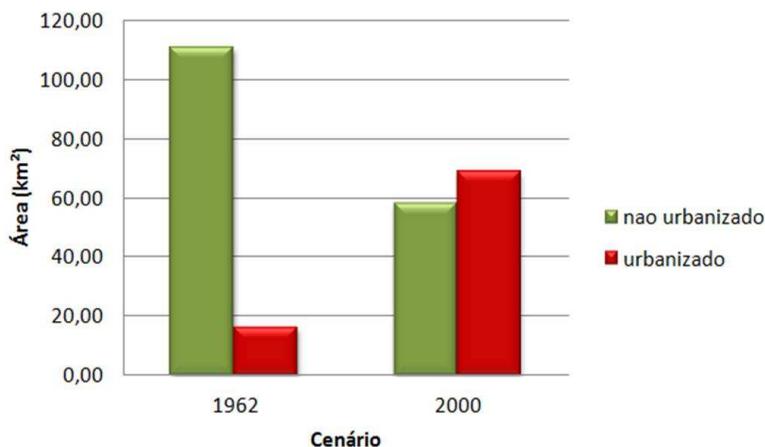
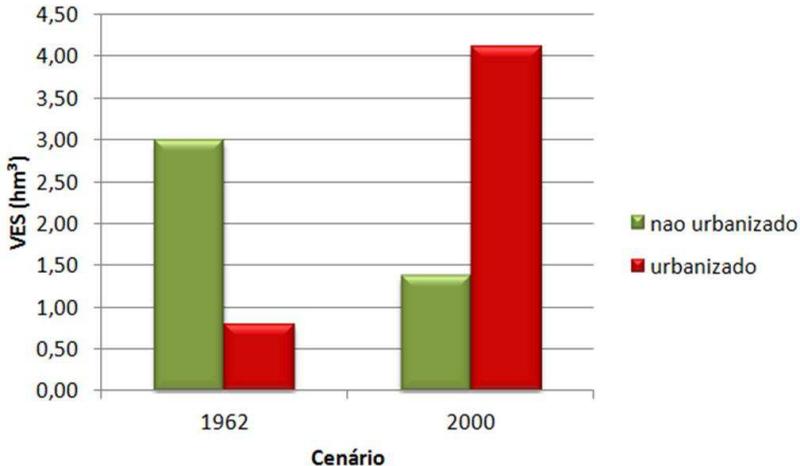


Figura 67: Volume de escoamento superficial, por tipo de cobertura superficial do terreno.



Como visto nas seções anteriores, o aumento global no VES foi de 31,86% entre 1962 e 2000. Em 1962, as áreas urbanizadas ocupavam 16,28 km² (12,78% da área total da bacia) e produziam 0,79hm³ (ou 20,91%) do VES, enquanto as áreas não urbanizadas ocupavam 111,14 km² (87,22% da área total da bacia) e produziam 2,99hm³ (ou 79,09%). Em 2000, as áreas urbanizadas passaram a ocupar 69,01 km² (54,13% da área total da bacia) e produziram 4,12hm³ (ou 75,08%) de VES, e as áreas não urbanizadas passaram a ocupar 58,48 km² (45,87% da área total da bacia) e produziram 1,37hm³ (ou 24,92%). Com relação às áreas urbanizadas, o volume de escoamento superficial produzido pela classe 'edificações muito densas' aumentou de 0,35% para 13,87% entre 1962 e 2000, a classe 'edificações não muito densas' não existia em 1962 e em 2000 passou a responder por 23,06% em 2000. A classe 'edificações com superfícies livres' passou de 0,26% para 15,65%, a classe 'edificações com muitas superfícies livres' passou de 19,86% para 11,92% e a classe 'zonas industriais e comerciais' passou de 0,51% para 10,58%.

A alteração do tipo de cobertura superficial do terreno de não urbanizado para urbanizado em 41,38% da bacia hidrográfica entre 1962 e 2000, bem como a sua densificação, resultou em um aumento de 25,20% na taxa de impermeabilização da bacia, em um aumento de 422,07% no VES produzido pelas áreas urbanas e em uma redução de 54,19% no VES produzido pelas áreas não urbanizadas.

Conforme apresentado anteriormente, em 58,70% da área total da bacia houve aumento na precipitação efetiva entre 1962 e 2000. Esse aumento foi consequência de: a) substituição de áreas ocupadas por florestas e vegetação densa por campos e áreas verdes e por áreas urbanizadas; b) substituição de áreas ocupadas por campos e áreas verdes por áreas urbanizadas; e c) pelo aumento da impermeabilização nas áreas urbanizadas.

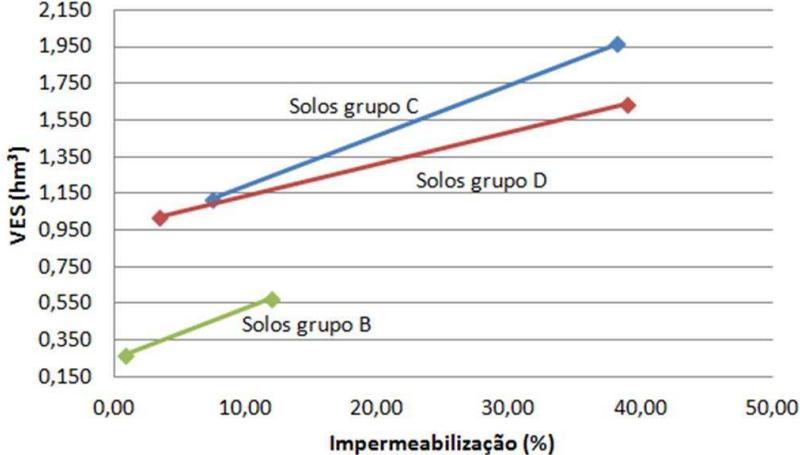
Houve também redução no escoamento superficial direto, em 10,57% da área total da bacia. Essa redução foi consequência: a) da substituição de áreas ocupadas por campos e áreas verdes por florestas e vegetação densa ou massa d'água; e b) da substituição de áreas ocupadas por florestas e vegetação densa por massa d'água.

Um fator importante nas estimativas da precipitação efetiva, e do VES, é a questão das características hidrológicas dos solos no local em estudo. Na figura 68 se apresentam os resultados de um estudo de sensibilidade, usando o BDET, onde foi verificado a variação no volume de escoamento superficial, de acordo com a variação da impermeabilização, para cada grupo hidrológico de solos presente na bacia, para os cenários de 1962 e de 2000. Os valores referentes à taxa de impermeabilização e volume de escoamento superficial, por tipo de solo, são apresentados na tabela 12. Os solos presentes na bacia do Atuba são os do grupo B, do grupo C e do grupo D, que ocupam 34,86%, 37,30% e 27,84% da área total da bacia, respectivamente.

Tabela 12: Impermeabilização (TI) e volume de escoamento superficial (VES) de acordo com o grupo hidrológico de solos (GHS), nos locais onde houve aumento no escoamento superficial direto, entre os cenários de 1962 e de 2000.

GHS	TI 1962 (%)	TI 2000 (%)	VES 1962 (hm³)	VES 2000 (hm³)
B	0,81	11,90	0,269	0,575
C	7,42	38,14	1,120	1,965
D	3,44	38,87	1,020	1,640

Figura 68: Relação entre o aumento na impermeabilização e o aumento no volume de escoamento superficial, por grupo hidrológico de solos.

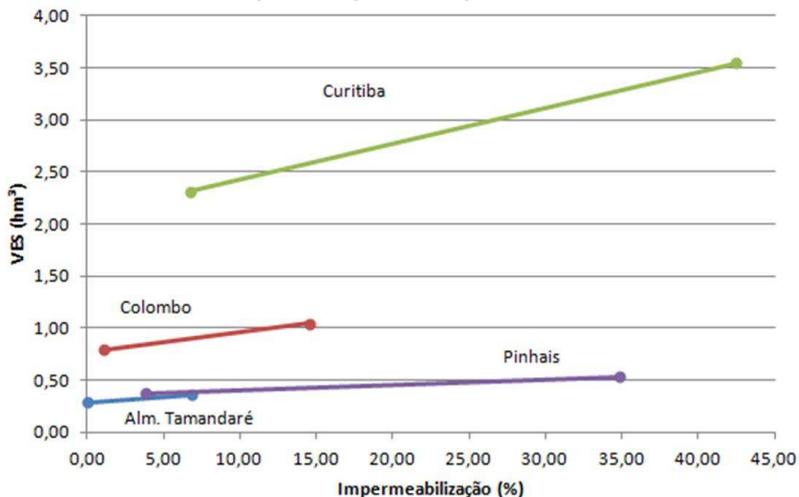


Fica claro que, com o aumento da impermeabilização, há um aumento na produção de escoamento superficial. No entanto, o estudo de sensibilidade mostrou que as alterações no volume de escoamento superficial foram dependentes do tipo de solo. A taxa de infiltração em solos do grupo D é mais próxima à taxa de infiltração de uma superfície impermeável do que a dos solos do grupo C. A taxa de infiltração em solos do grupo C é mais próxima à taxa de infiltração de uma superfície impermeável do que a dos solos do grupo B. Sendo assim, considerando a mesma taxa de alteração na impermeabilização, os solos do grupo B apresentam maior aumento no volume de escoamento superficial do que os solos do grupo C e estes maior aumento no volume de escoamento superficial do que os solos do grupo D.

Os resultados do estudo de sensibilidade são importantes, pois sugerem que as alterações na cobertura superficial do terreno em áreas com solos do grupo D causarão menor impacto na produção de escoamento superficial do que em áreas onde os solos são do grupo C ou B.

Na figura 69, apresenta-se a relação entre o aumento da impermeabilização e o aumento no volume de escoamento superficial, nas áreas referentes a cada município que compõe a bacia do Atuba. O município de São José dos Pinhais não foi adicionado na figura, pois sua contribuição é ínfima (0,12% do volume do escoamento superficial produzido na bacia em 2000).

Figura 69: Relação entre o aumento da impermeabilização e o aumento no volume de escoamento superficial, por município.



É possível verificar diferentes respostas no aumento no VES com o aumento da impermeabilização, para as áreas referentes a cada município. Estas diferenças estão relacionadas às características hidrológicas dos solos e às diferenças na redução da precipitação efetiva que ocorreram nessas áreas entre os dois cenários.

Apresenta-se no quadro 22 uma síntese da quantificação dos valores relacionados à análise das alterações na cobertura superficial do terreno, da taxa de impermeabilização e do volume de escoamento superficial na bacia do Atuba, considerando as áreas referentes a cada município e as características hidrológicas dos solos nessas áreas. Foram quantificados: a) as áreas referentes a cada município, considerando o grupo hidrológico de solos; b) a proporção dessas áreas, com relação a área total que cada município ocupa na bacia; c) o aumento da urbanização, com relação a área total ocupada por cada município na bacia; d) o aumento na taxa de impermeabilização, com relação a área total ocupada por cada município na bacia; e) o aumento global no volume de escoamento superficial; f) o aumento no volume de escoamento superficial, por unidade de área; g) a redução global no volume de escoamento superficial nas áreas não urbanizadas; e h) a redução no volume de escoamento superficial nas áreas não urbanizadas, por unidade de área.

Quadro 22: Alterações na urbanização, na impermeabilização e no volume de escoamento superficial entre os cenários de 1962 e de 2000.

Município	Almirante Tamandaré		Colombo				Curitiba				Pinhais	
	B	C	B	C	D	B	C	D	B	C	D	
GHS												
Área no município (km ²)	13,96	3,28	21,33	9,27	4,73	9,13	30,72	25,08	4,25	5,53		
Área no município (%)	10,26	2,58	16,74	7,27	3,72	7,17	24,11	19,68	3,34	4,34		
Aumento urbanização (%)	20,51	13,56	29,75	24,31	69,00	33,94	50,14	54,77	47,81	59,17		
Aumento TI (%)	7,15	5,27	11,72	9,62	28,54	15,63	40,20	36,93	27,81	35,37		
Aumento no VES (dam ³)	9,85	2,30	23,71	11,71	19,91	13,18	116,24	100,94	12,75	22,80		
Aumento no VES (dam ³ /km ²)	0,71	0,70	1,11	1,26	4,41	1,44	3,78	4,02	3,00	4,12		
Redução no VES (dam ³)	3,74	1,40	9,85	6,99	13,22	4,83	46,15	56,04	6,13	13,52		
Redução no VES (dam ³ /km ²)	0,27	0,43	0,46	0,75	2,79	0,53	1,50	2,23	1,44	2,44		

Verifica-se que houve aumento das áreas urbanizadas em todos os municípios, com exceção de São José dos Pinhais, que não apresentava urbanização na bacia do Atuba. O aumento das áreas urbanizadas levou a um aumento na taxa de impermeabilização, a um aumento no VES produzido nas áreas urbanizadas e a uma redução do VES produzido nas áreas não urbanizadas.

Verifica-se que as áreas referentes a Pinhais sofreram o maior aumento na urbanização (52,36%) e as áreas referentes à Curitiba o maior aumento na taxa de impermeabilização (35,71%), com relação à área total que cada município ocupa na bacia. Quando se leva em consideração também o grupo hidrológico de solos, verifica-se que o maior aumento na taxa de impermeabilização ocorreu nas áreas referentes à Curitiba, em solos do grupo C (40,20%). No entanto, as áreas referentes à Colombo, em locais com solos do grupo D, apresentaram o maior aumento no VES nas áreas urbanizadas, por unidade de área (4,41 dam³/km²).

5.4.2.4 Observações finais acerca das análises da bacia hidrográfica do rio Atuba/PR-Brasil.

Ao longo do período analisado, a bacia do Atuba sofreu um processo de alteração na cobertura superficial do terreno, caracterizado por uma acentuada diminuição nas áreas ocupadas por vegetação e pelo aumento e densificação das áreas urbanizadas, o que elevou a sua taxa de impermeabilização. Estas mudanças na cobertura superficial do terreno causaram um efeito considerável nas funções hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Atuba, ao longo do período analisado. Como resultado, foi observado um aumento no potencial de produção de escoamento superficial entre os cenários de pré-desenvolvimento, de 1962 e de 2000.

Verificou-se que a urbanização não ocorreu de forma homogênea ao longo de toda a bacia hidrográfica. Grande parte da urbanização se deu a jusante, em locais anteriormente cobertos por campos e áreas verdes, e sobre solos dos grupos hidrológicos C e D. A variabilidade espacial do desenvolvimento da urbanização, aliada a variabilidade espacial das características hidrológicas dos solos, resultou na variabilidade espacial dos impactos no escoamento superficial do terreno. Os maiores aumentos na taxa de impermeabilização e

escoamento superficial direto, com relação ao cenário de pré-desenvolvimento, ocorreram nas áreas referentes aos municípios de Curitiba e de Pinhais.

Foi possível verificar um aumento de 141,15% no volume de escoamento superficial estimado para o cenário de plano diretor, com relação ao volume de escoamento superficial do cenário de pré-desenvolvimento.

A partir da comparação dos valores de taxa de impermeabilização e de escoamento superficial direto dos cenários de 1962 e de 2000, verificou-se que os municípios de Curitiba e de Pinhas são os que se apresentam mais próximos à situação limite, produzindo já no cenário de 2000, mais de 75% do valor máximo estimado para o volume de escoamento superficial direto do cenário de plano diretor.

Provavelmente, o aumento no volume de escoamento superficial que ocorreu ao longo dos anos teve um efeito significativo na frequência e na magnitude das inundações que ocorreram na área de estudo. O aumento adicional na impermeabilização das superfícies – previsto inclusive nos planos diretores dos municípios que integram a bacia do rio Atuba - deve causar problemas significantes, tanto com relação ao aumento da ocorrência de inundações quanto com relação à exigência de melhorias na rede de drenagem.

Futuras políticas de uso e ocupação do solo para a bacia do Atuba deveriam dar consideração significativa a questão da impermeabilização do solo. Nesse sentido, existem várias práticas de gerenciamento para proteger os corpos d'água do aumento do escoamento superficial direto originado pela urbanização e/ou por atividades agrícolas (DIEBEL et al., 2008). Estas práticas incluem o controle da taxa de desenvolvimento urbano, proteção de solos erosivos e a criação de recuos (ou *buffers*), que dificultam o desenvolvimento urbano ou atividades agrícolas dentro da zona ripária dos cursos d'água. Neste sentido, salienta-se a importância de contemplar, nos planos diretores municipais, a previsão do monitoramento e da conservação das superfícies permeáveis, para garantir um fluxo de escoamento superficial adequado para as bacias hidrográficas.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 QUANTO AO DESENVOLVIMENTO DO BDET

Conforme proposto nesta pesquisa, o BDET desenvolvido proporciona meios para armazenar, processar, gerenciar e analisar os dados espaciais, temporais, espaço-temporais e alfanuméricos. Portanto, é um banco de dados funcional.

Utilizando o BDET, foi possível registrar e quantificar as mudanças que ocorreram ao longo do tempo nas características da bacia hidrográfica escolhida para a aplicação, contribuindo para o entendimento de suas causas, do seu padrão temporal e dos processos envolvidos.

O BDET foi capaz de atender aos requisitos definidos, proporcionando as seguintes funções de um SIG com características temporais: atualização, inventário, análise e apresentação. As consultas espaço-temporais realizadas atingiram os resultados esperados, proporcionando respostas às questões definidas na contextualização do problema. Desta maneira, verifica-se o desenvolvimento adequado do modelo conceitual e do projeto lógico.

Com a estrutura proposta para o BDET, foi possível desenvolver consultas com base em entidade, com base no tempo e com base em eventos. A partir desta estrutura proposta, foi possível também considerar cenários futuros de desenvolvimento urbano e realidades alternativas.

A integração do modelo hidrológico ao BDET possibilitou a realização de estimativas de escoamento superficial direto e a verificação de sua distribuição espacial, na bacia hidrográfica escolhida para aplicação. Utilizando o BDET, foi possível quantificar as alterações no escoamento superficial direto e relacioná-las às alterações nas características da bacia hidrográfica.

Desta maneira, é possível afirmar que o banco de dados espaço-temporal desenvolvido constitui-se em uma ferramenta funcional e útil para a tomada de decisão, em questões relacionadas à gestão das águas pluviais e ao ordenamento territorial, sendo capaz de lidar com a espacialidade e a temporalidade dos dados envolvidos em tais questões.

6.1.1 Quanto à integração do SIG a um modelo de simulação

A integração entre BDET e modelo hidrológico facilitou o processo de modelagem do escoamento superficial, eliminando os problemas advindos da manipulação de dados em diferentes ambientes, muitas vezes incompatíveis e que podem gerar erros, inconsistências e até mesmo inviabilizar determinado tipo de operação.

Deve-se ter em mente que trabalhar com SIG e modelos de simulação ambiental não consiste apenas em reunir um software e um hardware, coletar alguns dados, reunir tudo e resolver problemas. Embora a utilização conjunta destas tecnologias venha auxiliando na realização de estudos em diversas áreas, o usuário deve estar apto a analisar de maneira crítica o que está fazendo e que resultados está obtendo. É importante não se deixar envolver somente com visualizações em mapas e gráficos, pois muitas vezes elas ofuscam as questões conceituais envolvidas na integração de SIG com os modelos de simulação ambiental.

Existe uma grande quantidade de pesquisas e experimentos que buscam integrar SIG e modelos de simulação ambiental. A prática atual é integrar as duas tecnologias (SIG e modelo de simulação), que foram desenvolvidas separadamente. Sendo assim, existe ainda um longo caminho a ser trilhado antes que sejam desenvolvidas ferramentas computacionais estáveis que reúnam, no mesmo ambiente, o SIG e o modelo de simulação como uma ferramenta realmente integrada.

6.1.2 Com relação aos softwares utilizados

O PostgreSQL mostrou-se eficiente à representação temporal proposta nesta pesquisa. A utilização desse SGBD, que possui funções para o tratamento de rótulos temporais e uma extensão que trata os dados espaciais, minimizou a dificuldade do desenvolvimento de banco de dados espacial com características temporais. Apesar disso, esse SGBD não possui funcionalidades que permitam o gerenciamento das informações de tempo. Estas devem ser implementadas manualmente pelo desenvolvedor da aplicação.

A opção de definir as consultas como visões no banco de dados resultou em grande lentidão na visualização e manipulação do conjunto de geometrias resultantes, pois a cada vez que se visualiza ou manipula essas geometrias, a consulta é realizada novamente no banco de dados.

Encontrou-se dificuldades na utilização dos softwares SIG para a edição de dados e realização de operações espaciais. Para a edição dos

arquivos *shapefile*, inicialmente utilizou-se o *software* Quantum GIS. Este apresentou erros e conseqüente perda de um arquivo *shapefile* parcialmente editado, o que levou o autor a abandoná-lo e a buscar outras opções de *software*, como o gvSIG. O gvSIG não apresentou esse problema. No entanto, algumas edições e operações realizadas produziram geometrias com erros (geometrias abertas e/ou vazias). Além disso, operações de sobreposição espacial entre alguns *shapefiles* acusaram erros, não produzindo a geometria resultante da operação. Com isso, optou-se por realizar todas as edições e operações espaciais possíveis no próprio banco de dados, usando as operações espaciais disponíveis no postGIS. Apesar da relativa complexidade que envolve escrever *scripts* para realizar cada edição ou operação espacial, há um maior controle do usuário sobre as operações realizadas. Esta se apresentou como a opção mais eficaz e o número de erros gerados teve grande redução.

6.2 SOBRE A APLICAÇÃO À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ATUBA/PR-BRASIL.

Para testar o BDET, foi realizado um projeto piloto na bacia hidrográfica do rio Atuba. Para tanto, considerou-se dois cenários (1962 e 2000). Os resultados encontrados (taxa de impermeabilização e escoamento superficial direto) foram comparados aos resultados de um cenário de pré-desenvolvimento e a um cenário limite de urbanização – o cenário de plano diretor.

Conforme argumentado no capítulo cinco (seção 5.1.4), devido à dificuldade encontrada em obter dados cartográficos de uma bacia hidrográfica adequados para a realização do projeto piloto, adotou-se os mapeamentos disponibilizados por Nunes (2007) e também os disponibilizados pelo Instituto das Águas do Paraná (no endereço eletrônico <http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=78>), os quais estão em escalas que variam entre 1:2.000 a 1:70.000. Esta tamanha variação em escala não é recomendada para uma integração visando análise espacial. Para uma análise mais consistente deveria ser avaliada esta questão, buscado uma adequação de escalas, fato de demandaria um retrabalho consumindo um tempo que não existe neste momento para esta pesquisa. Todavia, considerando que o foco é validar as funcionalidades do BDET e a sua aplicabilidade no gerenciamento integrado de bacias hidrográficas, utilizou-se os dados cartográficos nas escalas em que foram disponibilizados. Portanto, os

resultados das quantificações das características da bacia hidrográfica e das estimativas de escoamento superficial direto que serão apresentados no decorrer do capítulo cinco devem ser analisados com cautela

O cenário de pré-desenvolvimento serviu como base para as comparações de aumento de taxa de impermeabilização e de escoamento superficial direto entre os cenários considerados no estudo. O cenário de plano diretor serviu para que fosse possível comparar as estimativas realizadas nos cenários de 1962 e de 2000 a uma situação de referência limite, com base em índices definidos nos planos diretores dos municípios que integram a bacia do rio Atuba.

A maior dificuldade encontrada para a aplicação do BDET consistiu na falta de informação apropriada, particularmente a dificuldade em se obter informação atualizada e informação oficial de cenários passados relacionada à cobertura superficial do terreno. Outra dificuldade está relacionada à escala dos produtos cartográficos disponíveis. Como exposto no item 3.2.7.1, as escalas dos produtos utilizados no estudo da bacia hidrográfica do rio Atuba variaram entre 1:10.000 a 1:150.000.

A partir do BDET e das consultas desenvolvidas, foi possível:

Quantificar as áreas ocupadas por cada classe de cobertura superficial do terreno nos cenários de 1962 e de 2000;

Verificar as alterações que ocorreram na cobertura superficial do terreno entre os cenários de 1962 e de 2000;

Verificar a evolução da urbanização entre os cenários de 1962 e de 2000;

Verificar as alterações na taxa de impermeabilização entre os cenários de 1962 e de 2000, e compará-los com a taxa de impermeabilização limite, no cenário de plano diretor;

Estimar o escoamento superficial para os cenários de pré-desenvolvimento, de 1962, de 2000 e de plano diretor, comparando-os.

Relacionar o aumento no escoamento superficial direto às alterações que ocorreram na bacia hidrográfica, verificando essa relação em nível de município, zona de uso e ocupação do solo e grupo hidrológico de solos.

O estudo realizado possibilitou um entendimento dos efeitos das mudanças na cobertura superficial do terreno com relação ao aumento do escoamento superficial direto na bacia do rio Atuba, para o evento de chuva considerado.

Por fim, cabe destacar que, embora o presente estudo tenha apresentado uma abordagem sistemática para as estimativas do escoamento superficial direto, somente dados de medição em campo

podem avaliar a exatidão das estimativas do método SCS-CN. Entretanto, a capacidade da metodologia adotada em prever, de maneira quantificada, as potenciais implicações hidrológicas das mudanças na cobertura superficial do terreno, pode vir a contribuir no processo de tomada de decisão, no que se refere ao planejamento e gestão do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica. Desta maneira, podendo contribuir para a minimização dos impactos relacionados às alterações na cobertura superficial do terreno na resposta hidrológica da bacia hidrográfica.

6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A elaboração de um Banco de Dados espacial que possibilita a quantificação do impacto das alterações nas características da bacia hidrográfica no escoamento superficial, levando em consideração a questão temporal, traz a possibilidade de acompanhamento e fiscalização dos eventos e mudanças ocorridas. Nesse sentido, destaca-se o valor deste BDET no contexto do planejamento urbano e do gerenciamento de recursos hídricos no Brasil. No geral, os municípios não têm ferramentas e pessoal qualificado para realizar estudos referentes aos impactos das políticas de uso e ocupação do solo no escoamento superficial.

Os resultados deste trabalho de tese permitem afirmar que o protótipo do BDET, da maneira como foi modelado conceitualmente e implementado no SGBD PostgreSQL, foi capaz de atender aos requisitos e proporcionar respostas às consultas definidas no decorrer da pesquisa. No entanto, o presente estudo consistiu em um primeiro passo no longo caminho que é a obtenção de conhecimento acerca das questões envolvidas no seu escopo, que são a drenagem urbana sustentável, a integração de SIG e modelos de simulação ambiental e a consideração da dimensão temporal em SIG. Nesse sentido, o autor pretende continuar o desenvolvimento das pesquisas e aplicações relacionadas a esses temas na universidade na qual trabalha, a Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA. Espera-se poder contribuir aplicando o conhecimento adquirido e realizando novos estudos na região do Pampa gaúcho, que por questões diversas, encontra escassez de profissionais, de aplicações e de pesquisas nessas áreas.

A partir das conclusões dessa tese, recomenda-se que a continuação da pesquisa contemple os seguintes tópicos:

- Pesquisar e implementar, no BDET, técnicas de estimativa e quantificação de erros e incertezas;
- Pesquisar e aplicar, no BDET, técnicas de mineração de dados espaço-temporais;
- Desenvolver uma interface gráfica que permita a execução das consultas e análises;
- Adaptar o modelo conceitual e o projeto lógico para possibilitar a atribuição de diferentes valores de coeficiente de abstração inicial para as classes de cobertura superficial do terreno;
- Adaptar o modelo conceitual e o projeto lógico para possibilitar o armazenamento e a realização de análises referentes às áreas de inundações;
- Desenvolver a modelagem conceitual e a implementação de um módulo para realizar estimativas de vazão;
- O projeto e criação de um manual de utilização;
- O estudo, projeto e implementação do sistema para sua utilização via *internet*, com técnicas para sistemas que suportam cliente-servidor;
- A padronização da base de dados no BDET, para que seja possível utilizá-lo num contexto mais amplo do gerenciamento de bacias hidrográficas e no planejamento do uso e ocupação do solo, em nível municipal;
- Dar continuidade ao monitoramento da bacia hidrográfica do rio Atuba;
- Aplicar a metodologia e o BDET em outras bacias hidrográficas;
- Trabalhar na melhoria dos *scripts* das consultas, visando um aumento no desempenho das mesmas;
- Divulgar os resultados desta pesquisa aos profissionais envolvidos no planejamento urbano dos municípios que compõe a bacia hidrográfica do rio Atuba e ao Instituto das Águas do Paraná (IAP), para mostrar a aplicabilidade da ferramenta desenvolvida.

REFERÊNCIAS

AHOLA, T. et al. A Spatio-temporal population model to support risk assessment and damage analysis for decision-making. **International journal of geographical information science**, vol. 21, n. 8, setembro 2007. 935-953.

AMUTHA, R.; PORCHELVAN, P. Estimation of surface runoff in Malattar sub-watershed using SCS-CN method. **Journal of indian society of remote sensing**, vol. 37, n. 2, June 2009. 291-304.

ARMSTRONG, M. P. **Temporality in spatial databases**. GIS/LIS'88. [S.l.]: [s.n.]. 1988. p. 880-889.

ASPINALL, R.; PEARSON, D. Integrated geographical assessment of environment. **Journal of Environmental Management**, v. 59, 2000. ISSN 299-319.

ASPINALL, R.; PEARSON, D. Integrated geographical assessment of environment, v. 59, 2000. ISSN 299-319.

BAGG, J.; RYAN, N. Modelling historical change in southern Corsica: temporal GIS development using an extensible database system. In: KEMP, Z. **Innovations in GIS 4**. Londres: Taylor & Francis, 2005.

BÉDARD, Y. Principles of spatial database analysis and design. In: LONGLEY, P. A., et al. **Geographical information systems - Principles, techniques, management and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

BERRY, B. J. L. **Approaches to regional analysis: A synthesis**. Proceedings of The association of american geographers. [S.l.]: [s.n.]. 1964. p. 2-11.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin of hydrological sciences**, v. 24, p. 43-69, 1979.

BOSCH, D. J. et al. Hydrological and fiscal impacts of residential development: Virginia case study. **Journal of water resources planning and management**, March/April 2003. 107-114.

BOUGHTON, A. A review of the USDA SCS curve number method. **Australian journal of soil research**, v. 27, p. 511-523, 1989.

BRASCO, S. M.; ROCHA, A. A. **Elementos de ciência do ambiente**. 2. ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1987.

BRASIL. **Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Brasília. 1997.

BRASIL. **Lei Nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Brasília. 2000.

BRASIL. **Série saneamento para todos: gestão de águas pluviais urbanas - 4º volume**. Brasília: Ministério das cidades, 2006.

BRIMICOMBE, A. **GIS, environmental modeling and engineering**. 2ª. ed. Boca Raton: Taylor and Francis, 2010.

CAMOSSI, E.; BERTOLOTTO, M.; BERTINO, E. A multigranular object-oriented framework supporting spatio-temporal granularity conversions. **International journal of geographical information science**, vol. 20, n. 5, 2006. 511-534.

CARLETON, C. J.; DAHLGREN, R. A.; TATE, K. W. A relational database for the monitoring and analysis of watershed hydrologic functions: I. Database design and pertinent queries. **Computers & geosciences**, v. 31, p. 393-402, 2005.

CASTRO, A. F. D. **Sistemas computacionais espaço-temporais para tomada de decisão em questões ambientais relacionadas à indústria de petróleo e gás**. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. UFRN. 2007.

CAVIGLIONE, J. H. et al. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

CEBECAUER, T.; HOFIERKA, J. The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. **Geomorphology**, v. 98, n. 3-4, p. 187-198, 2008.

CHEN, J.; JIANG, J. An event-based approach to spatio-temporal data modeling in land subdivision systems. **Geoinformatica**, v. 2, p. 387-402, 1998.

CHOI, J. et al. Innovations in individual feature history management—The significance of feature-based temporal model. **Geoinformatica**, vol. 12, n. 1, 2008. 1-20.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. Singapore: McGraw-Hill, 1988.

CLARAMUNT, C.; THÉRIAULT, M. Managing time in GIS. In: CLIFFORD, J.; TUZHILIN, A. **Recent advances in temporal databases**: proceedings of the International Workshop on Temporal Databases. Zurique: Springer-Verlag, 1995. p. 23-42.

CLARK, M. J. Putting water in its place: A perspective on GIS in hydrology and. **Hidrological Processes**, v. 12, p. 823-834, 1998.

CODD, E. F. **The relational model for database management - version 2**. Boston: Addison Wesley Publishing Company, 1990.

COELHO, A. C. **Agregação de novas variáveis ao processo de planejamento urbano e regional sob a perspectiva de gestão dos recursos hídricos**. Dissertação, Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, UFPR. Curitiba. 2004.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA - CONCAR. **Especificação técnica para estruturação de dados geoespaciais vetoriais (ET-EDGV)**. Rio de Janeiro: CONCAR, 2007.

COUCLELIS, H. Space, time, geography. In: LONGLEY, P. A., et al. **Geographical informations systems - Principles, Techniques, Management, and Applications**. New Jersey: Sons, John Wiley & Sons, 2005.

COVA, T. J.; GOOGCHILD, M. F. Extending geographical representation to include fields of spacial objects. **International journal of geographical information science**, vol. 16, n. 3, 2002. 509-532.

CRAIN, I. K.; MACDONALD, C. L. From land inventory to land management— the evolution of an operational GIS. **Cartographica**, v. 21, p. 39-46, 1984.

CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M.; TURCKIENIEZ, B. Análise da influência dos instrumentos reguladores de ocupação no escoamento urbano. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. D. M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. [S.l.]: ABRH, 2001. p. 487-498.

CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: GUERRA, A. J.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

CYRAN, M.; LANE, P. **Oracle database concepts 10g release 1 (10.1). Part Number B10743-01**. Oracle. [S.l.]. 2003.

DENT, B. D. **Cartography: thematic mapa design**. 4^a. ed. Chigago: Wm. C. Brown Publishers, 1996.

DEP-IPH. **Plano diretor de drenagem urbana**. Departamento de Esgotos Pluviais - Prefeitura municipal de Porto Alegre e Instituto de pesquisas hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 1-159. 2005.

DIAS, T. D. L.; DAVIS JR., C. A.; CAMARA, G. Modelos espaço-temporais. Curitiba: Mundogeo, 2005. Cap. 4.

DOWNER, C. W. et al. Theory, development and applicability of the surface water hydrologic model CASC2D. **Hydrologic Processes**, v. 16, p. 255-275, 2002.

EBRAHIMIAN, M.; SEE, L.; ABDUL MALEK, I. Application of Natural Resource Conservation Service - curve number method for runoff estimation with SIG in the Kardeh watershed, Iran. **European Journal of Scientific Research**, v. 34, n. 4, p. 575-590, 2009.

EDELWEISS, N.; OLIVEIRA, J. P. **Modelagem de aspectos temporais de sistemas de informação**. Recife: UFPE-DI, 1994.

EGENHOFER, M. Spatial SQL: A query and presentation language. **IEEE Transactions on knowledge and data engineering**, v. 6, n. 1, p. 86-95, 1994.

ELMASRI, R.; NAVATHE, S. B. **Sistemas de banco de dados**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2005.

ESTEVEVES, R. L. **Quantificação das superfícies impermeáveis em áreas urbanas por meio de sensoriamento remoto**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Brasília: Universidade de Brasília - Faculdade de tecnologia departamento de engenhari civil e ambiental. Fevereiro 2006.

FEDRA, K. GIS and environmental modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEWART, L. T. **Environmental modeling with GIS**. Nova York: Oxford University Press, 1993.

FERREIRA, K. R. et al. Arquiteturas e linguagens. In: CASANOVA, M. A., et al. **Bancos de dados geográficos**. Curitiba (PR): Mundo Geo, 2005. p. 170-201.

FERREIRA, K. R. et al. The architecture of a flexible querier for spatio-temporal databases. **VII Simpósio brasileiro de geoinformação**, Campos do Jordão, 2005.

FERREIRA, K. R.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Towards an algebra for spatio-temporal databases**. <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/06.03.14.41>. São José dos Campos: [s.n.]. 04 jun. Acesso em 18 de dezembro de 2009.

GALTON, A. Space, time and the representation of geographical reality. **Topoi**, v. 20, p. 173-187, 2001.

GOODCHILD, M. F. The state of SIG for environmental problema solving. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. **Environmental modeling with SIG**. Nova York: Oxford University Press, 1993. p. 8-15.

GOODCHILD, M. F. Combining space and time: new potential for temporal GIS. In: GOODCHILD, M. F. **Placing History: How Maps, Spatial Data, and GIS Are Changing Historical Scholarship**. CA: ESRI Press, 2008. p. 179-198.

GOODCHILD, M. F.; YUAN, M.; COVA, T. J. Towards a general theory of geographic representation in GIS. **International journal of geographical information science**, vol. 21, n. 3, 2007. 239–260.

HAWKINS, R. et al. **Curve Number hydrology: state of the practice**. EUA: ASCE, 2009.

HAWKINS, R. et al. Continuing evolution of rainfall-runoff and the Curve Number precedent. **Proceedings of 2^o Joint Federal Interagency Conference**, Las Vegas, 2010.

HORNSBY, K.; EGENHOFER, M. J. Identity-based change: A foundation for spatio-temporal knowledge representation. **International journal of geographical information science**, vol. 14, n. 3, 2000. 207-224.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO E GESTÃO URBANA - IPEA. **Gestão do uso do solo e disfunções do crescimento urbano: instrumentos de planejamento e gestão urbana**: Curitiba. Brasília: IPEA, 2001.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION - ISO. Geographic information-Temporal schema, ISO/DIS 19108, WWW documents, 2000. Disponível em: <http://www.ncits.org/ref-docs/ISO_DIS_19108.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2009.

ISO, INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATIONS. **Geographic information - Schema for moving features (ISO 19141)**. [S.l.]: [s.n.], 2008.

JIANG, R. **Investigation of Runoff Curve Number initial abstraction ratio**. MS thesis Watershed Management, University of Arizona. [S.l.]. 2001.

JOHNSON, L. E. **Geographic information systems in water resource engineering**. Nova York: Taylor & Francis, 2009.

KARAMOUZ, M.; MORIDI, A.; NAZIF, S. **Urban water engineering and management**. EUA: CRC Press, 2010.

KJENSTAD, K. On the integration of object-based models and field-based models in GIS. **Internacional journal of geographical information science**, Vol 20, n. 3, May, 2006. 491-509.

KORTH, H. F.; SILBERSCHATZ, A. **Sistema de banco de dados**. Tradução de Maurício Heihachiro Galvan Abe. 5. ed. São Paulo: Macro Books, 2006.

KUMAR, R. et al. Runoff estimation for an ungauged catchment using geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) model. **Hidrologic Processes**, v. 21, p. 1829-1840, 2007.

KUTNER, A. S.; CONTE, A. E.; NITTA, T. **Análise geológica e caracterização dos solos para avaliação do coeficiente de escoamento superficial na bacia do Alto Tietê**. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracajú-SE: ABRH. 25-29/11/2001.

LANGRAN, G. **Time in geographic information systems**. [S.l.]: TAYLOR & FRANCIS, 1992.

LANGRAN, G.; CHRISMAN, N. R. A framework for temporal geographic information. **Cartographica**, Vol. 25, n. 3, 1988. 1-14.

LARUE, T.; PASTRE, D.; VIEMONT, Y. Strong integration of spatial domains and operators in a relational database system. In: ABEL, D.; OOI, B. C. **Advances in spatial databases: Proceedings of 3rd Symp. SSD 93**. Berlin: Springer, 1993. p. 53-72.

LE, Y. **A feature-based temporal representation and its implementation with object-relational schema for base geographic data in object-based form**. UCGIS assembly. Adelphi: [s.n.]. 2004.

LE, Y. **Representing time in base geographic data**. Phd dissertation, Graduate Faculty of the University of Georgia. Atenas. 2005a.

LE, Y. A prototype temporal GIS for multiple spatio-temporal representations. **Cartography and geographic information science**, Vol 32, n. n. 3, 2005b. 315-329.

LIU, X.; LI, J. Applications of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China. **Chinese geographic science**, Vol 18, n. n. 3, 2008. 235-241.

LOMBARDI NETO, F. et al. **Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços**. Anais do Simpósio sobre terraceamento agrícola. Campinas: Fundação Cargill. 1989. p. 99-124.

MARSIK, M.; WAYLEN, P. An application of the distributed hydrologic model CASC2D to a tropical montane watershed. **Journal of hidrology**, v. 330, p. 481-495, 2006.

MARTIN, P. et al. Interfacing GIS with water resource models: a state-of-the-art review. **Journal of the American Water Resources Association**, Vol 41, n. 6, December 2005. 1471-1487.

MCCUEN, R. H. **A Guide to Hydrologic Analysis using SCS Method**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982.

MILLER, S. H. et al. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. **Journal of the American Resources Association**, v. 38, n. 4, 2002.

MIRANDA, T. L. **Avaliação da qualidade da água na bacia do Alto Iguaçu através de modelagem matemática para planejamento e gestão dos recursos hídricos**. Tese. Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2001.

MOCKUS, V. Hydrologic soil groups. In: **USDA-SCS National Engineering Handbook**. EUA: USDA, 1972. Cap. 7.

NADI, S.; DELAVAR, M. R. **Toward a general spatio-temporal database structure for GIS applications**. Proceedings of International symposium on spatial-temporal modeling, spatial reasoning, spatial analysis, data mining, data fusion. Beijing-China: [s.n.]. 2005. p. 27-29.

NOGUEIRA, R. E. **Cartografia: representação, comunicação e visualização de dados espaciais**. 3ª Edição. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2009.

NUNES, F. G. **A influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do rio Atuba.** Tese. Curso de Pós-Graduação em Geologia Ambiental. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2007.

NUNES, F. G.; FIORI, A. P. A utilização do método de Ven Te Chow - Soil Conservation Service (SCS) na estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do rio Atuba. **Geografar**, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 139-155, 2007.

NUNES, F. G.; RIBEIRO, N. C.; FIORI, A. P. Propriedades morfométricas e aspectos físicos da bacia hidrográfica do rio Atuba: Curitiba - Paraná. **Anais do VI simpósio nacional de geomorfologia**, Goiânia, 2006.

OBE, R.; HSU, L. **PostGIS in action.** Washington: Manning, 2010.

PANDIT, A.; HECK, H. H. Estimations of soil consevation sevice curve numbers for concrete an asphalt. **Journal of hydrologic engineering**, April 2009. 335-345.

PARKINSON, J. et al. **Drenagem urbana sustentável no Brasil.** Escola de Engenharia - Universidade Federal de Goiás. Goiás. 2003.

PEERBOCUS, M. A. et al. A system for change documentation based on a spatiotemporal database. **GeoInformatica**, Vol. 8, n. 2, 2004. 173-204.

PELEKIS, N. et al. Literature review of spatiotemporal database models. **The Knowledge Engineering Review**, v. 19, p. 235-274, 2005.

PEUQUET, D. J. A conceptual framework and comparison of spatial data models. **Cartographica**, Vol. 21, n. 4, 1984. 66-113.

PEUQUET, D. J. **It's about time:** A conceptual framework for the representation of temporal dynamics in Geographic Information Systems. Proceedings of Association of American Geographers. [S.l.]: [s.n.]. 1994. p. 441-461.

PEUQUET, D. J. Making Space for Time: Issues in Space-Time Data Representation. **GeoInformatica**, Vol. 5, n. 1, 2001. 11-32.

PEUQUET, D. J. **Representations of space and time**. New York: Guilford, 2002.

PEUQUET, D. J. Time in GIS and geographical databases. In: LONGLEY, P. A., et al. **Geographical Information Systems - Principles, Techniques, Management, and Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. Cap. 8.

PEUQUET, D. J.; DUAN, N. An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data. **International journal of geographical information science**, Vol. 9, n. 1, 1995. 7-24.

PONCE, V. M. **Engineering hydrology: principles and practices**. Englewood cliffs: Prentice-Hall, 1989.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number. Has it reached maturity? **Journal of hidrologic engineering**, Vol. 1, n. 1, 1996. 11-19.

PORTO, M. F.; PORTO, R. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 63, 2008.

PORTO, R. L. et al. Drenagem urbana. In: TUCCI, C. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

POSTGRESQL GLOBAL DEVELOPMENT TEAM. PostgreSQL 8.3.3 Documentation. **PostgreSQL**, 2005. Disponível em: <<http://www.postgresql.org/files/documentation/pdf/8.3/postgresql-8.3-US.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2010.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA - PMC. Prefeitura e governos juntos no combate a enchentes. **site da Prefeitura Municipal de Curitiba**, 2011. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/prefeitura-e-governo-juntos-no-combate-a-enchentes/22860>>. Acesso em: 14 dez. 2011.

PRICE, R.; SRINIVASAN, B.; RAMAMOHANARAO, K. **Extending the unified modeling language to support spatiotemporal applications**. Proceedings of Asia technology of object oriented languages and systems. [S.l.]: [s.n.]. 1999. p. 163-174.

PULTAR, E. et al. Dynamic GIS case studies: wildfire evacuation and volunteered geographic information. **Transactions in GIS**, v. 13 (Supplement 1), p. 83-104, 2009.

RAPER, J. **Multidimensional geographic information science**. [S.l.]: London: Taylor & Francis, 2000.

RAY, D. K.; DUCKLES, J. M.; PIJANOWSKI, B. C. The impact of future land use scenarios on runoff volumes in the Muskegon river watershed. **Environmental Management**, v. 46, n. 3, p. 351-366, 2010.

REED, P. M. Bridging river basing scales and processes to assess human-climate impacts and the terrestrial hydrologic system. **Journal of the American water resources association**, 2006. 42.

RIGAUX, P.; SCHOLL, M.; VOISARD, A. **Spatial databases - With application to GIS**. San Diego: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.

SANTILLAN, J. R.; MAKINANO, M. M.; PARINGIT, E. C. Detection of 25 year land cover change in a critical watershed in southern Philippines using Landsat MSS and ETM+ images: importance in watershed rehabilitation. In: WAGNER, W.; SZÉKELKY, B. **ISPRS TC VII Symposium**. Viena: Austria, v. XXXVIII - Part 7A, 2010.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas/SP: [s.n.]. 2004.

SARTORI, A. **Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN**. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2010.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. **Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo**

dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19-29, Outubro/Dezembro 2005.

SCHUELER, T. **Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban best management practices**. Center for watershed protection. USEPA. Washington, D. C. 1987.

SCS - SOIL CONSERVATION SERVICE. **SCS National engineering handbook**. [S.l.]. 1972.

SENGUPTA, R.; YAN, C. A hybrid spatio-temporal data model and structure (HST-DMS) for efficient storage and retrieval of land use information. **Transactions in GIS**, Vol. 8, n. n. 3, 2004. 351-366.

SETZER, J.; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo**. Boletim Técnico do DAEE. São Paulo, p. 81-104. 1979.

SHAMSI, U. M. **GIS applications for water, wastewater, and stormwater systems**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

SHI, Z. H. et al. Research on SCS-CN initial abstraction using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges area, China. **Catena**, v. 77, n. 1, p. 1-7, 2009.

SHUSTER, W. D. et al. Impacts of impervious surface on watersheds hydrology: A review. **Urban water journal**, Vol. 2, n. n. 4, 2005. 263-275.

SILVEIRA, A. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. M. **HIDROLOGIA**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

SINTON, D. The inherent structure of information as a constraint to analysis - mapped thematic data as a case study. **Harvard Papers on GIS**, 7, 1978.

SNODGRASS, R. T. Temporal databases. **Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space**, Berlin, 1992. 22-64.

SOOD, C.; BHAGAT, R. M. Interfacing geographical information systems and pesticide models. **Current Science**, v. 89, p. 1362-1370, 2005.

SOUZA, J. D. **Modelo Espaço-Temporal em SIG para Análise de Qualidade da Água em uma Bacia Hidrográfica**. Dissertação de Mestrado em Ciências Geodésicas - Setor de geociências, Paraná, Universidade Federal do. Curitiba, p. 177. 2004.

SUI, D. Z.; MAGGIO, R. C. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems and prospects. **Computers, environment and urban systems**, v. 23, p. 33-51, 1999.

SUNDARAM, A. M. Urban green-cover and the environmental performance of Chennai city. **Environmental, development and sustainability**, v. 13, p. 107-119, 2011.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL - SUDERHSA. **Plano da bacia do Alto Iguaçu e seus afluentes: Relatório de diagnóstico**. SUDERHSA. Curitiba. 2007.

TANSEL, A. U. **Temporal Databases: Theory, design and implementation**. Bridge Parkway: Benjamin/Cummings, 1993.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento de drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. D. M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 2, 2001. p. 439-478.

TUCCI, C. M. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1995.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RiMa, 2003.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Urbanization and streams: studies of hydrologic impacts. EPA841-R-97-009**. USEPA, Office of water. Washington. 1997.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA.
National engineering Handbook. Section 4 - Hydrology. Washington:
 USDA, 1985.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA.
Urban hydrology for small watersheds. USDA. EUA. 1986.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA.
**Estimating runoff for conservation practices. Engineering technical
 note 210-18-TX5.** USDA. EUA. 1990.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA.
National Engineering Handbook, Part 630, Hydrology. USDA. [S.l.].
 2003.

VASILIEV, I. R. Mapping time. **Cartographica**, Toronto, Vol. 34, n. 2,
 1997. 1-51.

VIEUX, B. E. **Distributed hydrologic modeling using GIS.** 2. ed.
 Nova York: Kluwer Academic Publishers, 2005.

VILLANUEVA, A. O. et al. Gestão da drenagem urbana, da formulação
 à implementação. **REGA - Revista de Gestão de Água da América
 Latina**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, Jan./Jun. 2011.

WALSH, C. J. et al. The urban stream syndrome: Current knowledge
 and the search for a cure. **Journal of the north american
 benthological society**, v. Vol. 24, n. n. 3, p. 706-723, 2005.

WANG, G. et al. Impact of land-use change on hydrological processes
 in the Maying River basin, China. **Science in China Series D: Earth
 Sciences**, vol.49, 2006. 1098-1110.

WEHMEYER, L.; WEIRICH, F. Effect of historic land cover change on
 runoff curve number estimation in Iowa. **Journal of Hydrologic
 Engineering**, v. 15, p. 692-695, 2010.

WOODWARD, D. E. et al. **Curve Number completion study.**
Consultant's report to USDA. NRCS. EUA. 2010.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS, kinematic runoff and erosion model**. Washington: USDA, 1990.

WORBOYS, M. F. A unified model for spatial and temporal information. **The computer journal**, Vol. 37, n. 1, 1994. 26-34.

WORBOYS, M. F. **GIS: A computing perspective**. London: Taylor and Francis, 1995.

WORBOYS, M. F. Modelling changes and events in dynamic spatial systems with reference to socio-economic units. In: FRANK, A. U.; RAPER, J.; CHEYLAN, J. P. **Life and motion of socio-economic units**. ESF GISDATA series. ed. [S.l.]: Taylor and Francis, v. 8, 2001. p. 129-138.

WORBOYS, M. F. Event-oriented approaches to geographic phenomena. **Cartography and geographic information science**, Vol. 19, n. 4, 2005. 1-28.

WORBOYS, M. F. Relational databases and beyond. In: LONGLEY, P. A., et al. **Geographical information systems - Principles, techniques, management and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. p. 163-174.

WORBOYS, M. F.; DUNCKHAM, M. **GIS: a computing perspective**. 2. ed. EUA: CRC Press, 2004.

WORBOYS, M. F.; HEARNshaw, H. M.; MAGUIRE, D. J. Object-oriented data modeling for spatial database. **International journal of geographical information systems**, Vol. 4, n. 4, 1990. 369-383.

WORBOYS, M. F.; HORNSBY, K. From objects to events: GEM, the geospatial event model. **Third international conference on GIScience**, Springer-Verlag, Vol. 3234, 2004. 327-343.

XIONG, X.; MOKBEL, M. F.; AREF, W. G. Spatio-temporal database. In: SHEKHAR, S.; XIONG, H. **Encyclopedia of GIS**. Nova York: Springer, 2008.

YUAN, M. **GIS and spatio-temporal modeling**. Proceedings Third International conference on integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fé, New México, USA: NGCIA. 1996a.

YUAN, M. Modeling semantical, temporal and spatial information systems. In: CRAGLIA, M.; COUCLELIS, H. **Geographic Information Research: Bridging The Atrantic**. London: Taylor and Francis, 1996b.

YUAN, M. Use of a three-domain representation to enhance GIS support for complex spatio-temporal queries. **Transactions in GIS**, Vol. 3, n. n. 2, 1999. 137-159.

YUAN, M. **Representation of dynamic geographic phenomena based on hierarchical theory**. Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Data Handling. Beijing: Study Group of the International Geographical Union on Geographical Information Science. 2000. p. 19-29.

YUAN, M. Representing complex geographic phenomena with both object and field-like properties. **Cartography and geographic information science**, v. 28, n. 2, p. 83-96, 2001.

YUAN, M. Temporal GIS and Applications. In: SHEKHAR, S.; XIONG, H. **Encyclopedia of geographic information science**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

YUAN, M. Geographic data structures. In: BOSSLER, J. **Manual of geospatial science and technology**. Nova York: Taylor and Francis, 2010.

YUAN, M. et al. Extensions to Geographic Representation. In: MCMASTER, R.; USERY, L. **A research agenda for geographic information science**. Boca Raton/Florida: CRC Press, 2004. Cap. 5, p. 129-156.

YUAN, M.; MCINTOSH, J. A typology of spatiotemporal information queries. In: YUAN, M.; MCINTOSH, J. **Mining spatiotemporal information systems**. Nova York: Kuwer academic publisher, 2002. p. 63-82.

YUAN, M.; STEWART, K. **Computation and visualization for the understanding of dynamics in geographic: a research agenda.** [S.l.]: [s.n.], 2008.

ZHAN, Y. et al. **Remote sensing and GIS in runoff coefficient estimation in Binjiang Basin.** Proceedings of geoscience and remote sensing symposium, 2005. IGARSS'05. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 4403-4406.