

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

FILIPPE BIAGGIONI QUESSADA GIMENES

**Utilização de Ferramentas de Análise Espacial em Estudos Ambientais de
Recursos Hídricos: Aplicação em João Pessoa (PB)**

SÃO CARLOS, SP

2010

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL**

**UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESPACIAL EM
ESTUDOS AMBIENTAIS DE RECURSOS HÍDRICOS: APLICAÇÃO EM
JOÃO PESSOA (PB)**

Aluno: Filipe Biaggioni Quessada Gimenes

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

Monografia apresentada ao curso de graduação em
Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo.

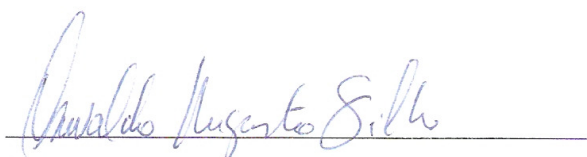
SÃO CARLOS, SP

2010

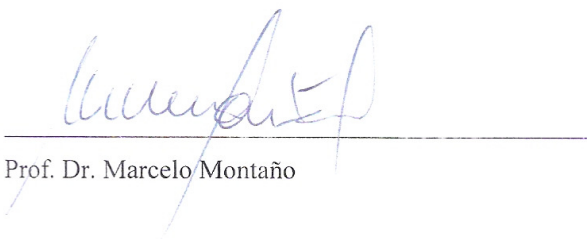
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Filipe Biaggioni Quessada Gimenes

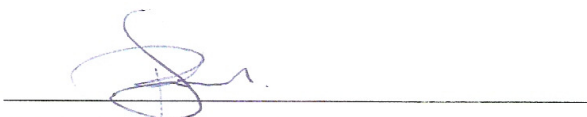
Monografia defendida e aprovada em: 25/10/2010 pela Comissão Julgadora:



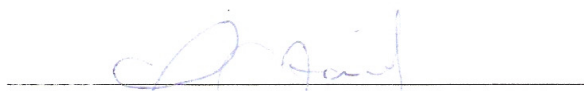
Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho



Prof. Dr. Marcelo Montaña



Prof. Dr. Reinaldo Lorandi



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, Rita Biaggioni, Leticia Biaggioni e Paulo Gimenes, pela dedicação e apoio nesta fase da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Dr. Oswaldo Augusto Filho pela oportunidade e ensinamentos transmitidos ao longo da pesquisa.

Agradeço minha família sempre presente e me apoiando em todos os momentos da minha vida.

Agradeço à turma de Engenharia Ambiental de 2006 pelas ajudas durante a pesquisa e, principalmente, pela amizade construída ao longo dos 5 anos de graduação.

Agradeço também a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. JUSTIFICATIVA	12
2. OBJETIVOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
3.1. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS	13
3.1.1. <i>Hidrologia de Superfície</i>	13
3.1.2. <i>Bacias hidrográficas</i>	16
3.2. RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS	18
3.2.1. <i>Água Subterrânea</i>	18
3.2.2. <i>Aqüíferos</i>	19
3.2.3. <i>Distribuição da Água no Subsolo</i>	20
3.3. MOVIMENTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	22
3.3.1. <i>Fluxo em meio poroso</i>	22
3.3.2. <i>Condutividade Hidráulica e Permeabilidade</i>	23
3.3.3. <i>Porosidade</i>	24
3.3.4. <i>Transmissividade</i>	26
3.4. TRANSPORTE DE POLUENTES EM ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	27
3.4.1. <i>Advecção-Dispersão em meio poroso</i>	29
3.5. SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – SIG.....	30
3.5.1. <i>SIG como Ferramenta de Modelagem Ambiental</i>	32
3.5.2. <i>Modelagem Numérica e Meio Ambiente</i>	34
3.5.3. <i>Delimitação automática de redes de drenagem</i>	36
3.6. SIG E FERRAMENTAS DE MODELAGEM UTILIZADOS NA PESQUISA	37
3.6.1. <i>Ferramentas Hidrológicas de Superfície</i>	40
3.6.2. <i>Ferramentas Hidrológicas de Subsuperfície</i>	43
4. ÁREA DE ESTUDO	44
5. MÉTODO	47
5.1. APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS HIDROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE	48
5.2. APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS HIDROLÓGICAS DE SUBSUPERFÍCIE	52
6. RESULTADOS	54
6.1. MODELAGEM DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS	54
6.1.1. <i>Flow Direction</i>	54
6.1.2. <i>Flow Accumulation</i>	55
6.1.3. <i>Stream Network</i>	56
6.1.4. <i>Watershed</i>	61
6.1.5. <i>Basin</i>	62
6.2. MODELAGEM DOS RECURSOS HÍDRICOS DE SUBSUPERFÍCIE	64
6.2.1. <i>Darcy Flow</i>	64

6.2.2.	<i>Darcy Velocity</i>	69
6.2.3.	<i>Particle Track</i>	70
6.2.4.	<i>Porous Puff</i>	71
6.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
7.	CONCLUSÕES	78
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
9.	ANEXOS	84

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: LINHAS DE FLUXO EQUIPOTENCIAIS DE ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO.	22
FIGURA 2. ESTRUTURA GERAL DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA.	31
FIGURA 3. ARQUITETURA BÁSICA DO ARCGIS.	38
FIGURA 4: FLOW ACCUMULATION.	41
FIGURA 5: FLOW DIRECTION.	42
FIGURA 6: FLUXOGRAMA DE FERRAMENTAS HIDROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE UTILIZADAS.	49
FIGURA 7: FLUXOGRAMA DAS FERRAMENTAS DE SUBSUPERFÍCIE UTILIZADAS.	52
FIGURA 8: RASTER DE DIREÇÃO DE FLUXO COM DEPRESSÕES PREENCHIDAS.	54
FIGURA 9: COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES REDES DE DRENAGEM CRIADAS.	57
FIGURA 10: COMPARAÇÃO ENTRE AS ORDENS DAS REDES DE DRENAGEM.	60
FIGURA 11: BACIAS HIDROGRÁFICAS GERADAS A PARTIR DE EXUTÓRIOS DEFINIDOS.	61
FIGURA 12: MAPA GERADO PELA FERRAMENTA “BASIN” COM 6 CLASSES.	63
FIGURA 13: MAPA GERADO PELA FERRAMENTA “BASIN” COM 20 CLASSES.	64
FIGURA 14: DIFERENÇA ENTRE O MDT E A SUPERFÍCIE FREÁTICA.	65
FIGURA 15: RESIDUAL.	67
FIGURA 16: COMPARAÇÃO ENTRE AS ÁREAS DE CADA FAIXA DE ERRO PERCENTUAL.	68
FIGURA 17: RESULTADO DOS GRIDS MAGNITUDE E DIREÇÃO COMBINADOS.	69
FIGURA 18: TRAJETÓRIA DE DUAS PARTÍCULAS.	70
FIGURA 19: LOCAIS ONDE O RESIDUAL EM RELAÇÃO À VAZÃO DE SAÍDA DE CADA PIXEL FOI ELEVADO.	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COLUNA LITO-ESTRATIGRÁFICA.....	45
TABELA 2: COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPRIMENTOS DAS DIFERENTES REDES DE DRENAGEM.....	58
TABELA 3: VALORES MÁXIMOS, MÉDIOS E MÍNIMOS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA.....	66

RESUMO

Compreender melhor os processos físicos é de vital importância para realização de estudos, especialmente na área ambiental. Nesse sentido, as ferramentas computacionais apresentam-se como grande auxílio para um estudo adequado destes processos. A presente pesquisa estuda e aplica algumas ferramentas computacionais de hidrologia disponíveis em um programa de Sistema de Informação Geográfica – SIG. Elas possibilitam a cartografia automatizada de redes de drenagem, de bacias hidrográficas, de áreas de contribuição à montante de exutórios definidos pelo usuário, de superfície freática e de plumas de contaminação. Os estudos foram desenvolvidos na região metropolitana de João Pessoa (PB), utilizando mapas topográficos digitais na escala de 1:10.000, com curvas de nível em intervalos de 5 metros e pontos cotados em metros. A área selecionada para as análises de hidrologia de subsuperfície continha 26 sondagens. Os resultados obtidos permitiram avaliar preliminarmente o desempenho destas ferramentas, que podem ser úteis em estudos e ações de gestão ambiental dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Palavras – Chave: Sistema de Informações Geográficas – SIG, Simulações de Fluxo Hídrico, Análises de Caráter Ambiental e Ferramentas de Hidrologia.

ABSTRACT

The proper understanding of physical processes is of great importance to conduct studies, especially in environmental area. In this context, computational tools represent great support for a correct study of these processes. This research studies and applies some computer hydrology tools available in a Geographical Information System - GIS software. They make possible the automated cartography of drainage networks, of drainage basins, of watershed areas upper outlets defined by the users, of groundwater and of contamination plumes. The studies were developed in the metropolitan region of João Pessoa (PB), using digital topographic maps at the scale of 1:10,000, with topographic contours in intervals of 5 meters and spot elevations rated in meters. The selected area for groundwater analysis had 26 borings. The obtained results provided to evaluate preliminarily the performance of these tools, which can be useful in studies and actions of environmental management of the hydric superficial resources and groundwater.

Keywords: *Geographical Information System – GIS, Hydric Flow Simulation, Environmental Analysis and Hydrology Tools.*

1. INTRODUÇÃO

Os estudos de processos físicos naturais são de grande importância para as diversas áreas de pesquisa, principalmente para a ambiental. A utilização de ferramentas computacionais nesse estudo auxilia e otimiza a obtenção de resultados, pois possibilita a modelagem numérica dos processos.

Embora o mapeamento de campo seja um modo preciso para caracterizar sistemas de drenagem, ele é freqüentemente não prático, especialmente para grandes bacias hidrográficas. As ferramentas computacionais de análise hidrológica fornecem uma alternativa útil para estudos preliminares de caracterização dos recursos hídricos superficiais de uma região (TARBOTON e AMES, 2001). Modelos digitais de elevação (MDEs) são as fontes primárias de dados digitais para determinação automática de caminhos d'água, sub-bacias e sistemas de drenagem para modelagem hidrológica. A representação digital de redes de drenagem é essencial para obtenção de modelos hidrológicos bem distribuídos, pois ela grava os elementos de ligação destes modelos, através dos quais, os fluxos de água superficial são encaminhados para o exutório.

Os bancos de dados digitais além de disponibilizar de forma organizada os diversos dados coletados também podem servir como uma ferramenta de sistema de apoio à decisão – SAD, pois permitem a previsão de comportamento geológico-geotécnico, tornando possível sua utilização no auxílio ao planejamento de gestão em áreas urbanas.

Este trabalho foi voltado às simulações de fluxo hídrico superficial e subterrâneo, a fim de se realizar análises de caráter ambiental relacionadas ao comportamento natural hidrológico, que influi em eventos geológicos (erosões, escorregamentos, carstes, contaminação de águas superficiais e subterrâneas etc.), e às interações antrópicas com o meio.

O banco de dados foi desenvolvido em ambiente SIG – Sistema de Informações Geográficas. Os modelos numéricos foram utilizados em unidades básicas de terreno, que foram definidas por um Modelo Digital de Elevação – MDT e por modelos hidrológicos derivados (superficial e subterrâneo).

A área de estudo abrangeu a região metropolitana de João Pessoa (PB), perfazendo uma área total de 208,61 km² e 13 mapas topográficos na escala 1:10.000, com curvas de nível em intervalos de 5 metros, pontos cotados em metros e a rede de drenagem cartografada nestes mapas (ANEXO 1). Esta área de estudo foi selecionada, pois o presente trabalho inseriu-se dentro de uma pesquisa de Doutorado, desenvolvida no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, que já estava em andamento e continha disponíveis dados de interesse para aplicação das ferramentas em questão.

É importante ressaltar que o tema desenvolvido na pesquisa relaciona-se diretamente com disciplinas da graduação de Engenharia Ambiental, pois a medida que as ferramentas de superfície e subsuperfície foram aplicadas foi necessário retomar conceitos de disciplinas como Geologia e Solos, Caracterização Ambiental: Bacia Hidrográfica, Técnicas em Representação em Engenharia Ambiental, Sistema de Informação Geográficas Aplicado à Engenharia Ambiental e Hidrologia, além de outros conceitos multidisciplinares.

1.1. JUSTIFICATIVA

A cidade de João Pessoa, capital do estado da Paraíba, já evidencia diversas manifestações ambientais negativas decorrentes da má utilização ou ausência de recursos direcionados às atividades de planejamento, mostrando a importância da construção de uma ferramenta que auxilie nesse planejamento.

O desenvolvimento da presente pesquisa pode contribuir com a geração de resultados que poderão ser utilizados, em uma possível continuidade desta pesquisa, para subsidiar o desenvolvimento de análises que permitirão auxiliar o planejamento urbano.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é utilizar e avaliar ferramentas de modelagem dos fluxos de água superficial e água subterrânea com base em um banco de dados digital, estruturado em SIG, elaborado a partir de sondagens SPT e mapas topográficos na área metropolitana de João Pessoa – PB. A partir do objetivo geral, foram traçados objetivos específicos:

- Testar e avaliar as ferramentas de modelagem hidrológica de superfície em toda a área de estudo delimitada.
- Aplicar as ferramentas de modelagem de subsuperfície em uma bacia hidrográfica selecionada (em função das sondagens existentes e da localização em área urbanizada).
- Avaliar a aplicabilidade das ferramentas testadas para diferentes áreas da Engenharia Ambiental (gestão de bacias, hidrologia, recuperação de áreas degradadas, remediação de água subterrânea, etc.).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Recursos Hídricos Superficiais

3.1.1. Hidrologia de Superfície

O escoamento superficial é a fase do ciclo hidrológico que trata do conjunto das águas que, por efeito da gravidade, se desloca na superfície da Terra. O estudo do escoamento superficial engloba, portanto, desde a simples gota de chuva que, tombando sobre o solo saturado ou impermeável, escorre superficialmente, até o grande curso de água que desemboca no mar. As águas que escoam superficialmente representam uma das maiores riquezas naturais do globo. Sua importância não precisa ser realçada, bastando lembrar os

imensos problemas que afligem as regiões em que este recurso natural é escasso (GARCEZ, 1967).

Parte do volume de água precipitado é interceptada pela vegetação e outras barreiras e retorna à atmosfera por evaporação. Do restante que atinge a superfície do solo; parte retorna por evaporação no solo e superfícies líquidas, parte pela transpiração de vegetais; e outra parte é absorvida por infiltração, o restante escoar livremente pela superfície do terreno, seguindo linhas de maior declive (RIGHETTO, 1998).

Na fase inicial da precipitação o escoamento superficial forma uma película laminar que recobre as pequenas depressões do terreno. Com a continuação do processo, a lâmina superficial vai se tornando mais espessa, passando a escoar um volume que representa a diferença entre a precipitação total e os volumes retidos, infiltrados, evaporados e acumulados nas depressões. Estas águas, que não têm ainda um caminho preferencial de escoamento, mas tão somente um sentido de escoamento dado pela linha de maior declividade do terreno, são conhecidas como “águas livres”. Seu estudo é importante para o conhecimento do processo de erosão (TUCCI, 1998).

As águas livres vão, pouco a pouco, confluindo para os pontos mais baixos do terreno, passando a escoar em conjunto pelos pequenos canais que formam a “micro-rede de drenagem”. A própria capacidade erosiva das águas tende a aprofundar esta “canaletas”, fixando, cada vez mais, caminhos preferenciais para o escoamento. A reunião de diversos destes “micro-canais” dá origem às torrentes caracterizadas por um regime de escoamento que acompanha integralmente o regime da precipitação (TUCCI, 1998).

As torrentes e as contribuições do escoamento subterrâneo formam, nas calhas coletoras mais profundas, os cursos d’água (rios) que apresentam um regime mais ou menos perene, devido, justamente, à contribuição contínua do aquífero. Constitui-se desta forma a

rede de drenagem propriamente dita, compreendendo os formadores, subafluentes e afluentes do curso d'água principal, que encaminha as águas para seu destino final (RIGHETTO, 1998).

Os principais fatores, ligados às características da bacia de contribuição, que presidem o afluxo da água em uma determinada drenagem podem ser genericamente resumidos em:

- a) Área e forma da bacia;
- b) Conformação topográfica da bacia, principalmente, declividades e pontos acumuladores;
- c) Condições superficiais do solo e geológicas do subsolo: vegetação, capacidade de infiltração, natureza e disposição das camadas geológicas, coeficientes de permeabilidade, situação de aquíferos, etc; e
- d) Obras de utilização e controle d'água a montante: drenagens artificiais, canalização e retificação de cursos d'água, etc.

Segundo Garcez (1967), para aplicação da engenharia, faz-se importante conhecer principalmente o escoamento superficial que passa por um ponto de um curso d'água. Entre as varias grandezas que caracterizam o escoamento superficial, podem ser indicadas como mais importantes:

- a) Coeficiente de deflúvio (“run-off” ou escoamento superficial). É a relação entre a quantidade total escoada pela seção e a quantidade total de água precipitada na bacia contribuinte; pode ser referente a uma precipitação especifica ou a precipitações ocorridas em um determinado tempo.
- b) Nível da água. Altura atingida pela água na seção, em relação a certa referencia. Refere-se a valores instantâneos à media de períodos (dia, mês, etc.).
- c) Velocidade é a relação entre o espaço percorrido pela partícula liquida e o tempo de percurso. Distingue-se velocidade média, superficial e pontual.

d) Vazão (descarga). É a relação entre o volume escoado e o intervalo de tempo em que escoar; é igual ao produto da velocidade média pela área da seção. Refere-se, também, a valores instantâneos ou a valores médios de certos períodos.

e) Vazão específica (ou contribuição unitária) é a relação entre a vazão e a área da bacia contribuinte.

f) Altura média equivalente é a relação entre o volume total escoado em um intervalo de tempo e a área da bacia.

g) Declividade da linha d'água. Relação entre a diferença de nível entre dois pontos da superfície líquida e a distância entre os mesmos.

3.1.2. Bacias hidrográficas

Uma Bacia Hidrográfica pode ser definida como uma área topograficamente delimitada drenada por um sistema de canais – ou seja, o total de área do terreno sobre um determinado ponto em um canal ou rio que drena passando por este ponto. A bacia é uma unidade hidrológica frequentemente utilizada como unidade físico-biológica e socioeconômico-política para planejamento e manejo dos recursos naturais (BROOKS et al., 1997).

A utilização da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento ambiental não é recente. Há tempos os hidrólogos têm reconhecido as ligações entre características físicas de uma bacia hidrográfica e a quantidade de água que chega aos corpos hídricos. Por outro lado, os limnólogos têm considerado que as características do corpo d'água refletem as características de sua bacia de drenagem. Nesse sentido, as abordagens de planejamento e gerenciamento ambiental utilizando a bacia hidrográfica como unidade de estudo têm evoluído bastante, desde que estas apresentam características biogeofísicas que denominam sistemas ecológicos e hidrológicos relativamente coesos (PIRES et al., 2002 *apud* TONELLO et al., 2009).

Por ser uma unidade estratégica para manejo dos recursos naturais, é importante definir uma bacia hidrográfica de interesse para ser possível aplicar diferentes ferramentas de modo a permitir prever o comportamento dinâmico da bacia, como por exemplo, verificar como uma chuva altera o escoamento das drenagens, determinar vazões de pico na saída de uma bacia (exutório), ou ainda avaliar qual a extensão da influencia de ações em um dado ponto da bacia. Dentro deste contexto, tornam-se necessárias algumas definições.

Define-se como tempo de concentração o tempo necessário para que toda a bacia hidrográfica esteja contribuindo com a água sobre ela precipitada, desde o início da chuva, para uma determinada seção do curso de água ou da superfície da bacia objeto de análise. Dessa forma, o conhecimento do tempo de concentração é fundamental para a determinação da máxima vazão que estará contribuindo para um determinado local da bacia após o início da chuva (SILVA et al., 2007).

A máxima vazão causada pelo evento de precipitação é atingida, depois de certo tempo, e um estado de equilíbrio é alcançado, implicando em que o escoamento superficial concentrou-se à saída da bacia e a taxa de água deixando o sistema bacia hidrográfica, por escoamento superficial (vazão à saída), iguala-se à taxa de água entrando no sistema na forma de precipitação efetiva (intensidade de precipitação efetiva).

O método racional é dos mais conhecidos e antigos modelos para o cálculo da vazão de pico à saída de uma bacia hidrográfica. Aplica-se a pequenas bacias hidrográficas, ou seja, as que atendem aos seguintes critérios: pode-se assumir a distribuição uniforme da precipitação, no tempo e no espaço; a duração da precipitação usualmente excede o tempo de concentração da bacia; há predomínio de escoamento superficial, como é o caso em áreas urbanizadas; e os efeitos de armazenamento superficial, durante o escoamento, são desprezíveis.

O método tempo-área é uma extensão do método racional, já que este se aplica apenas a bacias hidrográficas com pequenas áreas de drenagem (até 1 Km²) podendo, entretanto, considerar variações de intensidade da precipitação ao longo do tempo e maior diversidade de uso do solo na bacia hidrográfica. Esse método baseia-se no estabelecimento de uma função relacionando áreas de contribuição na bacia ao tempo necessário para que essas áreas contribuam à formação de vazões à saída da bacia (PONCE, 1989).

Dessa forma, tendo sido definida a bacia hidrográfica e sendo conhecida sua dinâmica e os fatores atuantes na mesma, torna-se possível realizar análises mais detalhadas sobre a área, o que pode servir de subsídio para ações de gerenciamento dos recursos naturais, e principalmente dos recursos hídricos. Nesta primeira etapa da pesquisa, visou-se definir uma bacia hidrográfica de interesse através da aplicação de diversas ferramentas de hidrologia de superfície, que descritas em outro item.

3.2. Recursos Hídricos Subterrâneos

3.2.1. Água Subterrânea

Segundo Teixeira et al. (2003), de maneira simplificada, toda água que ocupa vazios em formações rochosas ou no regolito é classificada como água subterrânea. A infiltração é o processo de maior importância para a recarga de água no subsolo e o volume e velocidade em que ela ocorre depende de vários fatores.

A infiltração é favorecida pela presença de materiais porosos e permeáveis, como solo e sedimentos arenosos. Por outro lado, materiais argilosos e rochas cristalinas pouco fraturadas são desfavoráveis à infiltração. A quantidade de água transmitida pelo solo depende de uma característica importante, chamada de capacidade de campo, que corresponde ao volume de água absorvido pelo solo, antes de atingir a saturação, e que não sofre movimento para níveis inferiores (TEIXEIRA et al. op. cit.).

Em áreas vegetadas a infiltração é favorecida pelas raízes que abrem caminho para a água descendente no solo. A cobertura florestal também exerce importante função no retardamento de parte da água que atinge o solo, através da interceptação, sendo o excesso lentamente liberado para a superfície do solo por gotejamento. Por outro lado, nos ambientes densamente florestados, cerca de $\frac{1}{3}$ da precipitação interceptada sofre evaporação antes de atingir o solo (TEIXEIRA et al. op. cit.).

De modo geral declives acentuados favorecem o escoamento superficial direto, diminuindo a infiltração. Superfícies suavemente onduladas permitem o escoamento superficial menos veloz, aumentando a possibilidade de infiltração (TODD, 1959).

O modo como o total da precipitação é distribuída ao longo do ano é um fator decisivo no volume de recarga de água subterrânea, em qualquer tipo de terreno. Chuvas regularmente distribuídas ao longo do tempo promovem uma infiltração maior, pois, desta maneira, a velocidade de infiltração acompanha o volume de precipitação (TODD, 1959).

O avanço da urbanização e a devastação da vegetação influenciam significativamente a quantidade de água infiltrada em adensamentos populacionais e zonas de intenso uso agropecuário. Nas áreas urbanas, as construções e a pavimentação impedem a infiltração, causando efeitos catastróficos devido ao aumento do escoamento superficial e redução da recarga subterrânea. Nas áreas rurais, a infiltração sofre redução pelo desmatamento em geral, pela exposição de vertentes através de plantações sem terraceamento, e pela compactação dos solos causada pelo pisoteamento de animais, como extensivas áreas de criação de gado (TODD, 1959).

3.2.2. Aquíferos

Unidades rochosas ou de sedimentos, porosas e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes significativos de água subterrânea passível de ser explorada pela

sociedade são chamadas de aquíferos. O estudo dos aquíferos visando a exploração e proteção da água subterrânea constitui um dos objetivos mais importantes da Hidrogeologia (TEIXEIRA et al. op.cit.).

São considerados bons aquíferos materiais com média a alta condutividade hidráulica, como sedimentos inconsolidados, rochas sedimentares, além de rochas vulcânicas, plutônicas e metamórficas com alto grau de fraturamento. Os reservatórios que não apresentam as mesmas características que os aquíferos são denominados:

- a) Aqüicludo – unidades geológicas, saturadas e com grandes quantidades de água absorvidas lentamente, mas incapazes de transmitir um volume significativo com velocidade suficiente para abastecer nascentes ou poços;
- b) Aqüífugos – unidades geológicas que não apresentam poros interconectados e não absorvem e nem transmitem água;
- c) Aqüitarde – denominação utilizada para se compararem dois reservatórios, na qual a unidade mais produtiva de água é o aquífero e a menos o aqüitarde.

Além disso, os aquíferos podem ser classificados em livres, suspensos e confinados. Os livres são aqueles que o topo é delimitado pelo nível freático (NA). Os suspensos são acumulações de água sobre aqüitardes na zona insaturada. E os confinados ocorrem quando um estrato permeável encontra-se confinado entre dois estratos pouco permeáveis ou impermeáveis.

3.2.3. Distribuição da Água no Subsolo

Além da força gravitacional e das características dos solos, sedimentos e rochas, o movimento da água no subsolo é controlado também pela força de atração molecular e tensão

superficial. A atração molecular age quando moléculas de água são presas na superfície de argilominerais por atração de cargas opostas, pois a molécula de água é polar. Este fenômeno ocorre principalmente nos primeiros metros de profundidade, no solo ou no regolito, rico em argilominerais. A tensão superficial tem efeito nos interstícios muito pequenos, onde a água fica presa nas paredes dos poros, podendo ter movimento ascendente, contra a gravidade, por capilaridade.

Assim, conforme o tamanho do poro, a água pode ser higroscópica (adsorvida) e praticamente imóvel, capilar quando sofre a ação da tensão superficial movendo-se lentamente ou gravitacional (livre) em poros maiores, que permitem movimento mais rápido (DAVIS, 1966).

O limite inferior da percolação de água é dado quando as rochas não admitem mais espaços abertos (poros) devido à pressão da pilha de rochas sobrejacentes. Esta profundidade atinge um máximo de 10.000 m, dependendo da situação topográfica e do tipo de rocha. Pode-se imaginar então que toda água de infiltração tende a atingir este limite inferior, onde sofre um represamento, preenchendo todos os espaços abertos em direção à superfície. Estabelece-se assim uma zona onde todos os poros estão cheios de água, denominada zona saturada ou freática. Acima desse nível, os espaços vazios estão parcialmente preenchidos por água, contendo também ar, definindo a zona não saturada, também chamada de vadosa ou zona de aeração. O limite entre estas duas zonas é uma importante superfície denominada superfície freática (SF) ou nível da água subterrânea (NA). O nível freático acompanha aproximadamente as irregularidades da superfície do terreno (DAVIS, 1966).

3.3. Movimentação de Água Subterrânea

3.3.1. Fluxo em meio poroso

Além da força gravitacional, o movimento da água subterrânea também é guiado pela diferença de pressão entre dois pontos, exercida pela coluna de água sobrejacente aos pontos e pelas rochas adjacentes. Esta diferença de pressão é chamada de potencial da água (potencial hidráulico) e promove o movimento da água subterrânea de pontos com alto potencial, como nas cristas do nível freático, para zonas de baixo potencial, como fundos de vales. Esta pressão exercida pela coluna de água pode causar fluxos ascendentes da água subterrânea, contrariando a gravidade, como no caso de porções profundas abaixo de cristas, onde a água tende a subir para zonas de baixo potencial, junto a leitos de rios e lagos (TEIXEIRA et al., 2003).

A união de pontos com mesmo potencial hidráulico em subsuperfície define as linhas equipotenciais do nível freático, semelhantes a curvas de nível topográficas. O fluxo de água, partindo de um potencial maior para outro menor, define uma linha de fluxo, que segue o caminho mais curto entre dois potenciais diferentes, num traçado perpendicular às linhas equipotenciais (Figura 1).

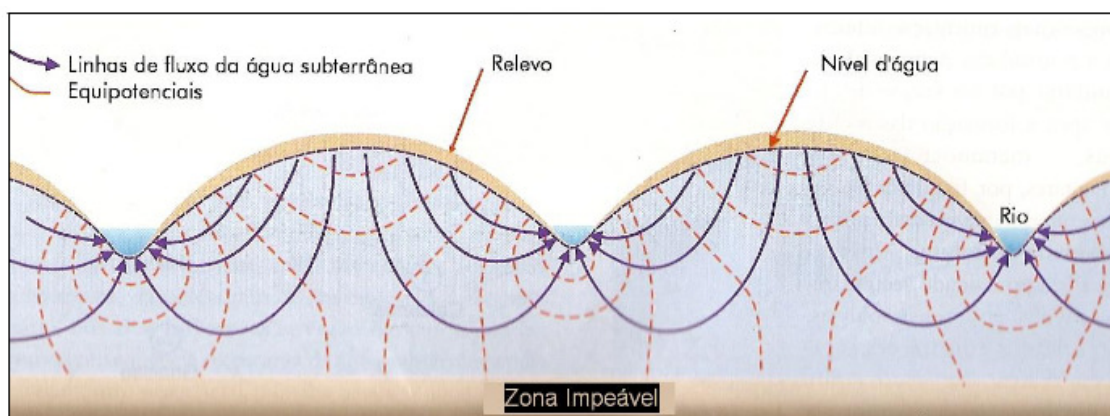


Figura 1: Linhas de fluxo equipotenciais de escoamento subterrâneo.

Fonte: (TEIXEIRA et al. 2003).

O fluxo de água através de aquíferos, a maioria dos quais é um meio poroso natural, pode ser expresso pela conhecida Lei de Darcy (TODD, 1959), desenvolvida pelo engenheiro francês Henry Darcy, em 1856. Seu experimento se baseou na medição da vazão de água Q com um cilindro preenchido por material arenoso, para diferentes gradientes hidráulicos. O fluxo de água pelo cilindro (definido como vazão específica - q) para cada gradiente foi calculado pela relação entre a vazão Q e a área A de seção do cilindro.

Darcy constatou que a vazão do fluxo Q é diretamente proporcional à área A de seção do cilindro, ao gradiente hidráulico aplicado (h_1-h_2) e inversamente proporcional ao comprimento do cilindro L . Quando combinadas, essas conclusões nos dão a Lei de Darcy:

$$Q = \frac{K.A.(h_1-h_2)}{L} \rightarrow q = \frac{K.(h_1-h_2)}{L} \quad (8)$$

Assim, para cada meio poroso estudado ele obteve o gráfico de uma reta, de coeficiente angular K , que foi definido como sendo a condutividade hidráulica do material, expressando sua capacidade de transmissão de água. Dessa forma foi possível quantificar a capacidade dos materiais de transmitirem água em função da inclinação do nível freático (BEAR e VERRUIJT, 1987).

3.3.2. Condutividade Hidráulica e Permeabilidade

Segundo Teixeira et al. (2003), no fluxo de água em superfície, a velocidade é diretamente proporcional à inclinação da superfície. Este grau de inclinação, denominado gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta L$), é definido pela razão entre o desnível (Δh) e a distancia horizontal entre dois pontos (ΔL). O desnível indica a diferença de potencial entre os pontos. Quanto maior a diferença de potencial, dada uma distancia lateral constante, maior será a velocidade do fluxo. Já em relação à água subterrânea, é necessário considerar também a

permeabilidade do solo e a viscosidade da água. A relação desses parâmetros com o fluxo de água subterrânea foi investigada e quantificada pelo engenheiro hidráulico francês Henry Darcy, em 1856, o que resultou na formulação da lei de Darcy, base da hidrologia de meios porosos.

O conceito da condutividade hidráulica aplicado à zona saturada define o conceito de permeabilidade, que determina a capacidade dos materiais conduzirem água em condições de saturação. Isto é influenciado pelo tamanho dos poros e pela conexão entre eles.

3.3.3. Porosidade

A porosidade é uma propriedade física definida pela relação entre o volume de poros e o volume total de certo material. Existem dois tipos fundamentais de porosidade nos materiais terrestres: primária e secundária. A porosidade primária é gerada juntamente com o sedimento ou rocha, sendo caracterizada nas rochas sedimentares pelos espaços entre os clastos ou grãos ou planos de estratificação. Nos materiais sedimentares o tamanho e forma das partículas, o seu grau de seleção e a presença de cimentação influenciam a porosidade. A porosidade secundária, por sua vez, se desenvolve após a formação das rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, por fraturamento ou falhamento durante sua deformação (porosidade de fraturas). Um tipo especial de porosidade secundária se desenvolve em rochas solúveis, como calcários e mármore, através da criação de vazios por dissolução, caracterizando a porosidade cárstica (DAVIS, 1966).

Dentro dessa definição dois conceitos devem ser distinguidos, são eles o da porosidade total e o da porosidade efetiva. A porosidade total ou simplesmente a porosidade de um solo ou rocha pode ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total, assim:

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (2)$$

Onde,

η = porosidade total;

V_v = volume de vazios;

V = volume total;

A porosidade depende do tamanho dos grãos. Se os grãos são de tamanho variado, a porosidade tende a ser menor do que no caso de grãos uniformes, porque os grãos pequenos ocupam os espaços vazios entre os maiores. Ao extrair-se água de um aquífero, parte do líquido é retido pelas forças moleculares e pela tensão superficial e apenas parte do total armazenado é liberado. Desta forma, na hidrogeologia é necessário definir-se o conceito de porosidade efetiva ou eficaz. Este parâmetro pode ser definido como a quantidade de água fornecida por unidade de volume do material, ou seja, a razão entre o volume de água efetivamente liberado de uma amostra de rocha porosa saturada e o volume total (COSTA, 2009).

$$\eta_e = \frac{V_d}{V} \quad (3)$$

Onde,

η_e = porosidade efetiva;

V_d = volume de água drenada por gravidade;

V = volume total;

Um aquífero para ser considerado como bom, deve apresentar valores elevados tanto de porosidade total quanto de porosidade efetiva. Assim, a argila apresenta uma elevada porosidade total (média variando em torno de 35 a 40%), mas possui uma reduzida porosidade efetiva (valores médios em torno de 3%) e não tem, utilização como aquífero. Já uma mistura de areia e pedregulho apresenta uma porosidade total um pouco menor (valores médios

variando entre 20 a 35%), porém apresenta um valor elevado de porosidade efetiva (média em torno de 29%) e forma um bom aquífero (FEITOSA; MANOEL FILHO, 1997).

O principal fator que determina a disponibilidade de água subterrânea não é a quantidade de água que os materiais armazenam, mas a sua capacidade em permitir o fluxo de água através dos poros (TODD, 1959; TEIXEIRA et al., 2003).

3.3.4. Transmissividade

Segundo Oliveira e Brito (1998), a transmissividade é um parâmetro presente em diversas formulações para cálculo de vazão de poços, sendo uma das incógnitas a ser determinada em ensaios *in situ*. Este parâmetro foi introduzido por Theis, em 1935, com o objetivo de avaliar a capacidade de transmissão de água pelo meio, através de toda sua espessura saturada.

O coeficiente de transmissividade (T) é definido como sendo a vazão transmitida através de uma parcela vertical do terreno, de largura unitária (L_U), cuja altura é igual à da zona saturada, sob um gradiente hidráulico (i) unitário:

$$T = \frac{Q}{L_U \cdot i} \quad (4)$$

O conceito de transmissividade pode também ser conceituado, de forma similar, como a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. O conceito de transmissividade é utilizado em estudos bidimensionais. (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997). Para aquíferos confinados a transmissividade é dada pela expressão:

$$T = K \cdot b \quad (5)$$

Onde,

T = transmissividade;

K = condutividade hidráulica;

b = espessura do aquífero.

3.4. Transporte de Poluentes em Água Subterrânea

A interação solo-contaminante é muito complexa, uma vez que, muitos fenômenos físicos, químicos e biológicos podem ocorrer simultaneamente. São inúmeros os fenômenos que controlam o transporte de contaminantes em meios porosos, onde o contaminante considerado é a massa de alguma substância tóxica dissolvida (poluente), movendo-se com algum fluido (água) nos vazios do meio poroso (solo) seja ele saturado ou não (NOBRE, 1987 apud VELOZO, 2006).

O fluxo da água na zona não saturada (poros preenchidos por água e ar) depende da força da gravidade e da forma dos poros, sendo vertical para baixo. Na zona saturada (poros preenchidos por água) o fluxo depende do potencial hidráulico, como visto anteriormente, e os contaminantes podem espalhar-se por grandes áreas, cobrindo longas distâncias, após períodos de tempo variável. Caracterizam-se assim as plumas de contaminação com concentrações variáveis, no espaço e no tempo, dependendo das condições hidrogeológicas locais.

Segundo Fetter (1993), o movimento de poluentes não depende apenas do fluxo do fluido no qual essas substâncias estão dissolvidas, mas sim de mecanismos aos quais estas substâncias são submetidas, os principais mecanismos de transporte e retenção de contaminantes em meios porosos saturados são:

- ***Advecção:***

É o mecanismo de transporte de massa causado pelo movimento da água. Durante a evolução da maioria das plumas de poluição, a advecção é o mecanismo de transporte mais importante. Na advecção, os contaminantes (solutos) presentes na água se movem na direção

das linhas de fluxo com uma velocidade que, em princípio, é igual à velocidade média linear da água e sem alterar sua concentração na solução.

- ***Dispersão Hidrodinâmica:***

A dispersão hidrodinâmica é o fenômeno que permite o espalhamento tridimensional do contaminante, proporcionando diluição do contaminante pelo caminho do escoamento. O processo de difusão molecular não pode ser separado da dispersão mecânica no fluxo de água pelo solo, portanto esses dois processos são combinados para definir a dispersão hidrodinâmica.

a) *Difusão molecular:* esse transporte ocorre devido ao gradiente de concentração existente em um fluido, ou seja, o soluto dissolvido em água desloca-se de uma área de maior concentração para uma área de menor concentração, visando equalizar a concentração em toda a massa de fluido. Este fenômeno ocorre independente da velocidade do fluido, mas é acentuado pela turbulência resultante dos mecanismos de mistura mecânica.

b) *Dispersão mecânica:* a mistura mecânica é decorrente da dispersão em canais individuais, do desenvolvimento de velocidades médias diferentes em canais diferentes, devido à variação das dimensões dos poros ao longo das linhas de fluxo, e do desvio da trajetória das partículas em decorrência da tortuosidade, reentrâncias e interligações entre os canais (BEAR, 1972).

A dispersão que ocorre na direção do fluxo é chamada dispersão longitudinal e a que ocorre na direção perpendicular ao fluxo é chamada dispersão transversal.

- ***Sorção:***

A sorção engloba os processos que demonstram a capacidade do solo em reter substâncias. A adsorção é a adesão de moléculas ou íons à superfície de partículas no solo promovendo uma diminuição da concentração da fase aquosa e retardando o transporte de contaminante, já a de - sorção é a liberação da fase sólida. A habilidade do solo em reter

substâncias é limitada, se a fonte de contaminação tiver alimentação contínua, a taxa de retenção tende a diminuir com o tempo, podendo chegar a se anular (YONG et al., 1992).

- ***Dcaimento:***

O processo de decaimento é de importância relativamente menor e é de difícil quantificação. Os principais processos são os de ácido-base, solução-precipitação, oxidação-redução, complexação e processos microbiológicos, que tem como consequência o retardamento na velocidade de avanço do contaminante (NOBRE, 1987 apud VELOZO, 2006).

As considerações que foram feitas a respeito de alguns destes parâmetros nas modelagens realizadas serão mais detalhadas no item de aplicação das ferramentas de água subterrânea.

3.4.1. Advecção-Dispersão em meio poroso

O modelo de dispersão em duas dimensões em um meio poroso, governado pela advecção-dispersão, escrito em termos das direções longitudinais (direção do fluxo) e verticais (perpendiculares à direção do fluxo) XL e XT, respectivamente, usado na ferramenta *Porous Puff* pode ser descrito pela equação 6:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D'_L \frac{\partial^2 C}{\partial X_L^2} + D'_T \frac{\partial^2 C}{\partial X_T^2} - V'_L \frac{\partial C}{\partial X_L} - \lambda C \quad (6)$$

Onde,

C = concentração do soluto;

D_L' e D_T' = coeficientes de eficácia de dispersão nas direções longitudinais e transversais;

X_L e X_T = deslocamento na direção longitudinal e transversal;

λ = coeficiente de decaimento, assumido como constante para decaimento de exponencial de primeira ordem.

A solução aproximada para esta equação é baseada na suposição de dispersão de Gaus, de uma fonte pontual instantânea em um domínio de duas dimensões, com a concentração inicial igual a zero. Com essas suposições obtemos a equação 7:

$$c(XL, XT, t) = \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{XL^2}{\sigma^2} + \frac{XT^2}{\sigma^2} \right) \right] M e^{-\lambda t}}{\sqrt{2\pi\sigma^2} \sqrt{2\pi\sigma^2} n R b} \quad (7)$$

Onde,

M = massa de soluto derramada instantaneamente na fonte, em unidades de massa;

n = porosidade do aquífero;

R = fator de retardação;

b = espessura do aquífero em unidades de comprimento;

σ^2 = variância da distribuição de Gaus nas direções longitudinais e transversais.

3.5. Sistema de Informação Geográfica – SIG

Segundo Câmara e Davis, a coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel; isto impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados. Com o desenvolvimento simultâneo, na segunda metade deste século, da tecnologia de

Informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento.

Nesse contexto, o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos (CÂMARA e DAVIS, 2001).

Numa visão abrangente, pode-se indicar que um SIG tem os seguintes componentes (RUFINO, FALCAO e PASSOS, 2006): interface com usuário; entrada e integração de dados; funções de consulta e análise espacial; visualização e plotagem; e armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos), ilustrado na figura a seguir:

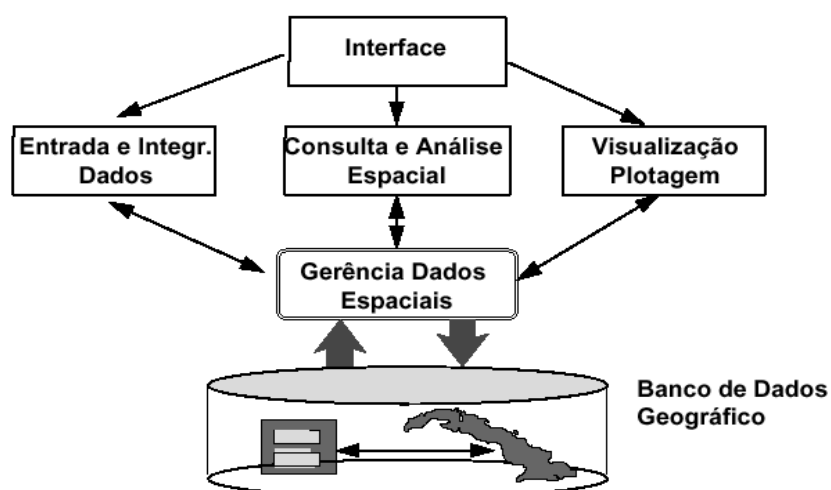


Figura 2. Estrutura geral de Sistemas de Informação Geográfica.
Fonte: CÂMARA E DAVIS, 2001.

Um sistema de Informação Geográfica (SIG) difere dos demais sistemas, pela sua capacidade de estabelecer relações espaciais entre elementos gráficos. É o sistema mais adequado para análise espacial de dados geográficos. Essa capacidade é conhecida como topologia, ou seja, o estudo genérico dos lugares geométricos, com suas propriedades e relações. Esta estrutura, além de descrever a localização e a geometria das entidades de um mapa, define relações de conectividade, contigüidade e pertinência.

Além dos dados geométricos e espaciais, os Sistemas de Informação Geográfica possuem atributos alfanuméricos. Os atributos alfanuméricos são associados com os elementos gráficos, fornecendo informações descritivas sobre eles. Os dados alfanuméricos e os dados gráficos são armazenados, geralmente, em bases separadas. Os programas para SIG são projetados de modo a permitir exames de rotina em ambas as bases gráficas e alfanuméricas, simultaneamente. O usuário é capaz de procurar informações e associá-las às entidades gráficas e vice-versa.

Os dados utilizados em SIG podem ser divididos em dois grandes grupos: dados gráficos, espaciais ou geográficos, que descrevem as características geográficas da superfície (forma e posição) e os dados não gráficos, alfanuméricos ou descritivos, que descrevem os atributos destas características. Os dados espaciais podem ser representados basicamente de duas formas distintas em um SIG: vetorial (vetor) e matricial (raster). Já os dados alfanuméricos ainda podem ser subdivididos em dois tipos: atributos dos dados espaciais; e atributos georreferenciados.

3.5.1. SIG como Ferramenta de Modelagem Ambiental

Cada vez mais, os computadores vêm sendo utilizados como ferramentas de apoio a procedimentos de estudos, de análises e de simulações em vários campos do conhecimento humano. Sistemas complexos para análises e para modelagens foram desenvolvidos para se

trabalhar dados relacionados com áreas específicas como finanças, transportes, geologia, solos, etc.

Nessa mesma tendência, sistemas de armazenamento, manipulação e apresentação de dados espaciais, conhecidos como SIG, foram criados e estão sendo utilizados no campo das ciências ambientais. Modelos matemáticos, aritméticos e lógicos, buscando representar propriedades e processos do meio físico natural, têm sido implementados, nos SIG, com o objetivo de facilitar o seu estudo e compreensão para que se possa atuar sobre o meio ambiente de forma responsável e cooperativa.

Para que isto ocorra, este trabalho defende a idéia de que é imperativo que se considere o tratamento das incertezas das representações dos dados espaciais envolvidos em um modelo matemático ambiental apoiado em SIG. As incertezas destas representações, uma vez propagadas para os resultados finais das modelagens, qualificam os produtos gerados em SIG para o apoio efetivo aos processos de tomadas de decisão baseados nesses produtos (FELGUEIRAS, 1999).

A potencialidade principal de um SIG está na sua capacidade de realizar análises complexas a partir da integração, em uma base de dados única, de representações de dados espaciais. Os procedimentos de análise espacial, desenvolvidos no ambiente de um SIG, possibilitam, no estágio tecnológico atual, a análise de processos, alguns simples e outros mais complexos, do mundo real. Para isto é necessário a criação de modelos ambientais, que representem adequadamente o fenômeno natural em estudo. Assim, a modelagem ambiental, neste contexto, consiste na criação de modelos matemáticos, determinísticos ou estocásticos, que relacionam atributos ambientais na tentativa de representar o comportamento de um processo ocorrendo na natureza. Os modelos ambientais são, então, transformados em modelos computacionais para serem executados no ambiente de um SIG (FELGUEIRAS op.cit.).

Como ferramenta de modelagem o SIG pode ser utilizado como pré-processador de informações, empregando-se uma interface para conversão e transferência dos dados armazenados em SIG para os arquivos de entrada dos modelos desenvolvidos em outros programas computacionais. Após a execução do modelo, a interface é utilizada novamente para que os arquivos de saída do modelo sejam transferidos para o SIG novamente, onde os resultados obtidos pela simulação são apresentados. Nessa forma de integração, o SIG assume o papel de pós-processador (TSOU; WHITTEMORE, 2001 *apud* Almeida, 2006).

Na segunda parte deste trabalho de iniciação científica foram utilizados modelos de água subterrânea e a segunda possibilidade de integração dos modelos com SIG foi utilizada, onde as equações do modelo (fluxo de água subterrânea, por exemplo) foram incorporadas aos elementos do SIG, como funções de map algebra (sob a forma de ferramentas de análise dos sistemas).

3.5.2. Modelagem Numérica e Meio Ambiente

O ambiente natural que foi estudado nesta pesquisa, que abrange modelos de dinâmica de água superficial e subterrânea, apresenta processos de grande complexidade e necessita que muitos dados e variáveis sejam considerados para uma representação adequada. Particularmente, processos que envolvem fluxo de águas subterrâneas impõem algumas dificuldades adicionais, por ocorrerem em uma dimensão visual e de contato diferente da que vive o ser humano.

Segundo Todd (1959), a água utilizada como recurso hídrico para abastecimento e de vital interesse para a humanidade, e como se sabe a maior parte de água doce disponível na Terra encontra-se no subsolo. Conseqüentemente, a medida que a demanda por água aumentou, os mananciais superficiais foram tornando-se insuficientes para o abastecimento de grandes populações, estimulando a exploração da água subterrânea. Por esse motivo, o entendimento dos processos que envolvem essas fontes é de grande importância pública e

ambiental. Além disso, o movimento das águas subterrâneas e superficiais é o principal e mais eficiente agente geomórfico da superfície terrestre, iniciando vários processos de modelação.

O estudo da hidrogeologia impõe algumas dificuldades adicionais à hidrologia de superfície por motivos intrínsecos ao meio. Estes motivos estão todos relacionados às condições naturais que estabelecem especificidades ao entendimento do comportamento do fluxo subterrâneo e sua interação com o meio. As dificuldades adicionais, entretanto, longe de estabelecerem uma impossibilidade ao seu estudo, têm representado um desafio estimulante aos pesquisadores que se dedicam a desvendá-las ao longo de décadas. Tal interesse é plenamente justificado pela importância dos recursos hídricos subterrâneos (manancial e fluxo) para as atividades sócio-econômicas e ao estudo de consequências ambientais (RABELO, 2006).

A grande variabilidade natural dos parâmetros hidráulicos, teoricamente contínuos, vinculados às formações que permeiam o fluxo subterrâneo e às tensões hidrológicas, permite aos pesquisadores, numerosas considerações para simplificar este ambiente real, tornando efetivamente possível seu estudo como um todo. Essas simplificações compõem as bases do modelo conceitual adotado e implementado posteriormente pelo modelo matemático para simular o comportamento do aquífero. A implementação desses modelos, entretanto, requer dados os quais, juntamente com os modelos conceitual e matemático, possuem incertezas associadas, quaisquer que sejam as configurações adotadas entre os mesmos. O sucesso atribuído à execução desses modelos tem como um de seus parâmetros principais a avaliação das incertezas envolvidas nos seus dados e previsões (RABELO, 2006).

Portanto, os resultados obtidos pela aplicação dos modelos não retratarão fielmente a realidade. Dessa forma é importante ressaltar que todos os resultados e interpretações subsequentes desses modelos devem ser vistos apenas como um guia para análises posteriores.

3.5.3. Delimitação automática de redes de drenagem

Modelos digitais de elevação de terreno (MDTs) são úteis fontes de dados para determinação automática de caminhos d'água, sub-bacias e sistemas de drenagem para modelagem hidrológica. A representação digital de sistemas de redes de drenagem é essencial para modelos hidrológicos distribuídos, pois ela grava os elementos de ligação do modelo através dos quais o fluxo de água é encaminhado para o exutório. A escala (densidade de drenagem) da rede de drenagem usada controla a escala da declividade do terreno e dos elementos de canal. Embora o mapeamento de campo seja conhecidamente o modo mais preciso para determinar sistemas de drenagem e densidade de drenagem, ele é freqüentemente não prático, especialmente para grandes bacias hidrográficas. MDTs derivados de redes de fluxo fornecem, então, uma substituição útil para sistemas de canais ou vales (TARBOTON e AMES, 2001).

Há uma variedade de métodos para delimitar sistemas de drenagem, que utilizam diferentes algoritmos como singular (drenagem para uma célula vizinha única), múltiplo (repartição do fluxo entre células vizinhas) e métodos que utilizam o fluxo de direção para computar área de contribuição e identificação da curvatura local. A escala da rede de drenagem delineada é às vezes controlada por uma área suporte limitante, a qual pode impor uma constante densidade de drenagem arbitraria e espacial (TARBOTON e AMES, 2001).

Dentre estes métodos de delimitação podem ser citados: avaliação da área de contribuição e comprimento de drenagem (padrão); combinação área-declividade limitante (MONTGOMERY e DIETRICH, 1992); e limite por seleção de densidade de drenagem por análise de “Stream drop” (TARBOTON et al., 1991).

O primeiro método consiste na seleção de uma área de drenagem coerente com a escala com que se está trabalhando. Basta dividir esta mínima área de drenagem a ser

considerada pelo quadrado do tamanho da célula (pixel), o resultado deve ser utilizado como limite. Por exemplo, deseja-se considerar uma área de 10.000 m² e as células possuem 10 m, o limite seria $10.000/10^2 = 100$. Adicionalmente, pode-se calcular o comprimento de drenagem gerado desta forma e compará-lo com o observado em campo.

Tarboton et al. (1991) sugerem para a extração de redes de drenagem a partir de MDTs que os fluxos extraídos devem ter propriedades tradicionalmente atribuídas a sistemas de canais e ter a maior resolução possível. O procedimento consiste em procurar pela menor escala, medida em termos de área suporte, na qual ocorre uma mudança de comportamento nas leis que regem os processos nas elevações do terreno. Também é argumentado, que este ponto de mudança de comportamento representa uma transição física dos mecanismos de erosão e transporte em canal de escala grande, para mecanismos de erosão e transporte em uma escala pequena.

3.6. SIG e Ferramentas de Modelagem Utilizados na Pesquisa

Neste trabalho, para realização das atividades propostas, foi utilizado o SIG ArcView 9.1. O SIG foi empregado para aplicar modelos numéricos relacionados ao fluxo de água superficial (na primeira etapa) e subsuperficial (na segunda etapa da pesquisa) da área de estudo. O SIG atuou como um pré e pós processador, os modelos já estão incorporados ao mesmo e disponíveis na forma de ferramentas de hidrologia superficial (hydrology) e de água subterrânea (groundwater). Logo, a principal atividade realizada no SIG foi a exploração destas ferramentas de modelagem matemática, de forma a ser possível selecionar uma bacia hidrográfica de interesse para, posteriormente, realizar análises mais detalhadas na área selecionada.

O programa ArcView 9.1 foi produzido pela empresa ESRI. Fundada em 1969, a ESRI tem se afirmado como líder mundial no desenvolvimento de tecnologia SIG, mais

marcadamente ainda a partir de 1982, com o lançamento da plataforma ArcInfo. O ArcGIS é um conjunto de produtos integrados para construir seu Sistema de Informação Geográfica de acordo com necessidades específicas. A arquitetura básica do ArcGIS está ilustrada na figura a seguir:



Figura 3. Arquitetura básica do ArcGIS.

Dentre os produtos que compõem o ArcGIS, o utilizado nesta pesquisa foi o Desktop GIS que é o nome coletivo dado a três produtos: ArcView, ArcEditor e ArcInfo que trabalha da mesma maneira (arquitetura comum). Eles apenas diferem pela quantidade de funções disponíveis. ArcInfo tem mais funções que o ArcEditor, que por sua vez tem mais funções que o ArcView. Neste projeto foi usado o ArcView. Para aplicar os modelos hidrológicos de superfície e subsuperfície foram utilizadas as ferramentas de análise espacial (Spatial Analyst Tools) existentes no ArcView.

Os modelos a seguir são os que estão por trás das ferramentas hidrológicas utilizadas na pesquisa, e por isso serão brevemente descritos. Os modelos podem ser de dois tipos: analógicos ou digitais.

Embora raramente considerados no contexto do SIG, modelos analógicos são ainda hoje, provavelmente, o tipo mais comum. Um modelo analógico é definido como um modelo em escala, uma representação do mundo real na qual toda parte do sistema real aparece em miniatura no modelo. Claramente o sucesso de modelos analógicos depende do grau que os sistemas podem ser escalonados – se a operação do sistema em escala é idêntica à operação do sistema real. Uma medida importante de um modelo analógico é sua escala ou fração representativa, a relação entre a distância entre dois pontos no modelo e a respectiva distância entre os correspondentes pontos no mundo real. Neste modelo, todos os aspectos do sistema devem ser escalonados na mesma relação para que o modelo seja válido (GOODCHILD et al., 2005).

Em um modelo digital ou computacional, todas as operações são conduzidas utilizando um computador. Os dados são reunidos em um modelo de dados e codificados usando uma variedade de esquemas de codificação que transformam aspectos relevantes do mundo real em padrões de zeros ou uns. O modelo é também limitado a ser codificado na mesma linguagem que o programa de computador ou software utilizam. Modelos digitais não têm uma fração representativa, já que não há uma distância nesse modelo para ser comparada com o mundo real (GOODCHILD e PROCTOR, 1997). O nível do detalhamento geográfico é capturado na resolução espacial, ou o tamanho da menor feição representada no modelo. Para dados do tipo raster (matricial), este é o tamanho da célula individual ou pixel. Quando um dado em SIG é criado pela digitalização de um mapa, é útil utilizar uma simples regra em que a resolução espacial é aproximadamente 0,5 mm da escala do mapa – em outras palavras, um mapa na escala 1:24.000 possui uma resolução espacial de aproximadamente 12 m (GOODCHILD et al., 2005).

Além da resolução espacial, a resolução temporal também é importante em modelos dinâmicos, pois ela define a duração de cada passo do modelo. Qualquer modelo dinâmico

procede numa sequência discreta de passos, cada um representando um intervalo de tempo fixo, e o software tenta prever o estado do sistema no final do passo baseado nas entradas do começo de cada passo. Ambas as resoluções espacial e temporal necessitam ser apropriadas a real natureza do processo a ser modelado. Nesta pesquisa foram utilizados apenas modelos digitais.

O dado digital da forma da superfície do terreno mais comum (e base para todas as aplicações desta pesquisa) é modelo de elevação digital do terreno (MDT), o qual é baseado em células que juntas formam uma representação matricial de uma superfície contínua. A precisão dos dados é determinada principalmente pela resolução, e também por outros fatores como o tipo de dado e a exatidão da amostragem da superfície quando está se criando o MDT original. A partir do MDT como entrada é possível realizar diversas outras análises, como a determinação do sistema de drenagem.

Nesta pesquisa foram aplicadas basicamente ferramentas de análise de modelos de escoamento superficial e subterrâneo disponíveis no SIG ArcGIS 9.1. Estes modelos estão agrupados no SIG em ferramentas hidrológicas de análise do meio. Estas ferramentas estão divididas em dois grupos: ferramentas de hidrologia de superfície (hydrology) e ferramentas de hidrologia subterrânea (groundwater).

3.6.1. Ferramentas Hidrológicas de Superfície

A seguir, as ferramentas de hidrologia de superfície com suas respectivas descrições:

- **BASIN:** Esta ferramenta delimita bacias de drenagem dentro da área de análise através da identificação de linhas divisoras entre as bacias. Basin analisa a superfície de fluxo de direção para encontrar todos os conjuntos de células conectadas que pertencem à mesma área de drenagem. As bacias de drenagem são criadas pela localização de pontos de exutório nos limites da área de análise (onde a água sairia da superfície), bem como as depressões,

então identificando a área de contribuição de cada ponto de exutório. O resultado é um raster contendo as bacias de drenagem.

- **FILL:** Depressões (e picos) são freqüentes erros devidos à resolução dos dados. Depressões devem ser preenchidas para assegurar a delimitação apropriada de bacias e canais. Se as depressões não forem preenchidas, o sistema de drenagem resultante pode ser descontínuo. Esta função realiza iterações até que todas as depressões, dentro de um determinado Z limite especificado, sejam preenchidas. À medida que são preenchidas, outras depressões podem ser criadas nas fronteiras das áreas preenchidas, as quais serão removidas na próxima iteração.
- **FLOW ACCUMULATION:** Cria a rede de drenagem de uma bacia pela determinação de locais de acumulação de fluxo d'água. Pode ser entendida como o número de células que fluem para dentro de cada célula (Figura 4).

0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	0
0	3	7	5	4	0
0	0	0	20	0	1
0	0	0	1	24	0
0	2	4	7	35	2

Figura 4: Flow Accumulation.

Com isso, pode-se aplicar um valor limite para os resultados da função flow accumulation e usando o Map Algebra, uma rede de drenagem pode ser delineada. Para isso é necessário inserir uma das seguintes expressões na ferramenta Map Algebra:

$$\text{Streamnet} = \text{con}(\text{floacc} > 100, 1) \text{ ou } \text{Streamnet} = \text{setnull}(\text{floacc} < 100, 1)$$

Em ambos os casos, todas as células com mais de 100 (limite) células fluindo para dentro dela são marcadas com o número 1, e constituirão o sistema de drenagem, todas as outras células são omitidas.

- **FLOW DIRECTION:** Esta função utiliza uma superfície (MDT) como entrada e retorna um raster mostrando a direção de fluxo de cada célula (Figura 5).

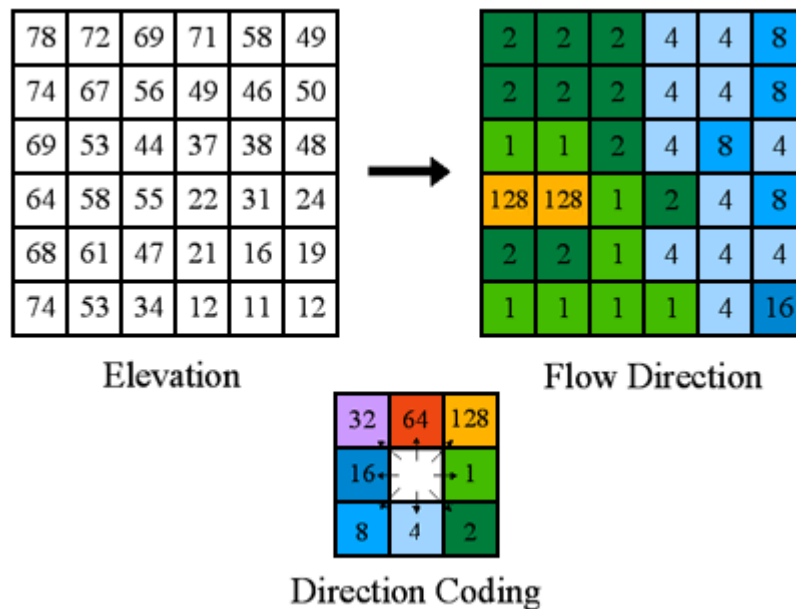


Figura 5: Flow Direction.

- **FLOW LENGTH:** Um uso primário da ferramenta é calcular o mais longo caminho de escoamento (drenagem) dentro de uma dada bacia. Pode ser utilizada para calcular o tempo de concentração da bacia, isto pode ser feito utilizando-se a opção “UPSTREAM”.

- **SINK:** Cria uma malha identificando todas as depressões ou áreas de drenagem interna.

- **STREAM ORDER:** Determina uma ordem numérica para os segmentos de um raster que representa canais de uma drenagem. Pode realizar esta determinação baseando-se nos métodos de STRAHLER ou SHREVE.

- **STREAM TO FEATURE:** Permite converter uma rede de drenagem da forma raster (matricial) para forma vetorial.

- **WATERSHED:** Delimita bacias de drenagem para uma determinada região específica. Essa região é definida a partir de pontos de exutório que devem ser inseridos em pontos de interesse.

3.6.2. Ferramentas Hidrológicas de Subsuperfície

Quanto às ferramentas de hidrologia subterrânea, que foram aplicadas na segunda etapa desta pesquisa, apresentam-se suas descrições a seguir:

- **DARCY FLOW:** Calcula o balanço de volume residual de água subterrânea (diferença entre o fluxo que entra e o que sai) para fluxo constante em um aquífero, e o vetor velocidade (expresso em direção e magnitude) para cada célula, utilizando a lei de Darcy e campos de transmissividade, carga hidráulica, porosidade e espessura do aquífero. Darcy Flow aplica a lei de Darcy em células adjacentes a uma célula central, para calcular a velocidade do fluido através das paredes da célula. Fazendo isso para todas as células, uma malha de velocidades é criada, denominada campo de fluxo.
- **DARCY VELOCITY:** Calcula o vetor velocidade da água subterrânea para cada célula utilizando a Lei de Darcy;
- **PARTICLE TRACK:** Calcula o caminho e o tempo de viagem de uma partícula através de um campo de velocidade para um dado local de início, determinando a sua localização futura. Esta ferramenta atravessa a linha entre dados matriciais e vetoriais, pois gera uma série de segmentos de linhas (vetores) de uma malha de dados (matriz).
- **POROUS PUFF:** Calcula a dispersão bi-dimensional de um poluente em um meio poroso uniforme, para uma fonte de poluição instantânea. Tem como base a equação de advecção-dispersão (BEAR, 1979; FREEZE e CHERRY, 1979; MARSILY, 1986). A advecção do centro de massa da fonte introduzida segue o caminho de fluxo calculado pela ferramenta anterior (Particle Track), e a dispersão é modelada como uma distribuição gaussiana em volta deste centro de massa, como uma pluma por exemplo. Os resultados

produzidos por essa ferramenta são altamente idealizados e são adequados para uma estimativa rudimentar da direção e características do transporte do poluente. Produz uma malha (Grid) de concentração do poluente depois da advecção e dispersão.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrangeu a região metropolitana de João Pessoa (PB), perfazendo uma área total de 208,61 km² e 13 mapas topográficos na escala 1:10.000 (ANEXO 1). O clima do município de João Pessoa está inserido dentro do domínio tropical quente-úmido, fortemente influenciado pelos alísios marítimos e caracteriza-se por apresentar uma estação seca observada nos meses de setembro a dezembro, sendo os meses mais secos outubro e novembro, havendo neste período um pequeno aumento da temperatura, girando em torno de 27°C, e uma estação chuvosa que vai de abril a agosto, retornando às condições de seca a partir de setembro.

Os tipos de formações vegetais que predominam em João Pessoa, são caracterizados por Formações Litorâneas, Campos de Várzeas, Manguezais e Matas de Tabuleiros. Os remanescentes da vegetação natural da área vêm sendo rapidamente convertidos para diversos usos em decorrência do impacto das atividades econômicas, especialmente aquelas relacionadas à especulação imobiliária. Isto vem contribuindo para o desequilíbrio ambiental, aumentando o risco de extinção local de grande parte de espécies endêmicas da fauna e da flora (MORAIS, 2009).

O sistema hidrográfico do município de João Pessoa é caracterizado por duas bacias hidrográficas, a do Rio Paraíba ao norte e a do Rio Gramame ao sul, entremeadas pelas bacias dos rios Jaguaribe, Cabelo, Aratú, Jacarapé, Cuiá, Camurupim, de pequeno porte. Todos são rios perenes e apresentam disposição paralela, ou seja, encontram-se orientados no sentido oeste-leste (MORAIS, op. cit.).

Em relação à litologia do Estado da Paraíba, a tabela a seguir ilustra a seqüência lito-estratigráfica que compõe a Bacia Sedimentar Costeira Paraíba-Pernambuco.

Tabela 1: Coluna lito-estratigráfica.

Idade	Formação	Constituição
Quaternário	Coberturas	Aluvião: areais, siltes e argilas.
		Dunas e areias de praia
Terciário	Plioceno	Barreiras
	Eoceno	Areias, siltes e argilas de cores variadas.
	Paleoceno	Maria Farinha
	Maestrichtiano	Gramame
Cretáceo	Campaniano	Calcários clásticos cremes e compactos.
	Santoniano	Calcários cinza, calcarenosos na base.
	Beberibe	Arenitos grossos a finos, com intercalações argilosas ou conglomeráticas, calcíferas no topo.
Pré-Cambriano		Gnaisses, quartzitos, migmatitos e granitos.

Fonte: COSTA (2006).

Observação: A formação Maria Farinha não ocorre no estado da Paraíba.

Dentre as formações descritas na Tabela 1, a formação Barreiras (Terciário) e Coberturas (Quaternário) encontram-se na área delimitada para aplicação das ferramentas de água subterrânea, e por isso, serão descritas mais detalhadamente a seguir, bem como os aquíferos encontrados inseridos nas formações em questão.

- **Formação Barreiras**

Essa formação é constituída por conglomerados de cor creme a avermelhada com seixos e grânulos sub-angulosos de quartzo e blocos de argila retrabalhada, em corpos tabulares a lenticulares de até 1m de espessura. Nesses conglomerados intercalam-se seqüências de areias, siltes e argilas, repetida irregularmente na dimensão vertical, com predominância ora da litologia arenosa, ora da siltosa, ora da argilosa, apresentando granulometrias e cores variadas. O topo da seqüência encontra-se intemperizado, formando solos areno-argilosos espessos, onde viceja a vegetação de grande porte da Mata Atlântica.

A espessura da Formação Barreiras, na área paraibana da Bacia Sedimentar Costeira Paraíba- Pernambuco, a julgar pelos registros de perfuração de poços e pelos levantamentos geofísicos, varia bastante, de um mínimo de 9 m (vale do Grotão) a um máximo de 110 m na sede da cidade de Caaporã. A espessura média obtida em perfis de 68 poços com informações dimensionais foi de 42 m (COSTA et al., 2007 apud COSTA, 2009).

Segundo Meneses et al. (2009), o Sistema Aquífero Barreiras encontra-se inserido na formação geológica de mesmo nome (descrita anteriormente) e que se estende ao longo de quase toda a costa brasileira. Constitui um aquífero predominantemente livre, que ocupa uma área de 176.532 km², com profundidade média em torno de 25 metros (COUTINHO, 1967 apud MENESES et al, 2009) e, no caso de João Pessoa, em estudo realizado por Costa et al (2003) identificou-se um valor de condutividade hidráulica de 2,94 m.d⁻¹ na Superfície dos Tabuleiros, valor este relativamente baixo, especialmente quando comparado com regiões de maior infiltração.

- **Depósitos Quaternários**

São compreendidos por depósitos de mangue, constituídos de sedimentos pelíticos, terraços marinhos, constituídos, basicamente, por areias quartzosas de granulação média a grossa; e aluviões, localizados nas bacias fluviais e constituídos de areias siltosas, as quais, por suas características de boa porosidade e permeabilidade, apresentam grande possibilidade de infiltração de água. Os aquíferos nos aluviões e terraços marinhos são livres e dependem da infiltração das águas das chuvas.

Os aquíferos de sedimentos quaternários apresentam-se inseridos nos sedimentos recentes, localizados nas áreas de cotas mais baixas, onde o processo predominante é o de acumulação sedimentar, como no caso das margens fluviais e da Planície Marinha. O nível da água nestes aquíferos é bem próximo à superfície e, por vezes, aflorante. Esta característica torna estes aquíferos ainda mais vulneráveis uma vez que não há uma superfície de atenuação

para os casos de eventuais derramamentos de contaminantes. Outra característica deste aquífero é uma maior condutividade hidráulica (MENESES et al., 2009).

5. MÉTODO

O método utilizado na presente pesquisa consistiu basicamente nas seguintes etapas:

- a) Planejamento: nesta etapa foi feita a definição dos objetivos da pesquisa, bem como realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar e foi estabelecido o método e as principais atividades a serem executadas;
- b) Revisão Bibliográfica: foi realizada a revisão bibliográfica sistemática sobre os temas técnico-científicos principais abordados pelo estudo (conceitos gerais sobre a dinâmica da água de superfície e subterrânea, ferramentas de análise desta dinâmica utilizando SIG) a fim de possibilitar embasamento teórico para aplicação das ferramentas;
- c) Levantamento de dados: foi feita a inserção dos dados planialtimétricos a fim de constituir-se a base topográfica digital e os dados de sondagem a percussão (localização e cotas do nível d'água);
- d) Ensaios de Aplicação das Ferramentas de Análise do SIG: tendo os dados previamente levantados foi possível aplicar as ferramentas de dinâmica das águas de superfície, de águas subterrâneas e de dispersão de poluentes;
- e) Análise dos Resultados: após aplicadas as ferramentas de modelagem do SIG os resultados obtidos puderam ser avaliados em função do que era esperado;
- f) Conclusões: com os resultados avaliados foi possível obterem-se as conclusões evidenciando potenciais aplicações e possíveis limitações das principais ferramentas utilizadas, com destaque para estudos de Engenharia Ambiental.

5.1. Aplicação das Ferramentas Hidrológicas de Superfície

Na primeira etapa da pesquisa, a partir da base topográfica digitalizada na pesquisa de Doutorado vinculada foi possível obter o Modelo Digital de Terreno – MDT, e dessa forma, identificar as unidades básicas de análise do terreno, que refletem o comportamento dos fluxos hídricos. O MDT foi gerado a partir da ferramenta *Topo To Raster* e foram realizados testes de validação deste resultado para garantir que o MDT fosse o mais próximo da realidade possível, pois é a partir dele que todas as outras ferramentas são aplicadas.

Observou-se que as curvas interpoladas a partir do MDT grid apresentaram traçados razoavelmente coincidentes com os das curvas de nível da base topográfica original. Além disso, a maioria das curvas intermediárias geradas a partir do MDT (intervalo de 2,5 m) também apresentaram um traçado compatível com a base topográfica de entrada. Pelo Topo to Raster, os RMS obtidos foram de 0,67 (malha de 4 m) e 0,61 (malha de 5m) (SOARES, 2009).

Com o MDT gerado, as ferramentas de hidrologia de superfície existentes no SIG ArcGIS 9.1 puderam ser aplicadas para toda a área digitalizada (17 folhas cartográficas na escala 1:10.000). A aplicação das ferramentas acima citadas permitiu modelar o movimento das águas superficiais e, conseqüentemente, delimitar as diferentes bacias hidrográficas existentes na área de estudo.

As ferramentas hidrológicas de superfície foram então aplicadas para possibilitar a geração de resultados iniciais, que permitissem a delimitação de uma bacia de interesse para posteriores análises. A execução das ferramentas seguiu o seguinte fluxograma:

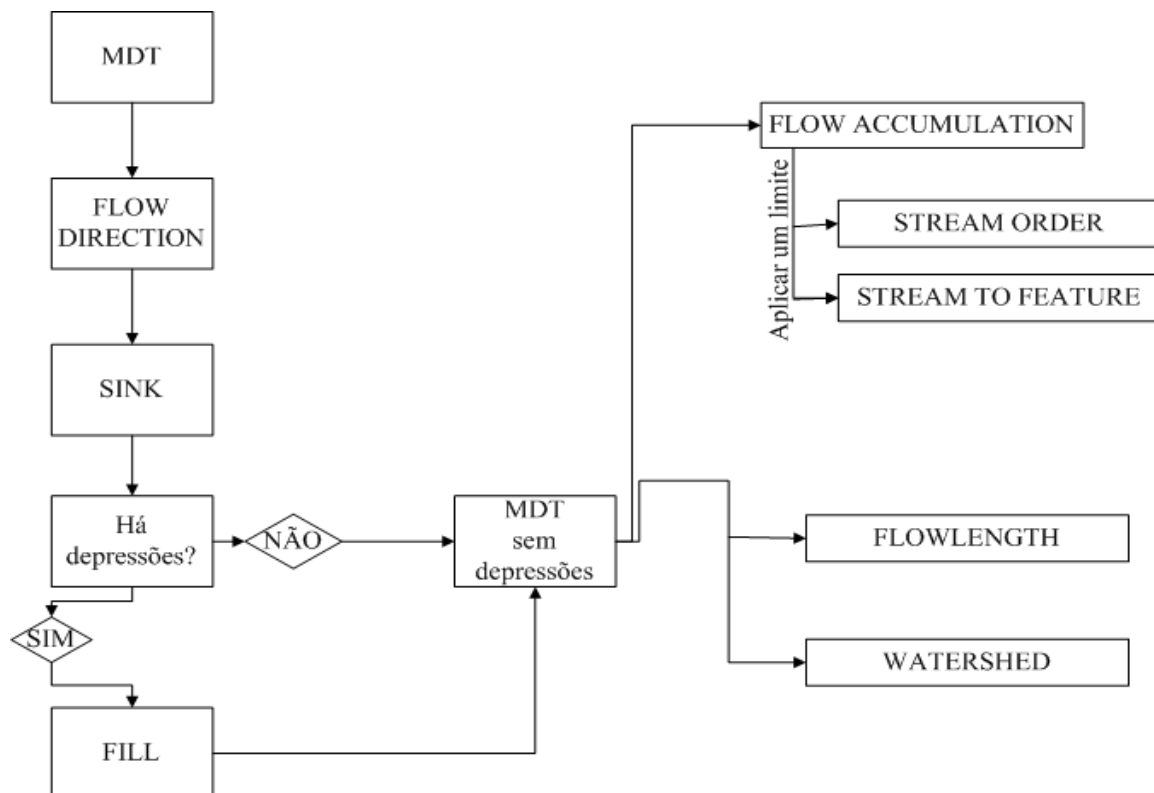


Figura 6: Fluxograma de ferramentas hidrológicas de superfície utilizadas.

A partir do MDT previamente gerado na pesquisa, utilizou-se a ferramenta FLOW DIRECTION, obtendo-se um raster contendo a direção preferencial de fluxo para cada célula. Esta superfície gerada podia conter depressões que podem implicar em resultado errôneo do fluxo. Para localizar estas possíveis depressões utilizou-se a ferramenta SINK, que utiliza a superfície de direção de fluxo e retorna um raster com as depressões existentes.

Em seguida, foi necessário preencher as depressões identificadas. Estas depressões podem ser totalmente preenchidas ou pode-se estabelecer um limite de preenchimento. É importante ressaltar que podem existir depressões legítimas do local, sendo importante entender a morfologia para diferenciar erros de depressões reais.

Para preencher as depressões utilizou-se a ferramenta FILL, que usa de entrada a superfície a ser preenchida (MDT) e opcionalmente um limite de preenchimento, e gera um raster com as depressões preenchidas. Quando uma depressão é preenchida, as fronteiras da área preenchida podem criar uma nova depressão, que precisará ser também preenchida,

tornando este processo iterativo. Para calcular tal limite citado utilizou-se a ferramenta SINGLE OUTPUT MAP ALGEBRA de cálculo do ArcGIS 9.1. Neste caso, obtiveram-se resultados semelhantes para os dois métodos utilizados (com e sem definição de limite).

Com relação ao limite de preenchimento citado, há duas maneiras de defini-lo: deixar o preenchimento padrão, que consiste em preencher todas as depressões encontradas; ou determinar um z-limite apropriado, calculando a profundidade de uma depressão ou de um grupo de depressões, levando em consideração os erros que podem existir, determinando quais depressões são legítimas. A seguir, os passos seguidos para obter este z-limite:

1. Foi criado um raster de depressões utilizando a ferramenta “SINK”, como já descrito anteriormente;
2. Utilizou-se a função “WATERSHED” (que será descrita mais detalhadamente em outro item) para criar um raster de área de contribuição para cada depressão;
3. Utilizando a ferramenta “MAP ALGEBRA” criou-se um raster contendo a mínima elevação de cada depressão na bacia, inserindo-se a seguinte expressão:

$$\text{sink_min} = \text{zonalmin}(\text{sink_areas}, \text{elevation}) \quad (9)$$

Onde, sink_areas representa o raster criado pela função “WATERSHED”;

4. Novamente, utilizando a ferramenta “MAP ALGEBRA” criou-se um raster contendo a máxima elevação de cada depressão na bacia, inserindo-se a seguinte expressão:

$$\text{sink_max} = \text{zonalfill}(\text{sink_areas}, \text{elevation}); \quad (10)$$

5. Finalmente, utilizando a ferramenta “Map ALGEBRA”, subtraiu-se o mínimo valor do máximo, e encontrou-se a profundidade, utilizando-se a seguinte expressão:

$$\text{sink_depth} = \text{sink_max} - \text{sink_min} \quad (11)$$

É este raster contendo a profundidade que foi utilizado como z-limite apropriado.

A partir do MDT preenchido, gerou-se novamente um raster contendo a direção do fluxo de cada célula. Então, a partir deste novo fluxo de direção, utilizou-se a ferramenta

FLOW ACCUMULATION para gerar um raster contendo o fluxo acumulado de cada célula, ou seja, o número de células que escoam para dentro de cada célula.

Possuindo o raster do fluxo acumulado tornaram-se possíveis análises para o sistema de drenagem, porém, para realizar essa delimitação automática do sistema de drenagem, é necessário, contudo, que seja aplicado um valor limite para os resultados do fluxo acumulado, ou seja, é necessário que se defina um valor a partir de quantas células fluindo para um mesmo ponto caracteriza-se um canal de drenagem. Esta definição deve ser realizada baseada em algum critério para que o resultado obtido se aproxime do comportamento real de campo. Tendo definido o critério a ser utilizado o seguinte procedimento deve ser realizado para gerar o sistema de drenagem.

Aplica-se o valor limite definido utilizando-se a ferramenta “MAP ALGEBRA” na seguinte expressão:

$$\text{streamnet} = \text{setnull}(\text{flowacc} < 100, 1) \quad (12)$$

Neste exemplo, todas as células com valores de fluxo acumulado superiores a 100 receberão valor um, todas as células restantes serão definidas como “NoData”. Dessa forma, será gerado o raster de um sistema de drenagem, contendo apenas as células com mais de 100 células fluindo para dentro.

Tendo definido o limite de contribuição, obteve-se o sistema de drenagem e aplicaram-se as seguintes ferramentas: STREAM ORDER que permitiu encontrar a ordem da drenagem; e STREAM TO FEATURE que converteu as drenagens para o formato vetorial.

Aplicou-se também a ferramenta FLOWLENGTH que utilizou o raster do sistema de drenagem gerado para calcular o comprimento da respectiva drenagem. Finalmente, aplicou-se a ferramenta WATERSHED para delimitar bacias a partir de pontos de interesse (exutórios) inseridos, também se utilizou uma ferramenta adicional BASIN que também gera bacias (apenas utilizando o raster de direção de fluxo) para comparar os resultados.

5.2. Aplicação das Ferramentas Hidrológicas de Subsuperfície

A primeira etapa da pesquisa (ferramentas hidrológicas de superfície) possibilitou a seleção de uma área de interesse para aplicação das ferramentas hidrológicas de subsuperfície. Selecionou-se um trecho da área urbana no extremo nordeste do município de João Pessoa, incluindo segmentos das bacias hidrográficas do Rio Jaguaribe e Costeira. Foram escolhidas 26 sondagens à percussão realizadas durante o período chuvoso da área de estudo, para que os valores de profundidade de nível d'água obtidos nestas sondagens refletissem a mesma condição pluviométrica, de forma a gerar uma superfície condizente com a realidade. Vale ressaltar que todas as modelagens aplicadas consideraram apenas o aquífero livre, em função das profundidades de nível d'água obtidas pelas sondagens a percussão.

O ANEXO 3 mostra essa área contendo os furos de sondagem, bem como as formações geológicas do local. As ferramentas hidrológicas de subsuperfície previamente descritas puderam, então, ser aplicadas gerando resultados que permitiram visualizar a dinâmica do fluxo de água subterrâneo (na zona saturada). A execução das ferramentas seguiu o seguinte fluxograma:

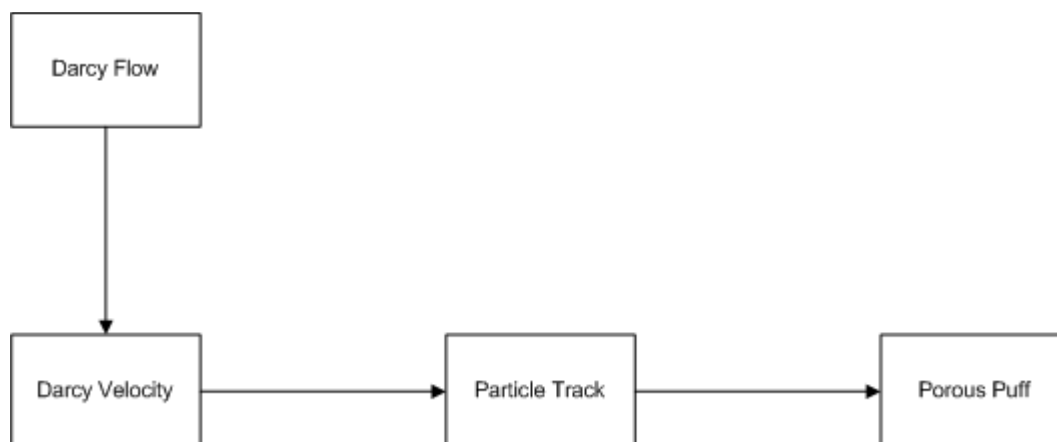


Figura 7: Fluxograma das ferramentas de subsuperfície utilizadas.

Primeiramente, foi necessário gerar um raster contendo a superfície freática, um contendo valores da espessura saturada, um com valores de porosidade efetiva e outro com valores da transmissividade do aquífero (todos os rasters de entrada devem ter o mesmo tamanho de célula). Estas são as entradas para utilização da primeira ferramenta Darcy FLOW, que calcula o balanço do volume residual para cada célula. A ferramenta considera um fluxo constante dentro do aquífero a ser modelado.

Em seguida, aplicou-se a ferramenta Darcy VELOCITY, que utiliza as mesmas entradas da ferramenta descrita anteriormente e retorna os grids contendo a direção e magnitude do fluxo. Estes dois resultados foram combinados para gerar o campo de vetores de fluxo.

O passo seguinte foi inserir pontos de interesse na área para simular a trajetória que uma partícula saindo destes pontos descreveria. Para isso foi utilizada a ferramenta PARTICLE TRACK que recebeu como entrada os rasters de magnitude e direção de fluxo gerados anteriormente, além das coordenadas espaciais do ponto de interesse, neste caso, foram inseridos dois pontos. O algoritmo da ferramenta utiliza-se um esquema previsor-corretor para prever a posição futura de uma partícula baseado no campo local de velocidade de fluxo, interpolado do centro da célula mais próxima. Opcionalmente, gerou-se um polígono contendo a trajetória descrita pela partícula. Para utilizar essa ferramenta foi necessário alocarem-se pontos de interesse, a partir dos quais foi determinado o caminho da partícula.

Finalmente, aplicou-se a ferramenta POROUS PUFF que recebe como entrada o arquivo gerado pela ferramenta PARTICLE TRACK, bem como os rasters de porosidade efetiva e de espessura saturada, além da massa de contaminante introduzida. Essa ferramenta permite traçar a pluma do contaminante em diferentes intervalos de tempo.

A seguir, será mais bem detalhado todo o processo descrito acima além da apresentação e discussão dos resultados obtidos.

6. RESULTADOS

6.1. Modelagem dos Recursos Hídricos Superficiais

6.1.1. Flow Direction

Após ter sido encontrado o limite de preenchimento, foi gerado o MDT sem depressões e a ferramenta “FLOW DIRECTION” foi reaplicada, resultando em um raster de direção de fluxo sem falhas, mostrada (em detalhe) na figura a seguir:

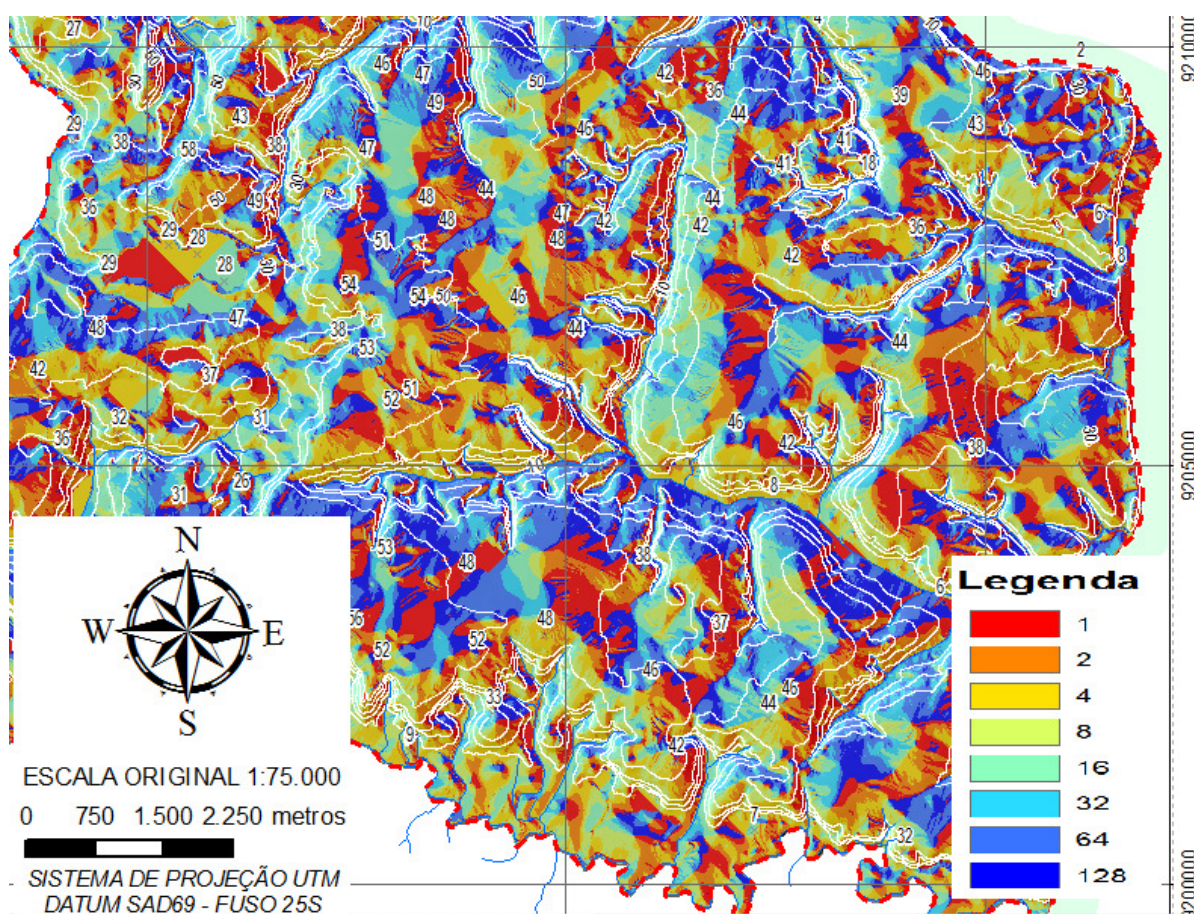


Figura 8: Raster de direção de fluxo com depressões preenchidas.

As duas formas de definição de limite de preenchimento foram utilizadas e notou-se que, neste caso, não houve diferença entre um modo e outro. Tal fato revela que as depressões encontradas pela ferramenta “SINK” eram realmente todas devidas a erros, não sendo encontrada nenhuma depressão legítima da topografia. De fato, a região de estudo é bastante

plana. Contudo, foi imprescindível a aplicação da ferramenta “SINK”, pois foram encontrados vários erros nos dados (depressões) o que resultou em uma sensível diferença entre os raster de fluxo de direção criados com e sem o preenchimento das falhas.

6.1.2. Flow Accumulation

Esta função calcula o fluxo acumulado de cada célula, ou seja, quantas células estão fluindo para dentro de cada célula. Havia uma opção adicional de atribuir um peso para cada célula, que não foi utilizada, neste caso um valor de um foi atribuído a cada célula. Um exemplo de como este peso poderia ser utilizado nesta função seria determinar quanta chuva precipitou dentro da dada bacia. Neste caso, o raster de peso seria um raster contínuo representando a média de precipitação ao longo de uma dada tempestade. O resultado desta função representaria a quantidade de chuva que fluiria para cada célula, assumindo que toda a chuva transforma-se em escoamento e que não ocorre interceptação, evapotranspiração, ou perdas para o solo.

No raster de fluxo acumulado gerado células com valores altos são áreas de concentração de fluxo e podem ser utilizadas para identificação de canais, células com valores de zero são pontos topográficos elevados e podem ser utilizados para identificar divisores de água. O mapa temático gerado para esta ferramenta não ficou muito didático, e por isso nenhuma imagem referente a ele será apresentada.

Foi possível identificar que realmente as regiões que apresentam os valores mais altos de fluxo acumulado, correspondem às regiões onde ocorrem as principais drenagens. Valores intermediários podem indicar caminhos preferenciais de escoamento de água e drenagens intermitentes e os locais onde o valor foi zero constituíam-se nos divisores de água de bacias ou sub-bacias.

Esta ferramenta pode ser utilizada para estudos hidrológicos de uma área, pois permite identificar a dinâmica do fluxo superficial, evidenciando pontos de acúmulo de água bem como os divisores. Além disso, esta ferramenta permite levar em consideração fatores externos que influenciam na dinâmica do escoamento como precipitações, se for necessário que um estudo mais detalhado e preciso seja realizado.

Este resultado foi de suma importância para dar início às análises de fluxos de drenagem da área de estudo, pois foi aplicado na definição da rede de drenagem mais adequada à escala. O procedimento para esta delimitação será descrito detalhadamente no tópico a seguir.

6.1.3. Stream Network

Existem vários critérios que vem sendo utilizados para definição do valor limitante para definição do sistema de drenagem, alguns destes critérios foram apresentados na revisão bibliográfica. Neste trabalho foi selecionado o método padrão de avaliar a área de contribuição e comprimento de drenagem resultante. Foram selecionadas duas áreas de contribuição coerentes com a escala para verificar os resultados e compará-los, são elas 1 ha e 10 ha. Aplicando este método, conhecendo o tamanho da célula, igual a 4 m, obtiveram-se valores limites de 625 e 6250 para as áreas de 1 ha e 10 ha, respectivamente. Aplicando-se estes valores na expressão (12), obtiveram-se duas redes de drenagem distintas que foram comparadas entre si e com a drenagem digitalizada, ilustrado na figura a seguir:

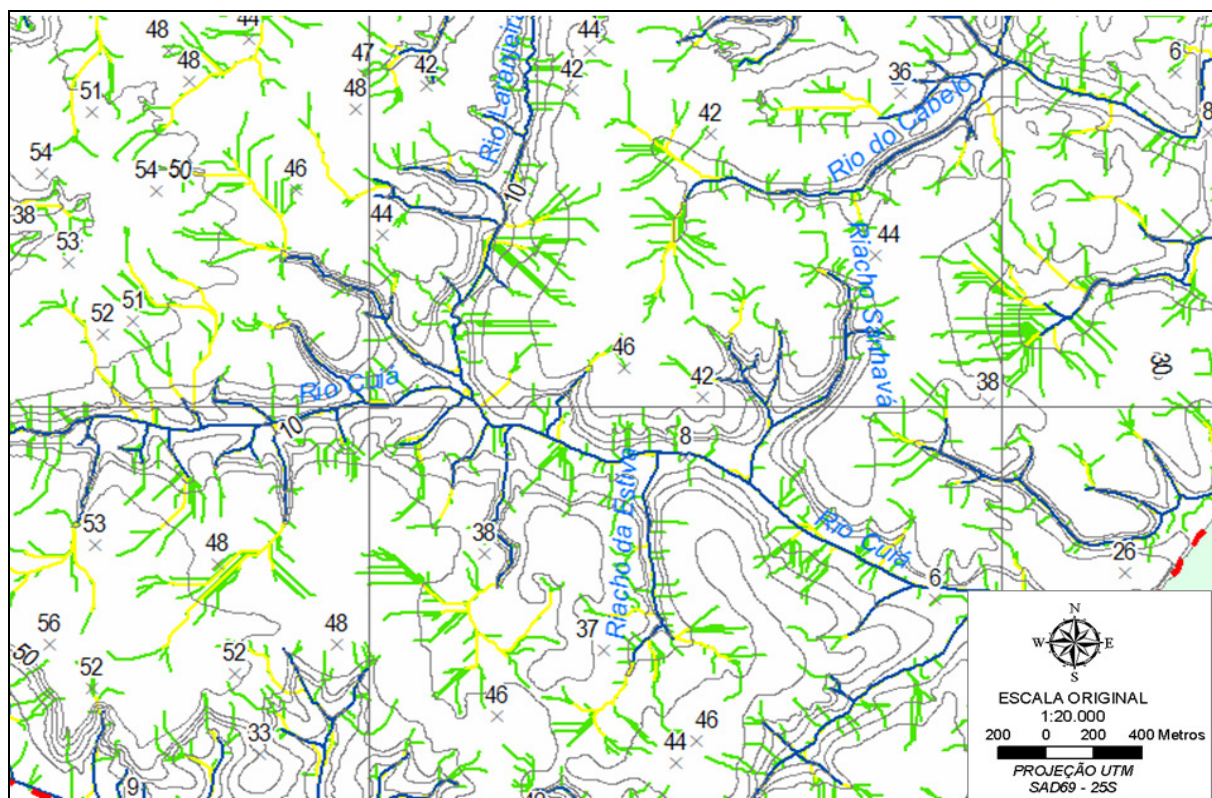


Figura 9: Comparação entre as diferentes redes de drenagem criadas.

Na figura 9, (um recorte do mapa para facilitar a visualização) os canais azuis representam a drenagem digitalizada, os amarelos representam a drenagem gerada para uma área de contribuição de 10 ha e os verdes para uma área de 1 ha. Nota-se que para uma área de contribuição menor exigida, a densidade de drenagem será maior. Além disso, as drenagens geradas pela ferramenta apresentaram comportamento muito semelhante ao da drenagem digitalizada, apenas possuindo maior densidade de drenagem. Um motivo para esta densidade ser maior na rede de drenagem gerada é o fato de esta considerar drenagens que não são perenes, mas são importantes de serem delimitadas, pois participam e influenciam nos processos hidrológicos de superfície.

Esta ferramenta se mostra importante em estudos hidrológicos e de recursos hídricos, pois permite identificar drenagens que poderiam não ser localizadas no trabalho de campo por serem intermitentes. Contudo, em função da precisão desejada é necessário que seja

selecionado o método de determinação de células de contribuição mais adequado. Além disso, o trabalho de campo é imprescindível para comparação dos resultados.

Além da comparação visual entre as drenagens também foi aplicada a ferramenta que permite calcular a extensão da rede de drenagens, a fim de possibilitar um maior contraste na comparação das diferentes redes de drenagem. Os resultados são apresentados a seguir:

Tabela 2: Comparação entre os comprimentos das diferentes redes de drenagem.

Drenagem	Comprimento total das drenagens (m)
Digitalizada	214225
Área de Contribuição de 10 ha	352809
Área de Contribuição de 1 ha	1184884

Os resultados evidenciam mais claramente a extensão de drenagem que estava sendo ignorada. Portanto, esta ferramenta se mostrou útil na delimitação de drenagens, permitindo identificar trechos de canais importantes que poderiam estar sendo ignorados na drenagem digitalizada.

Após estas análises de extensão e densidade de drenagem, foi realizada a determinação da ordem da drenagem, que é um método de designar uma ordem numérica para os canais de uma rede de drenagem. Esta ordenação é um método para identificar e classificar tipos de canais baseado em seus tributários. A função que realiza esta operação é a “STREAM ORDER”, e pode utilizar dois métodos para isso: o proposto por Strahler e o proposto por Shreve. Por ser mais comumente utilizado, o método de Strahler foi utilizado nesta pesquisa.

O resultado obtido foi para a rede de drenagem gerada considerando uma área de contribuição de 10 ha, uma ordem final 4 e para aquela que considerou uma área de contribuição de 1 ha, uma ordem final 6. Este resultado encontra-se dentro do esperado, pois

uma vez que a drenagem que utilizou uma área de 1 ha considera um maior número de canais é natural que apresente uma ordem final maior, pois apresenta um maior número de tributários. A seguir, figura 9 ilustrando as diferenças de ordem para as duas redes de drenagem:

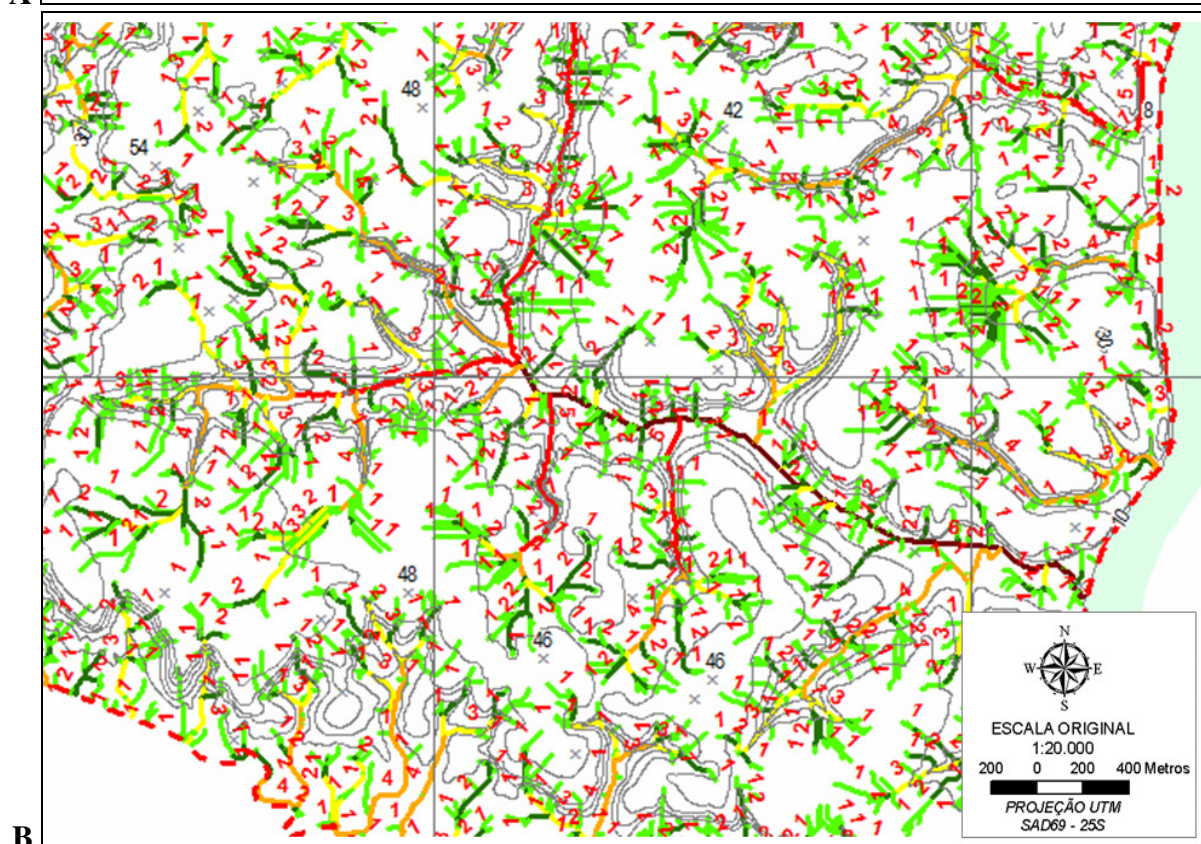
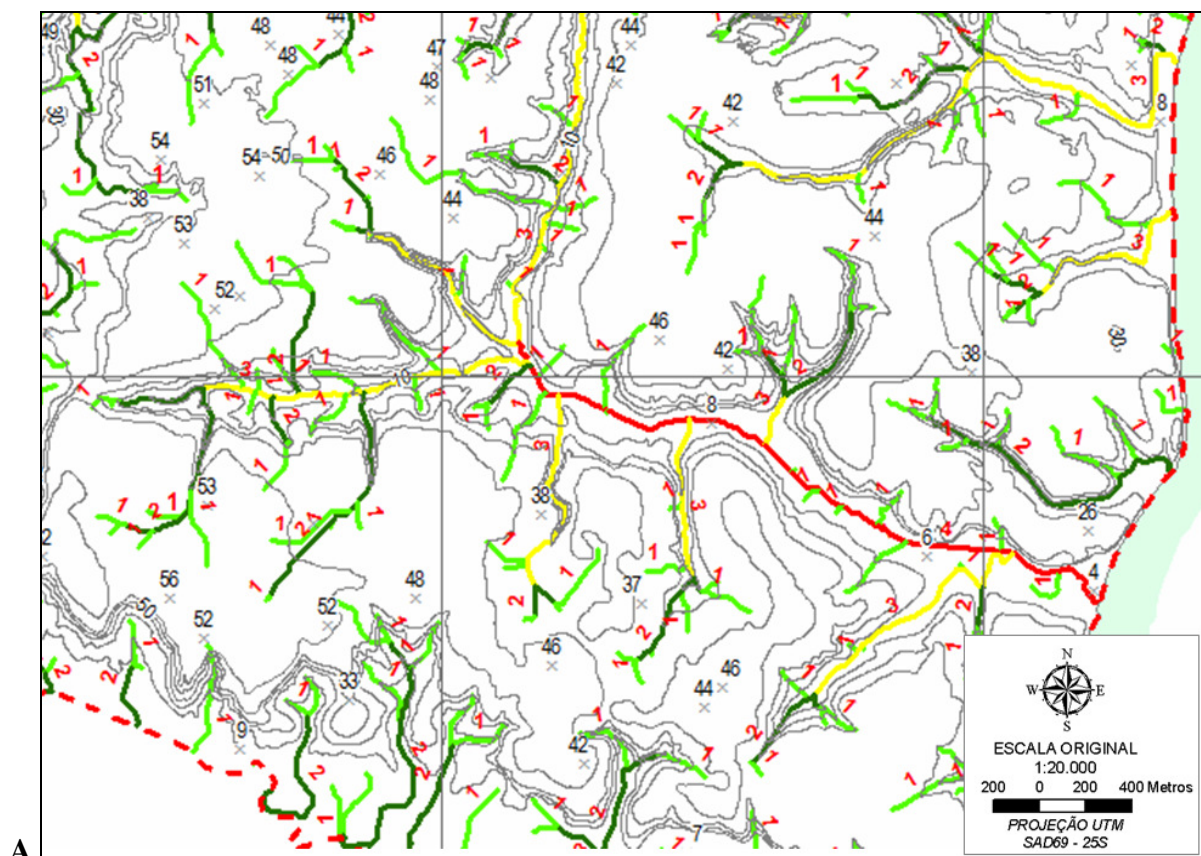


Figura 10: Comparação entre as ordens das redes de drenagem.

6.1.4. Watershed

Esta ferramenta foi implementada utilizando-se o raster que continha a direção de fluxo, previamente gerado, além disso, também foram adicionados três pontos de interesse (exutório). Estes pontos foram definidos nas saídas das três principais bacias identificadas visualmente na área. Durante o processo, foi necessário tomar alguns cuidados como o de garantir que os pontos de exutório alocados estivessem localizados exatamente em cima da rede de drenagem, para garantir que a área contribuinte esteja realmente relacionada às drenagens. A seguir uma figura ilustrando o resultado obtido para dois pontos de exutório selecionados.

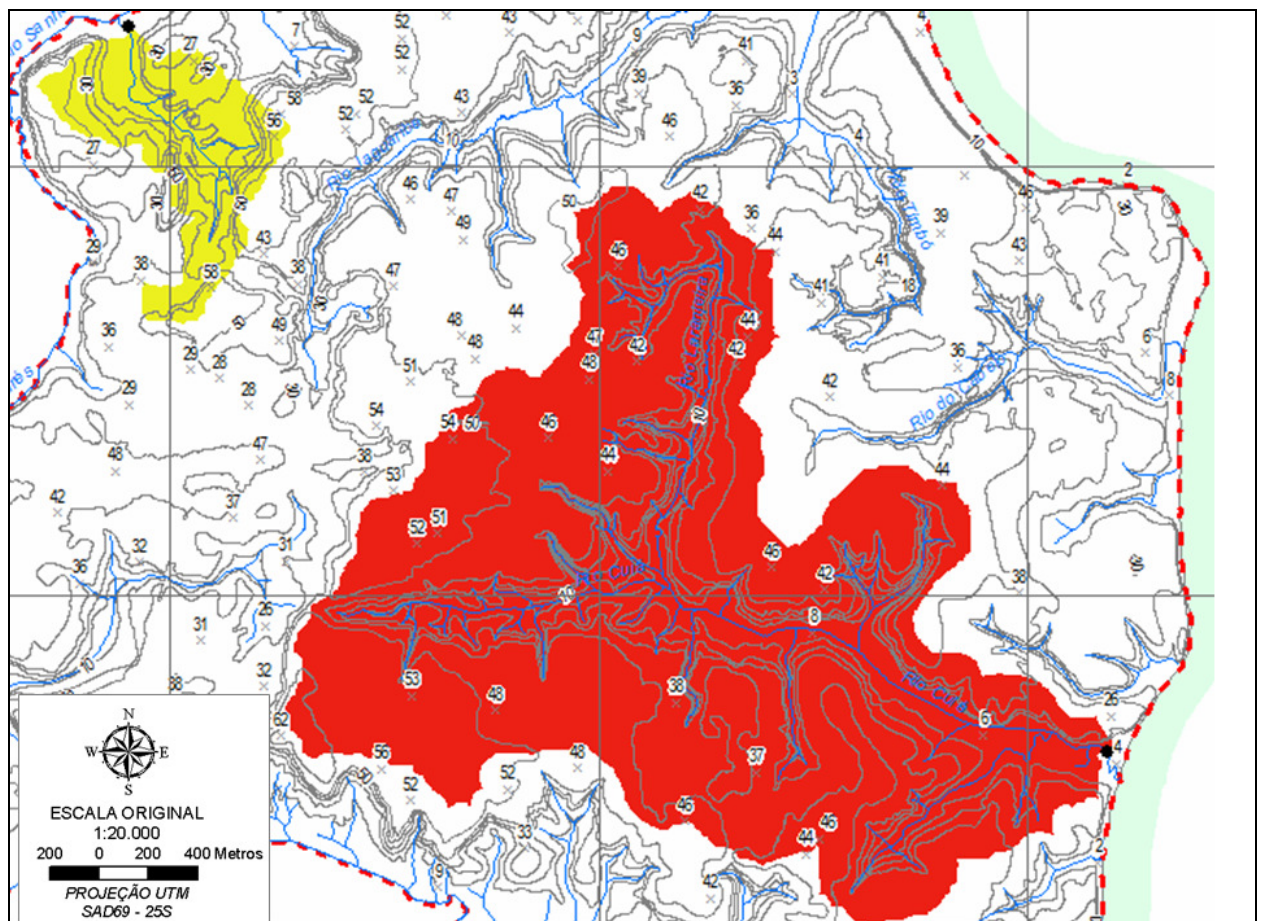


Figura 11: Bacias Hidrográficas geradas a partir de exutórios definidos.

Estes resultados mostram que esta ferramenta pode ser utilizada para uma melhor gestão de bacias, pois permite, a partir da alocação de um exutório de interesse, a identificação de toda a área de contribuição deste exutório. Tendo sido esta área determinada é possível aplicar conhecimentos de diversas áreas para obterem-se informações de interesse desta sub-bacia. Um exemplo seria obter a vazão de escoamento superficial ou o tempo de concentração da sub-bacia em questão, aplicando algum método da hidrologia, como o método racional.

6.1.5. Basin

A ferramenta “BASIN” é uma forma alternativa de delimitar bacias hidrográficas, ela exerce essa função pela identificação de linhas divisoras entre bacias. “Basin” analisa o raster de fluxo de direção para encontrar todos os conjuntos de células conectadas que pertencem à mesma bacia de drenagem. As bacias são criadas localizando os pontos de exutório nas extremidades da janela de análise (onde a água escoaria para fora do raster), assim como as depressões. Então identifica as áreas de contribuição sobre cada ponto de exutório, resultando num raster com bacias (e sub-bacias) de drenagem.

Esta ferramenta apenas necessitou do raster de direção de fluxo como entrada e gerou um raster bem condizente com a realidade. De fato, se comparado com as bacias geradas pela outra ferramenta, percebe-se que para os canais de drenagem em questão as bacias ficaram parecidas, a diferença é que a ferramenta “WATERSHED” gera bacias a partir de pontos de interesse. Já a ferramenta “BASIN” gera bacias para toda a área e permite a classificação do seu resultado de acordo com o interesse, por exemplo, se for desejável verificar a existência de sub-bacias menores, basta aumentar o número de classes do tema, se for importante ter uma visão mais ampla de bacias maiores, basta diminuir o número de classes.

Para fins de comparação foram gerados dois conjuntos de bacias. Um contendo apenas seis bacias maiores, e outro incluindo vinte bacias e sub-bacias. A seguir, será apresentado um recorte dos mapas gerados para comparação dos resultados (Figuras 12 e 13). Além dessa figura, também se encontra em anexo o mapa contendo seis bacias maiores no tamanho (ANEXO 2) a fim de ser comparado com o mapa gerado pela ferramenta “WATERSHED”.

Nota-se que à medida que aumentaram o número de classes aumentou o nível de detalhamento das bacias, e sub-bacias que não foram representadas no mapa com seis classes surgem na representação com vinte classes. Esta ferramenta é importante, pois permite gerar rapidamente bacias que se aproximam da realidade, necessitando para isso apenas do raster com a direção de fluxo.

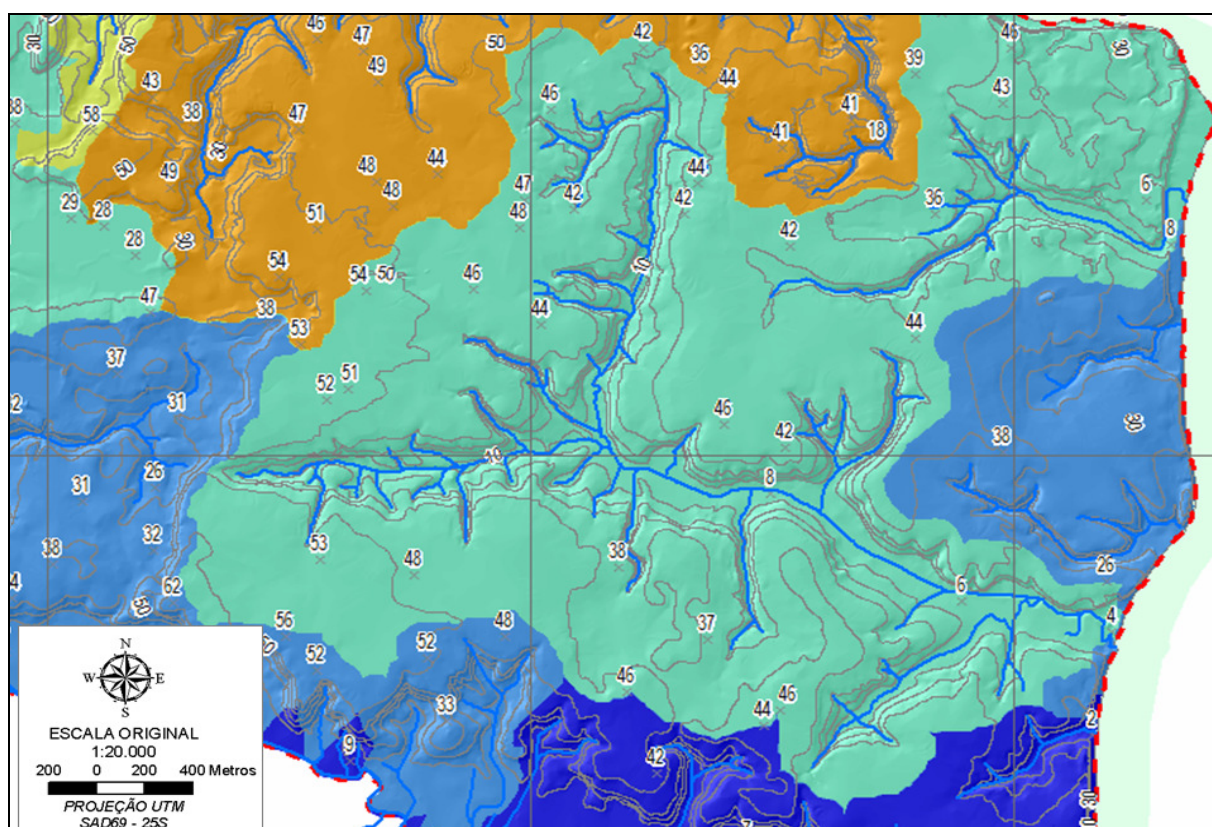


Figura 12: Mapa gerado pela ferramenta “Basin” com 6 classes.

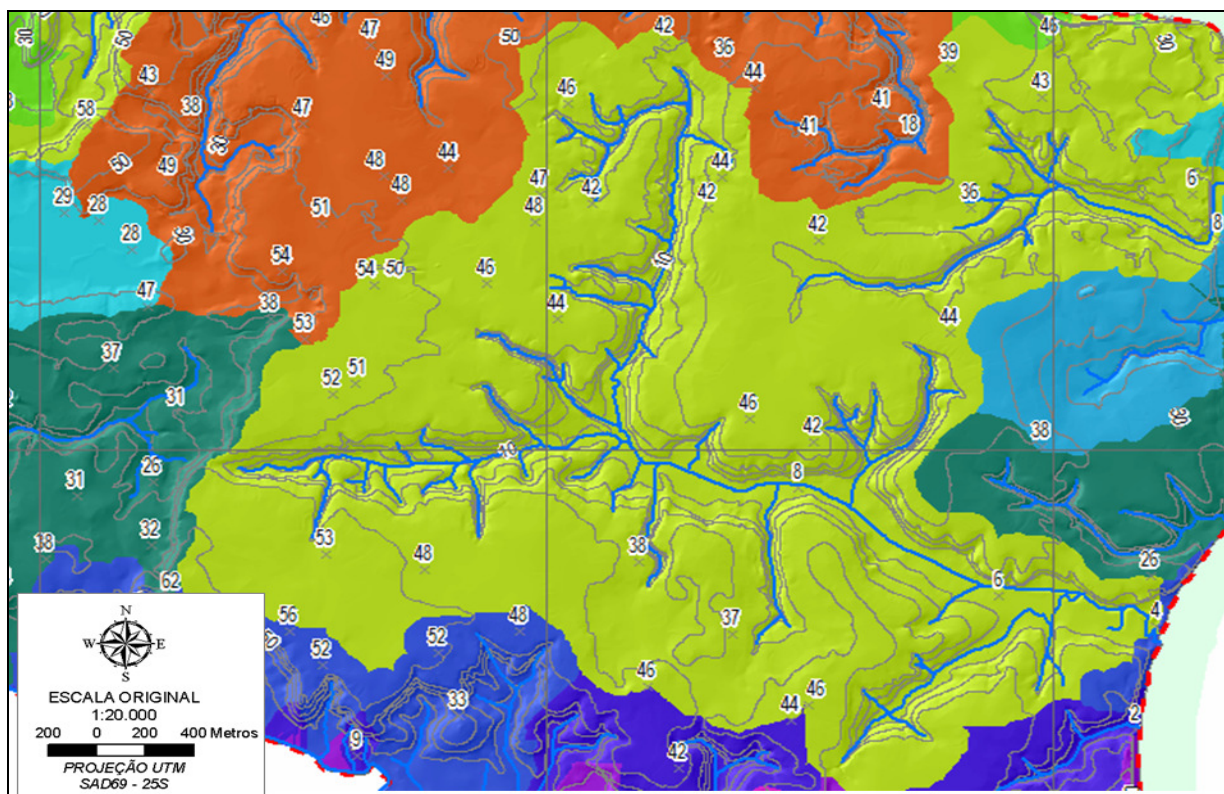


Figura 13: Mapa gerado pela ferramenta “Basin” com 20 classes.

6.2. Modelagem dos Recursos Hídricos de Subsuperfície

6.2.1. Darcy Flow

Para gerar o raster da superfície freática foram utilizados os dados de nível de água subterrânea de furos de sondagem. A partir dos valores de nível d’água de alguns furos de sondagem existentes na área de interesse (delimitada na etapa anterior da pesquisa), foi possível interpolar uma superfície freática utilizando a ferramenta existente chamada TOPO TO RASTER. O processo é semelhante ao da geração de um MDT, a partir da interpolação de cotas conhecidas. O resultado obtido é exibido no ANEXO 4.

Analisando a imagem, pode-se notar que o resultado está dentro do esperado, com as cotas mais altas do nível freático coincidindo, aproximadamente, com as cotas mais altas do terreno. Para verificar a consistência do resultado, além da análise visual também foi feita uma subtração entre o MDT e a superfície gerada utilizando a ferramenta SINGLE MAP

ALGEBRA. Valores negativos representam pontos que o nível d'água encontra-se acima do terreno, isso só deveria ocorrer nas drenagens. De fato, o resultado, exibido na figura 14, evidenciou que resultados negativos até valores próximos a 1 (pintados de cinza e rosa, respectivamente) ocorrem nas proximidades das drenagens, indicando um resultado consistente com a realidade.

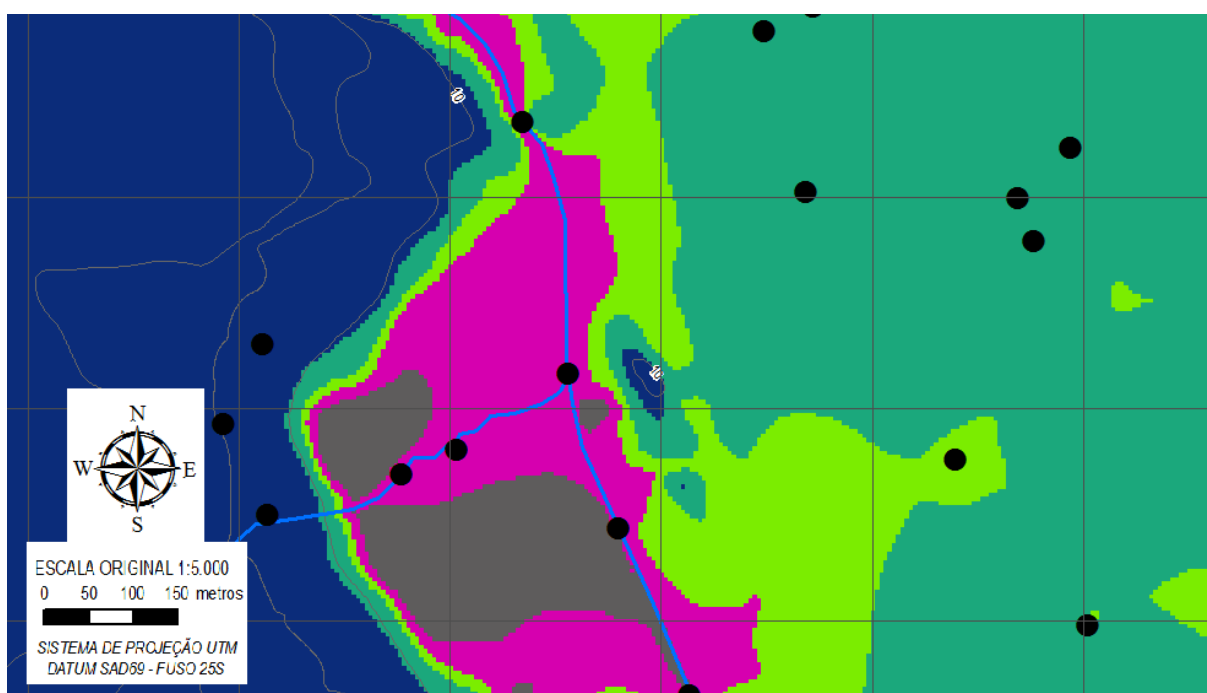


Figura 14: Diferença entre o MDT e a superfície freática.

Para gerar os rasters contendo valores de espessura saturada, porosidade efetiva e transmissividade, foi necessário consultar a bibliografia para encontrar valores adequados para a formação que se encontra na área. São elas: a Formação Barreiras e a Formação de Depósitos Quaternários descritos anteriormente. Os parâmetros de interesse acima citados foram encontrados na mesma bibliografia utilizada no item de descrição das unidades. Os valores adotados desses parâmetros foram sintetizados, conforme mostra a tabela a seguir:

Tabela 3: Valores máximos, médios e mínimos dos parâmetros de entrada.

Formação	Espessura Saturada (m)	Porosidade Efetiva %	Transmissividade (m ² /s)
Barreiras	84	5	0,0046
Barreiras	73	5	0,00396
Barreiras	62	5	0,0017
Depósitos Quaternários	80	10	0,0316
Depósitos Quaternários	50	10	0,007
Depósitos Quaternários	20	10	0,000019

Fonte: Adaptado de MONTEIRO 2002.

Nota-se que foram utilizados valores médios, mínimos e máximos encontrados na bibliografia a fim de permitir uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes valores. Foi também necessário admitir que esses valores são constantes ao longo de cada unidade geológica. Esses valores foram inseridos na tabela de atributos do tema já existente “unidades geológicas”, e em seguida foi utilizada a ferramenta POLYGON TO RASTER dentro de “Conversion Tools” para criar o raster contendo os valores do parâmetro de interesse. Esse procedimento foi feito para todos os valores exibidos na tabela 3. Criaram-se assim, os rasters necessários de entrada.

Finalmente, foi possível aplicar a ferramenta DARCY FLOW que calculou o volume residual para cada célula. Como os cálculos são executados através de cada uma das quatro paredes da célula independentemente, é possível que mais ou menos água flua para dentro ou fora de uma célula, resultando num valor positivo ou negativo de volume residual. Um raster de entrada consistente, sem poços de bombeamento, infiltrações ou vazamentos devem produzir pequenos residuais, próximos a zero. Altos valores residuais indicam que o raster da superfície freática não está adequado com o respectivo raster de transmissividade,

porosidade e espessura saturada. Se isso ocorrer, os dados de entrada são inconsistentes e produzem resultados sem significado.

Neste caso, o residual obtido foi na maior parte da área próximo a zero conforme ilustra a figura 15. Se comparado aos resultados obtidos por Oliveira e Augusto Filho (2008), os obtidos na presente pesquisa podem ser considerados mais consistentes, pois os valores foram mais uniformes em toda a área (e próximos de zero). Tal fato pode ser justificado pela existência de mais furos de sondagem na área modelada nesta pesquisa, que permitiram a obtenção de mais dados de nível d'água, resultando numa interpolação mais condizente com a realidade.

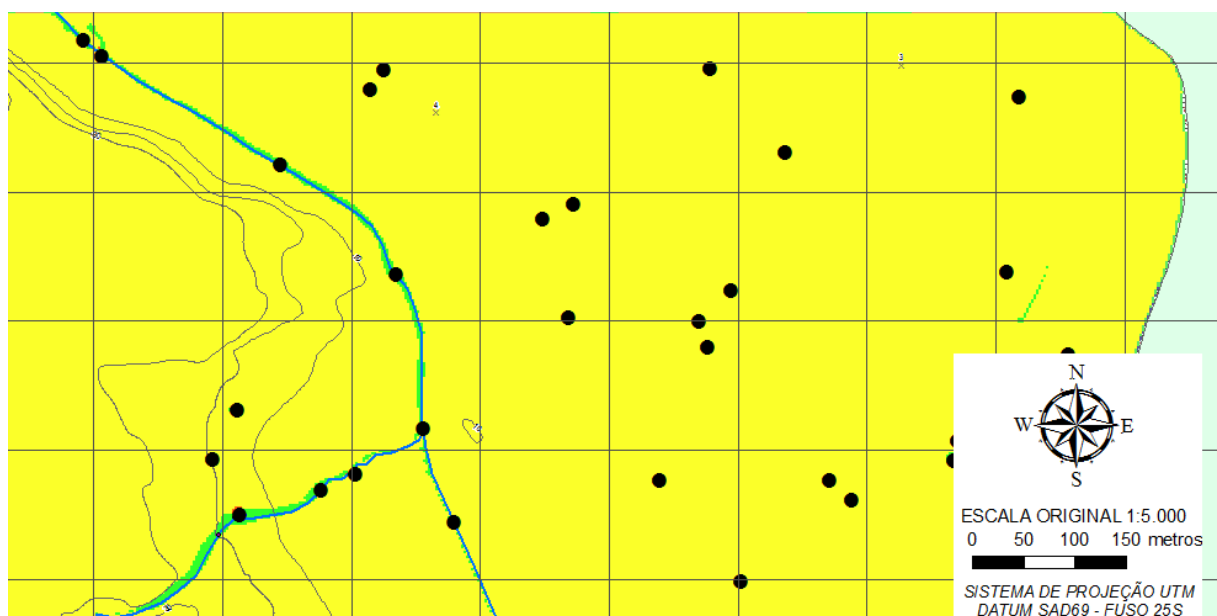


Figura 15: Residual.

Para analisar qualitativamente os resultados de residual obtidos, foi feita uma comparação entre os valores de residual com o valor da vazão que sai de cada pixel, que pode ser obtida através do raster de magnitude de fluxo que foi gerado na ferramenta que será descrita no próximo item. Para obter a vazão que sai de cada pixel basta multiplicar o raster da magnitude pela área de cada pixel (no caso 16 m^2) utilizando para isso a ferramenta

SINGLE MAP ALGEBRA. Utilizando essa mesma ferramenta calculou-se a porcentagem do residual em relação à vazão que sai de cada pixel. O resultado encontra-se no ANEXO 5.

Para facilitar a visualização do resultado, foi utilizada a ferramenta CALCULATE AREAS de modo a obter-se a porcentagem em área de cada faixa de erro. O resultado é mostrado na figura 16. Pode-se observar que predominam valores de erro entre 1 e 5%, e em segundo lugar valores de erro até 1%, sendo que essas duas faixas principais somadas ocupam, aproximadamente 70% da área total. Esse resultado mostra que o erro foi baixo, e portanto, o resultado pode ser considerado consistente, confirmando o que havia sido suposto em função dos valores de residual serem próximos a zero.

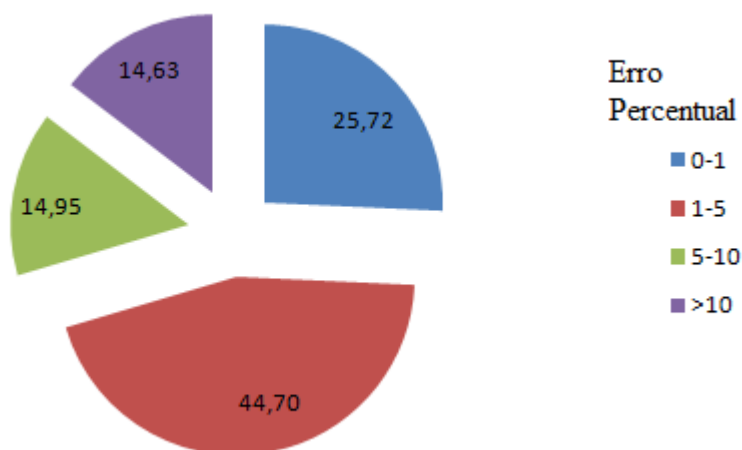


Figura 16: Comparação entre as áreas de cada faixa de erro percentual.

Esta ferramenta permite indicar o balanço hídrico da água subterrânea e com isso permite identificar se está ocorrendo acúmulo ou retirada de água em determinada região. Se isso for verificado, pode ser um indício de que algum evento pode estar causando um desequilíbrio no balanço hídrico do local e serve como base para que estudos mais detalhados possam ser realizados.

6.2.2. Darcy Velocity

O fluxo de velocidades é representado por dois rasters, um de magnitude e outro de direção. Estes dois rasters são os resultados desta ferramenta.

A fim de melhorar a visualização dos resultados os rasters de magnitude, que pode ser entendido como vazão específica (em m/s), e de direção (de 0 a 360°) foram combinados, gerando um campo de vetores onde o tamanho do vetor indica a magnitude e sua angulação indica a direção de escoamento. Para isso, foi criado um tema de pontos ao longo de toda a área, e para este tema foram extraídos os valores da direção e magnitude. Dessa forma, foi possível reclassificar a legenda de forma a obter o resultado mostrado a seguir:

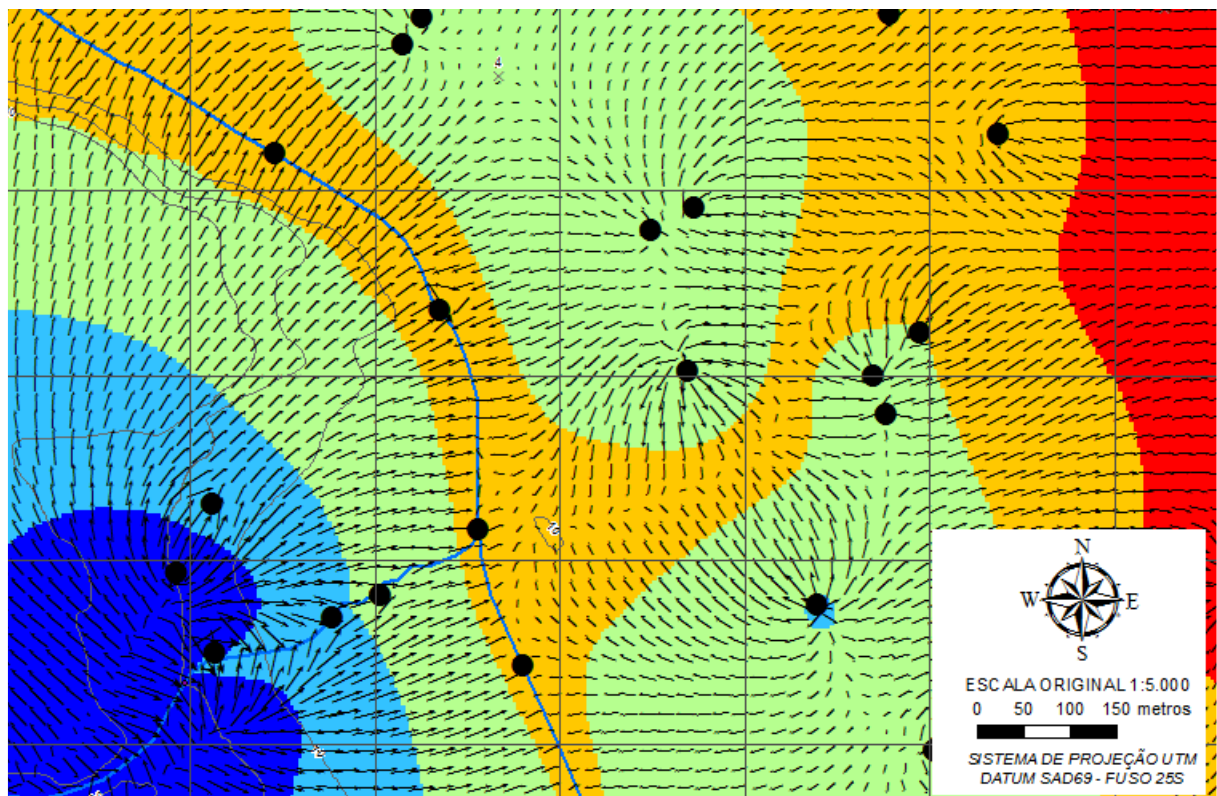


Figura 17: Resultado dos grids magnitude e direção combinados.

Os valores de entrada que produziram melhor resultado foram os valores médios, apresentados na tabela 3. De fato, analisando-se o ANEXO 6 (representando os resultados obtidos utilizando os valores médios), verifica-se que este resultado é adequado para a área, com os fluxos se dirigindo dos divisores (áreas de recarga) para as drenagens

(áreas de descarga), apresentando maior magnitude em áreas de maior declividade, que possuem maior gradiente hidráulico, conforme o esperado. Novamente, comparando-se estes resultados com os de Oliveira e Augusto Filho (2008), nesta pesquisa foram obtidos valores na faixa de 0,01 a 10 m/dia enquanto que na outra os valores encontraram-se na faixa de 0,001 a 0,1 m/dia. Isso ocorre, pois o material em que se encontra o aquífero desta pesquisa é muito mais arenoso do que o da outra pesquisa, e por isso, apresenta valores muito maiores de transmissividade e porosidade, o que favorece o fluxo de água subterrânea.

Esta ferramenta pode ser aplicada em estudos hidrológicos preliminares, pois permite que se obtenha uma noção da dinâmica da água subterrânea identificando o fluxo da água e serve como base para aplicação das próximas ferramentas que detalham melhor essa dinâmica.

6.2.3. Particle Track

A ferramenta retorna um arquivo texto com a posição da partícula em diferentes intervalos de tempo. Foi também gerado o traçado mostrando o caminho de cada partícula de forma a facilitar a visualização, este traçado é exibido na figura a seguir:

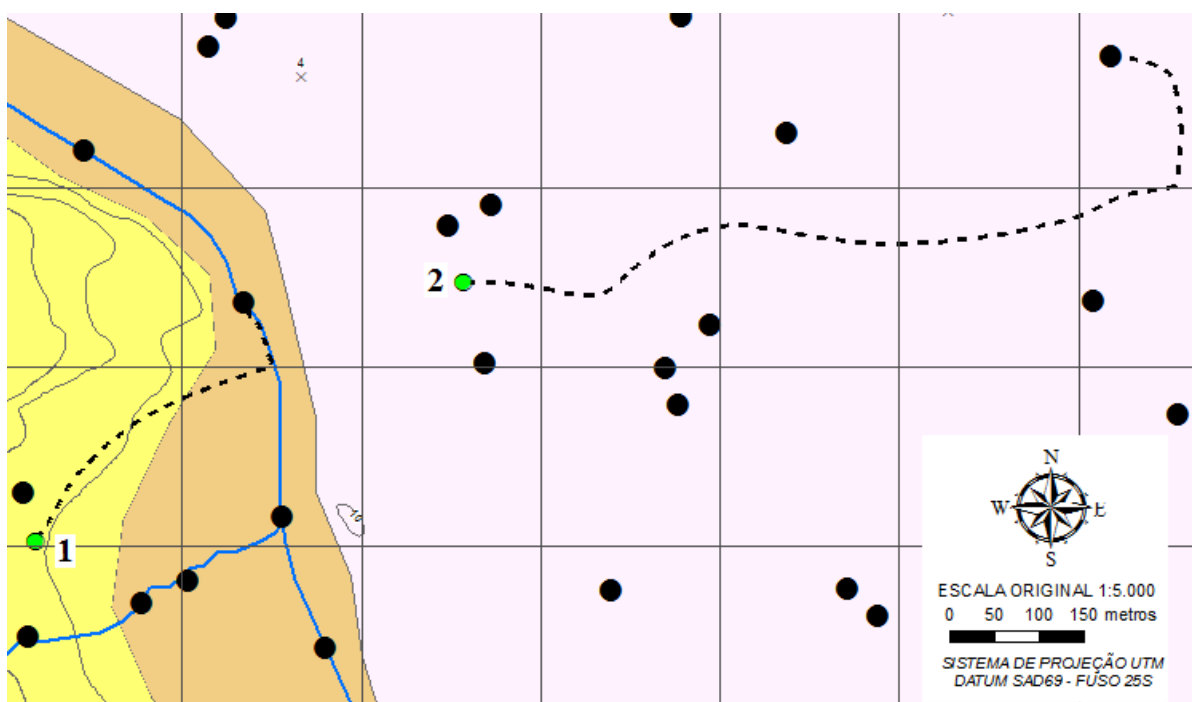


Figura 18: Trajetória de duas partículas.

Pode-se observar que o caminho descrito pelas partículas segue a tendência do campo de fluxo (mostrado em anexo, citado anteriormente), sendo que uma das partículas caminha até atingir a drenagem (ponto 1), enquanto a outra descreve um caminho maior (ponto 2) até chegar num ponto onde os valores de magnitude de fluxo são muito pequenos. Os tempos de percurso total de cada partícula são, aproximadamente, 17,7 e 2,8 anos para as partículas 2 e 1, respectivamente.

Estes podem ser considerados valores baixos, que se justificam pelo fato do aquífero apresentar valores altos de magnitude de fluxo de água. Tal fato pode resultar, no caso de um vazamento de um poluente, que o mesmo se desloque rapidamente, contaminando grandes áreas em pouco tempo. Este fenômeno foi mais bem avaliado pela próxima ferramenta.

6.2.4. Porous Puff

Para realizar uma simulação de contaminação por vazamento foram considerados os pontos 1 e 2 (utilizados na ferramenta PARTICLE TRACK) como pontos de vazamento. A ferramenta POROUS PUFF permite calcular a dispersão em massa de um soluto introduzido no aquífero, assume que o aquífero é misturado verticalmente, ou seja, a concentração é a mesma pela seção vertical. O que permite a aplicação do modelo matemático de dispersão (descrito anteriormente).

Os parâmetros de entrada dessa ferramenta são: porosidade do meio, espessura saturada e caminho da partícula (obtidas anteriormente); quantidade do poluente derramado instantaneamente (foi considerado um valor de contaminante dissolvido igual a 1000 kg); e tempo de dispersão (dever ser menor ou igual ao máximo tempo da trajetória da partícula, foram feitas três modelagens, uma com 1 mês, outra com 6 meses e outra com 2 anos, para o ponto 1; e uma com 6 meses, outra com 2,5 anos e outra com 15 anos, para o ponto 2). Outros parâmetros opcionais como dispersividade longitudinal, razão de dispersividade, fator de

retardamento e coeficiente de decaimento, foram considerados os valores padrões indicados pela própria ferramenta.

O resultado desta modelagem pode ser visto no ANEXO 7, por terem sido utilizados três tempos de dispersão, a visualização do deslocamento da pluma ficou facilitada. Verificou-se que as plumas se deslocam rapidamente pelo aquífero, principalmente na área de Depósitos Quaternários pela característica do meio ter elevada porosidade. As plumas apresentam forma elíptica com eixo centrado na trajetória da partícula, isso justifica o fato da pluma mudar de sentido de dispersão nos locais onde havia mudança de sentido da trajetória. A pluma que sai do ponto 1 percorre um caminho menor, pois o gradiente hidráulico é maior na região em que se encontra, além de existir a drenagem relativamente próxima ao ponto. Já a pluma que se desloca a partir do ponto 2, percorre um caminho maior e, conseqüentemente, demora um maior tempo para atingir seu ponto final.

Este tipo de modelagem é importante, pois permite predizer o comportamento de uma pluma de contaminantes na área, permitindo que no caso de um vazamento ações mitigadoras sejam tomadas para evitar-se ao máximo a dispersão do contaminante.

As duas últimas ferramentas descritas podem servir de grande auxílio nas áreas de recuperação de áreas degradadas e remediação de áreas contaminadas, pois os dados podem ser trabalhados de forma que resultados de interesse sejam obtidos para decidir se é necessário ou não intervir numa área de estudo e qual a emergência desta intervenção, no caso de deslocamento rápido de contaminantes.

6.3. Análise dos Resultados

Na primeira fase da pesquisa foram realizados o treinamento e ensaios de aplicação de todas as ferramentas de modelagem e de análise das águas de superfície. As ferramentas FLOW DIRECTION, FLOW ACCUMULATION, STREAM NETWORK, WATERSHED e

BASIN se mostraram bastante úteis tanto no tratamento como na hierarquização automática dos canais de drenagem, bem como, na delimitação e na análise de bacias hidrográficas.

A ferramenta FLOW ACCUMULATION permitiu a identificação de regiões com maior ou menor fluxo acumulado dentro da área de estudo. Possibilitando a diferenciação entre pontos de drenagem, divisores de água e caminhos preferenciais de escoamento. Tal resultado se mostra bastante importante como suporte para previsão da dinâmica de escoamento superficial da região.

A ferramenta STREAM NETWORK realizou a delimitação da rede de drenagens baseada no critério de área de contribuição e comprimento de drenagem, evidenciando trechos de drenagem que haviam sido ignorados na digitalização. Conseqüentemente, resultou-se em uma rede com ordem de drenagem diferente daquela para a rede digitalizada. Esta determinação é importante, pois algumas características dos canais podem ser inferidas por simplesmente saber sua ordem. Por exemplo, canais de primeira ordem são dominados pelo fluxo terrestre de água, eles não possuem nenhum fluxo concentrado a jusante. Por esse motivo, eles são mais susceptíveis a problemas de fontes de poluição não pontuais e podem ser mais beneficiadas por extensas áreas ripárias se comparadas com outras áreas da bacia.

A ferramenta WATERSHED permitiu, a partir da definição de pontos de interesse (exutórios), a definição de bacias hidrográficas. Esta ferramenta apresenta especial interesse para a compreensão da dinâmica de escoamento de bacias e sub-bacias. Em termos práticos, pode ser utilizada quando se deseja saber a extensão da influencia (em termos hidrológicos) de uma ação em um ponto de interesse, por exemplo, delimitar que bacias ou sub-bacias serão afetadas pelo desvio de um canal. No caso, o ponto de interesse seria o local onde o canal seria desviado, e a ferramenta conseguiria delimitar toda a área da bacia ou sub-bacia associada a este ponto que seria afetada.

Já a ferramenta BASIN também permitiu a geração das bacias hidrográficas da área de estudo pela análise de divisores de água. Essa ferramenta se mostrou interessante, pois gerou resultados que se aproximam muito da realidade (fato comprovado pela comparação com o resultado da outra ferramenta, além da própria delimitação visual de bacias). Além disso, a ferramenta permite a divisão em bacias ou sub-bacias apenas mudando a número de classes a ser dividido o tema gerado, o que pode ser muito útil, pois permite que para um mesmo resultado uma análise global (bacias principais) ou mais detalhada (micro-bacias) seja realizada.

Em termos práticos, esta ferramenta permite verificar quantas e quais sub-bacias encontram-se dentro de Bacias Hidrográficas principais, bem como fornecer base para prever a dinâmica da bacia em função de alguma intervenção, em diferentes escalas de observação (mais global, ou mais restrita).

A interpolação do nível freático se mostrou bastante válida, pois foi feita utilizando a ferramenta TOPO TO RASTER, que é uma ferramenta ideal para gerar MDTs hidrologicamente corretos, e, portanto também pode ser considerada válida para este tipo de interpolação que é similar. Além disso, contava-se com a existência de dados de nível freático de 26 furos de sondagem, o que contribui para que a interpolação fosse mais precisa. Além disso, a região selecionada apresenta topografia, predominantemente, plana o que facilitou a interpolação.

De fato, retomando os resultados obtidos verificou-se que a interpolação mostrou-se válida, pois as cotas mais altas do nível freático coincidiram, aproximadamente, com as cotas mais altas do terreno, o que é esperado tratando-se do aquífero livre. Além disso, aquele processo de verificação de consistência do resultado descrito anteriormente (subtração entre o MDT e a superfície gerada) evidenciou valores negativos, ou seja, onde a superfície freática

encontra-se acima da superfície do terreno, praticamente apenas nas drenagens, como era de se esperar.

O residual gerado também se mostrou bastante adequado para a área uma vez que gerou valores, para a maior parte da área, próximos de zero, evidenciando que o balanço de água está correto. Adicionalmente, foi realizada uma análise qualitativa desse residual, desenvolvida por Oliveira e Augusto Filho (2008), que permitiu comparar o valor do residual com a vazão que sai de cada pixel. O resultado foi que na maior parte da área (aproximadamente 70% da área) o valor do residual de um determinado pixel é inferior a 5% da vazão de saída desse pixel, os valores superiores a 5% podem ser considerados elevados.

Como o fluxo de água subterrâneo não é contínuo e constante, pois existem pontos de vazamentos e infiltrações, torna-se impossível obterem-se residuais nulos em 100% da área, tal fato justifica as regiões onde o residual foi superior a 5% da vazão de saída. Em pontos de divisores, são formadas áreas de recarga do aquífero, nesses pontos a infiltração é favorecida, e quando não chove o balanço residual será negativo, com mais água saindo do que entrando. Já em pontos de drenagens, são constituídas áreas de descarga do aquífero, nas quais o aquífero supre as linhas de drenagem, e, conseqüentemente, o balanço será positivo, com mais água entrando do que saindo. Nesses dois casos o valor de residual deverá ser elevado pela própria característica hidrológica, e não por um caso de inconsistência de dados de entrada. A figura 19 ilustra esses casos, com o vermelho representado locais onde o valor do residual de um determinado pixel é superior a 5% da vazão de saída desse pixel.

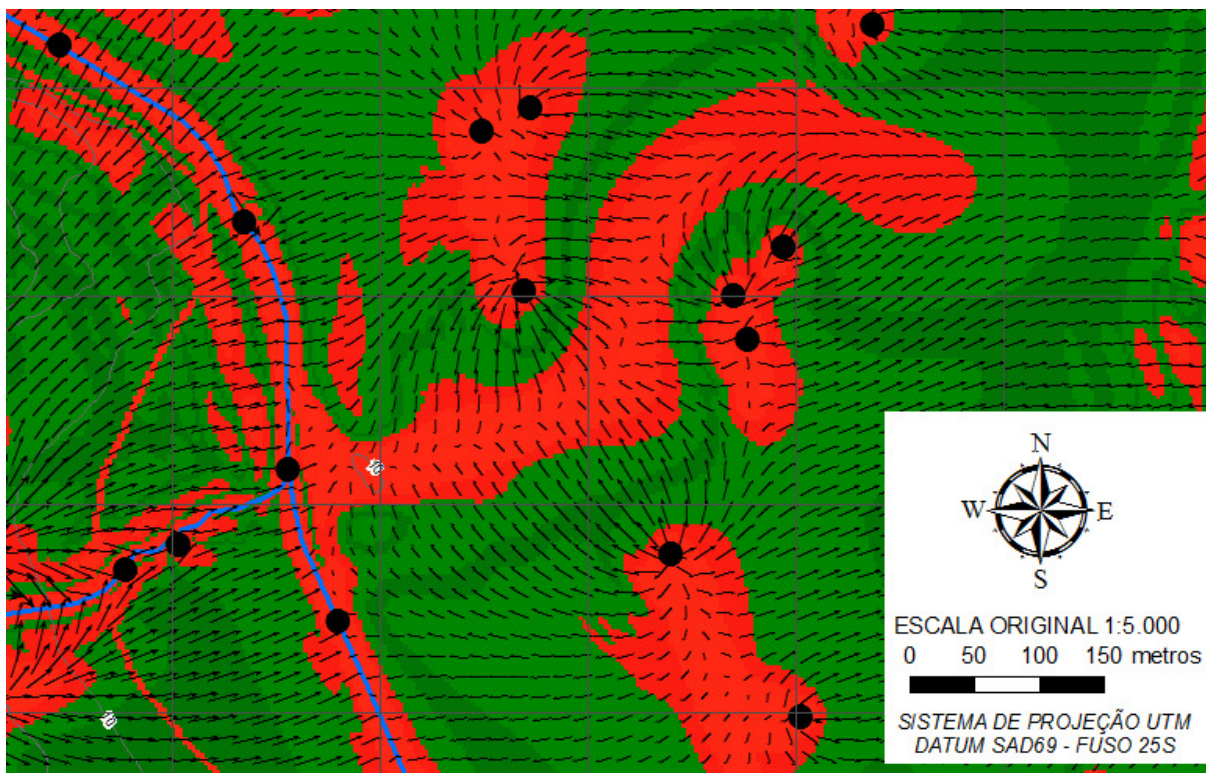


Figura 19: Locais onde o residual em relação à vazão de saída de cada pixel foi elevado.

Já nas regiões onde ocorre um fluxo constante e contínuo de água, o percentual de residual em relação à vazão de saída não ultrapassou o valor de 5%, como pode ser visto na figura 19 representado pela cor verde. Se os valores dos residuais nessas regiões fossem elevados indicariam que os resultados da modelagem não foram bons e que os dados de entrada deste modelo apresentam problemas. Como isso não ocorreu, os valores de transmissividade, porosidade efetiva e espessura saturada (obtidos em revisão bibliográfica) podem ser considerados consistentes, bem como, o comportamento do fluxo superficial subterrâneo do aquífero livre modelado.

Os rasters que combinados descrevem o campo de fluxo da água subterrânea mostram-se adequados também, pois o resultado evidencia vetores direcionados partindo de regiões mais elevadas para regiões mais baixas, além de possuir maior magnitude em locais com maior gradiente hidráulico, como estamos tratando do aquífero livre a carga piezométrica pode ser desprezada, e portanto a carga hidráulica total será devida apenas a cota altimétrica,

ou seja, a carga hidráulica total condiz com o relevo. Os valores de velocidade de fluxo se situaram numa faixa entre 0,01 e 10 m/d, que podem ser considerados valores elevados. Isto é justificado pelo fato da formação geológica da área de modelagem apresentar, predominantemente, valores elevados de porosidade e transmissividade, o que favorece o fluxo de água subterrânea.

A ferramenta que traça o caminho da partícula pôde ser aplicada gerando resultados bastante confiáveis, pois utiliza como entrada apenas os resultados da ferramenta VELOCIDADE DE DARCY, considerados consistentes. Já a ferramenta POROUS PUFF, se utiliza também de outros parâmetros de entrada como dispersividade longitudinal, razão de dispersividade, fator de retardamento e coeficiente de decaimento, que devem estar corretos para obter-se uma boa aproximação da realidade. Neste caso, foram utilizados os valores padrões indicados pela própria ferramenta do ArcGIS 9.1, que se mostram razoáveis, e portanto geraram resultados aceitáveis.

As plumas de contaminação geradas para diferentes intervalos de tempo para os dois pontos apresentaram uma velocidade de migração relativamente alta, com valores de 2,8 e 17,7 anos para os pontos 1 e 2, respectivamente. Verificou-se também, que no trecho que a pluma percorre dentro da Formação Barreiras (mais argiloso) a dispersão longitudinal da pluma foi menor, aumentando quando atinge a região dos Depósitos Quaternários (mais arenoso), essa divisão das unidades geológicas do terreno pode ser vista no ANEXO 3.

O resultado da ferramenta POROUS PUFF mostrou-se bastante interessante para assistir decisões de medidas de tratamento de contaminantes no caso de um acidente com dispersão de algum poluente no meio, pois a delimitação das plumas em diferentes tempos permite prever seu comportamento, bem como sua área de influência. Neste caso, após 3 anos, uma faixa de, aproximadamente, 430 m seria ocupada pela pluma que sai do ponto 1, a uma distância de 350 m entre o ponto 1 e o centro da pluma. Com essas informações,

associadas a outras informações de interesse é possível optar dentre as diversas opções para tratamento do poluente como barreiras reativas permeáveis ou bombeamento para tratamento *ex situ*, por exemplo.

A aplicação das ferramentas de modelagem de água subterrânea, bem como das de modelagem de água superficial (aplicadas na primeira etapa desta pesquisa), se mostrou bastante satisfatória com a geração de resultados condizentes com a realidade. Esses resultados podem servir como base para auxílio na gestão de uma bacia hidrográfica de interesse, tanto no que diz respeito aos recursos hídricos superficiais quanto aos subterrâneos.

7. CONCLUSÕES

O desenvolvimento dos resultados neste trabalho permitiu validar a aplicação das ferramentas de hidrologia de superfície superficial e subterrânea, bem como verificar os cuidados a serem tomados durante as modelagens e as limitações das ferramentas. Além disso, os resultados obtidos podem ser utilizados pelos gestores da região para possibilitar um melhor planejamento dos recursos hídricos e dos processos hidrogeológicos envolvidos.

Com base no conhecimento adquirido sobre o funcionamento destas ferramentas será possível desenvolver e aplicar modelos para subsidiar a análise de processos da dinâmica superficial de grande importância ambiental, como as inundações/enchentes e os processos erosivos pluviais e fluviais.

O trabalho desenvolvido permitiu trabalhar com as ferramentas de hidrologia existentes no ArcGIS 9.1 de forma a compreender suas particularidades e limitações, possibilitando, em uma possível continuidade da pesquisa, a aplicação de forma mais prática dessas ferramentas, como em um estudo de caso, por exemplo.

Foi possível observar pelos resultados que as ferramentas podem ser aplicadas em diferentes áreas de estudo da Engenharia Ambiental, conforme descrito ao longo da análise dos resultados. Além disso, a pesquisa desenvolvida permitiu a revisão de conceitos importantes transmitidos ao longo do curso de Engenharia Ambiental.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C. N.; Modelagem integrada de recursos hídricos com apoio de um sistema de informações geográficas. 2006. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BEAR, J. Dynamics of fluids in porous media. New York: Dover Publications, 1972, 764 p.
- BEAR, J.; VERRUIJT, A. Modeling groundwater flow and pollution. Dordrecht: D Reidel, 1987. 414p.
- BROOKS, K. N. et al. Hydrology and the management of watersheds. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1991. 2nd ed.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.; D'ALGE, J.C. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos, INPE, 2001 (2a. edição, revista e ampliada).
- COSTA, M. L. M. Estabelecimento de critérios de outorga de direito de uso para águas subterrâneas. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA). Campina Grande (PB), 2009.
- COSTA, W. D. Diagnóstico preliminar sobre as condições de captação de água subterrânea na Bacia Sedimentar Costeira do estado da Paraíba. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica, 2006.
- COSTA, W. D. et al. Monitoramento dos aquíferos costeiros de Pernambuco na região do Recife. In: CABRAL, J. J. S. P. et al. (Org.). Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento. Recife: Editora da UFPE, 2003. p. 365-392.
- DAVIS, S. N. e DE WIESE, R. J. M. “Hydrogeology”. New York, NY. John Wiley and Sons, 1966. 463 p.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (1997). Hidrogeologia. Conceitos e aplicações. CPRM, LABHID-UFPE, 1997, 412 p.

- FELGUEIRAS, C. A. Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação / C. A. Felgueiras - São José dos Campos: INPE, 1999.212p. – (INPE-8180-TDI/760).
- FETTER, C. W. (1993). Contaminant hydrogeology. First Edition. Book Press, Inc. New York. 458p.
- GARCEZ, L. N. Hidrologia. Edgard Blücher. São Paulo, 1967. 249 p.
- GOODCHILD, M. F., e J. PROCTOR. 1997. Scale in a digital geographic world. *Geographical and Environmental Modeling* 1: 5–23.
- GOODCHILD, M. F.; BATTY, M.; MAGUIRE, D. J. GIS, Spatial Analysis and Modeling. ESRI PRESS, NEW YORK. 2005. 480p.
- MENESES, L. F. et al. Elaboração de Mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos Superiores no Município de João Pessoa – PB, Através de Técnicas de Geoprocessamento. In: *Rev. Tecnol., Fortaleza*, v.30, n.1, p. 123-132, jun. 2009.
- MONTEIRO, A. B. et al. Hidrogeologia e gestão do aquífero barreiras nos bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco. In: *XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Florianópolis, 2002.
- MONTGOMERY, D. R. e DIETRICH, W. E. Channel Initiation and the Problem of Landscape Scale. *Science*. Reprint Series 14 February 1992.
- MORAIS, L. M. F. A. Expansão Urbana e Qualidade Ambiental no Litoral de João Pessoa-PB. Dissertação de Mestrado. Universidade federal da Paraíba – UFPB. Programa de Pós-Graduação em Geografia. João Pessoa (PB). 2009.
- NÓBREGA, T. M. Q. A Problemática da Drenagem em Áreas Urbanas Planas: O Caso da Planície Costeira da Cidade de João Pessoa. Dissertação de Mestrado. Universidade federal da Paraíba – UFPB. Programa de pós-graduação em desenvolvimento e meio ambiente - PRODEMA. João Pessoa (PB), 2002.
- OLIVEIRA, A. M. S. e BRITO, S. N. A. Geologia de engenharia. São Paulo. 1998 (ABGE).
- OLIVEIRA, A. S. e AUGUSTO FILHO, O. Análise e aplicação de modelos numéricos de simulação do fluxo da água subterrânea e dispersão de contaminantes em ambiente de

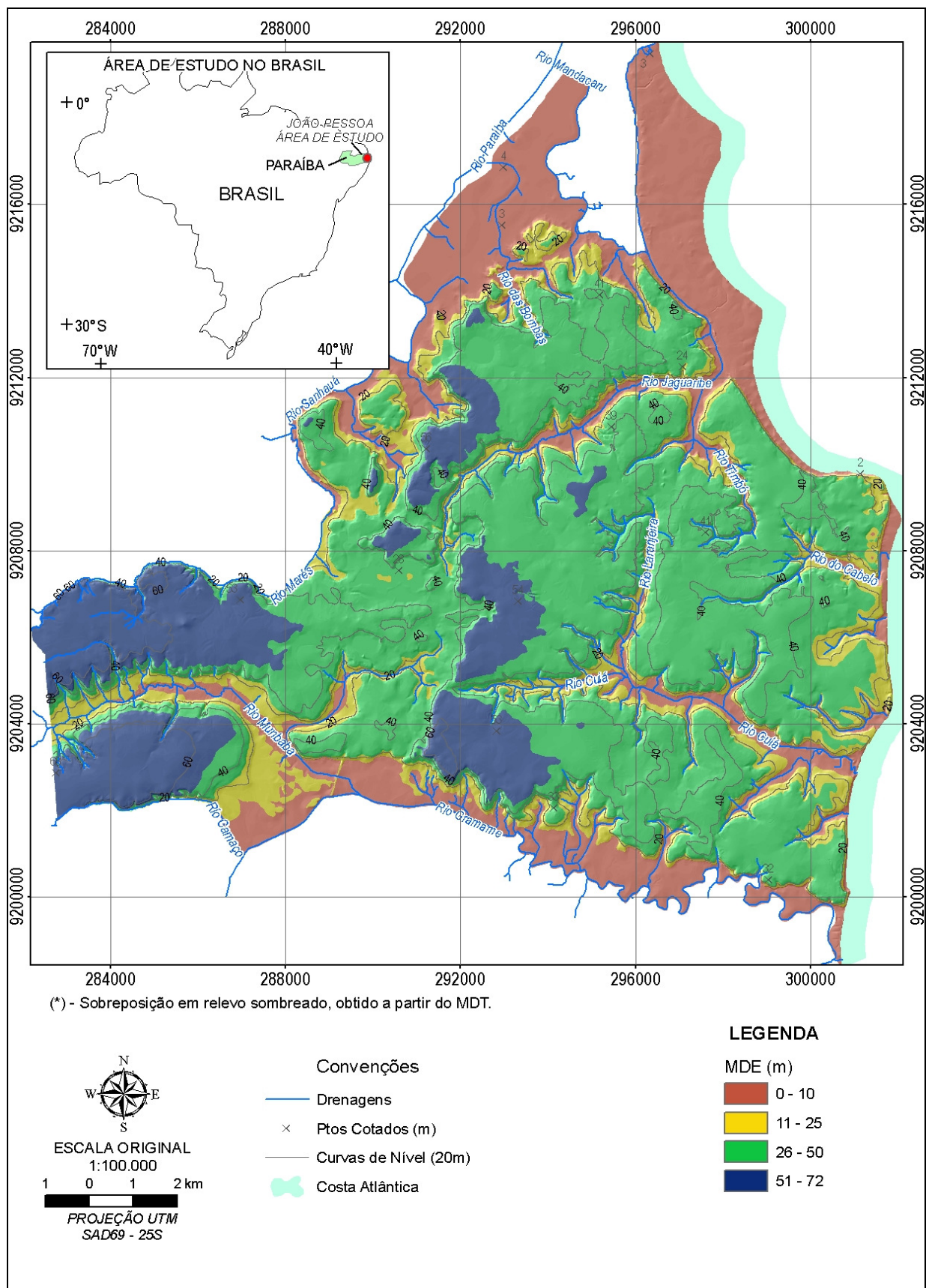
- sistema de informação geográfica – SIG. In: Revista Minerva, 2008. v. 5. n. 3. p. 267 – 276.
- PONCE, V. M., Engineering hydrology: principles and practices, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1989.
- RABELO, J. L. Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê. 2006. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- RIGHETTO, A.M. Hidrologia e Recursos Hídricos. São Carlos. EESC/USP, 1998. 840p.
- RUFINO, I. A. A.; FALCAO, E. C.; PASSOS, I. D. C. F. Formação Superior Em Geoprocessamento: O relato de uma experiência positiva no CEFET-PB - GeoNordeste2006 - 3º Simpósio Regional de Geoprocessamento de Sensoriamento Remoto - Aracaju-SE - Embrapa - Tabuleiros – 2006.
- SILVA, A. et al. Determinação Do Tempo De Concentração Da Bacia Montante Do Arroio Chasqueiro. UFPEL. 2007.
- SOARES, W. C. Banco de dados geológico-geotécnicos do município de João Pessoa-PB com base em sondagens a percussão e uso de SIG. Texto apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte integrante dos requisitos para a realização do exame de qualificação dentro do programa de Doutorado em Geotecnia. São Carlos, 2009.
- TARBOTON, D. G. e AMES, D. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. Utah Water Research Laboratory, Civil and Environmental Engineering Department, Utah State University, 2001.
- TARBOTON, D. G. et al. On the extraction of channel networks from digital elevation data. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, U.S.A. 1991.
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. Decifrando a Terra. Oficina de textos, 2003. 557p.
- TODD, D.K. Groundwater Hydrology. Nova York: Wiley, 1959. 336p.

- TONELLO, K. C. et al. Diagnostico hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, município de Guanhães, MG, Brasil. Departamento de Engenharia Florestal - UFSCAR - Sorocaba. São Paulo, 2009.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. ABRH Editora da UFRGS. Porto Alegre. 1998. 669p.
- VELOZO, R. Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP, com auxílio da geofísica. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo (USP) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Departamento de geotecnia. São Carlos, 2006.
- YONG, R.N.; MOHAMED, A.M.O. Principles of contaminant transport in soils. Netherlands: Elsevier Science Publishers, 327p, 1992.

9. ANEXOS

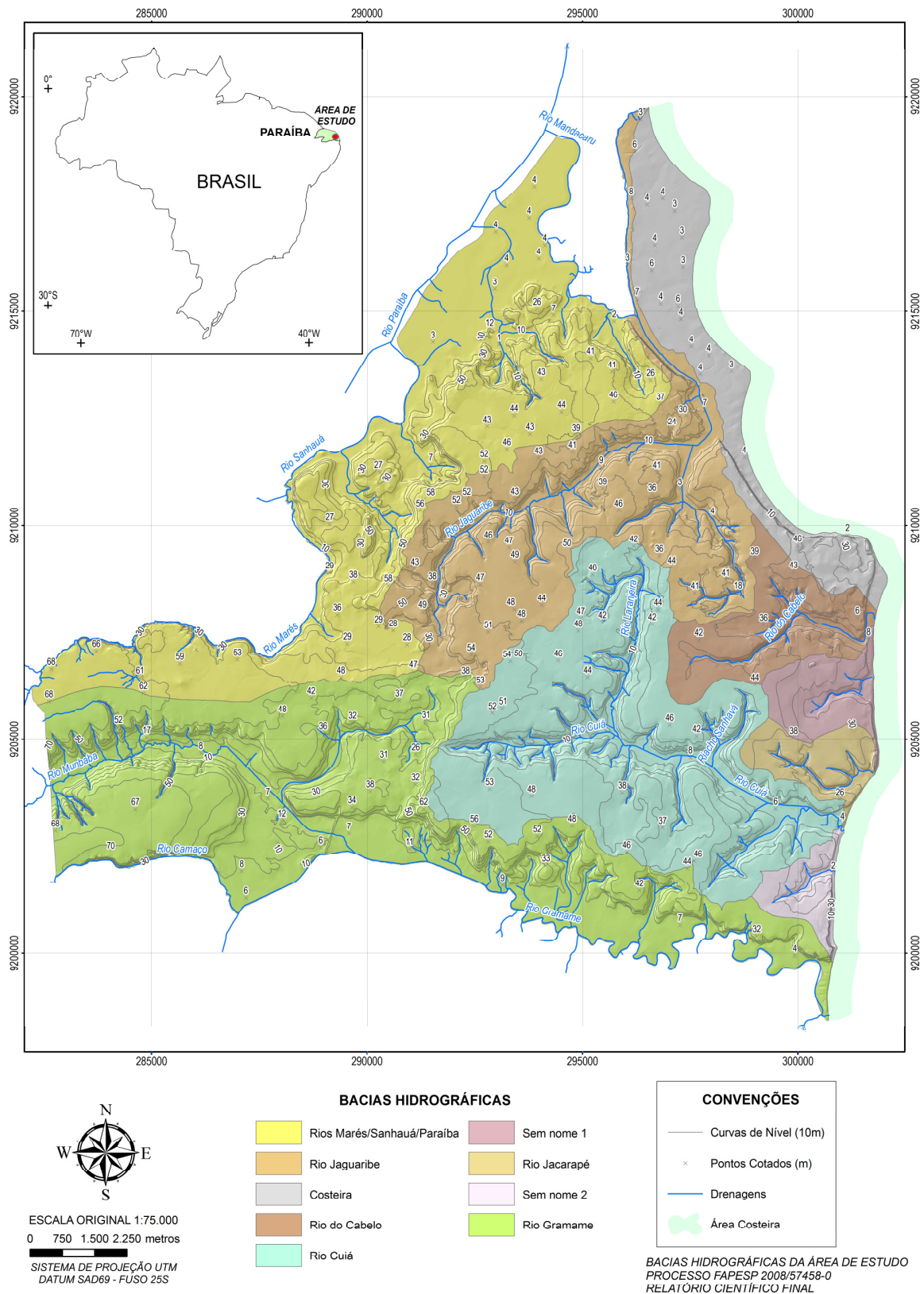
1. Base Cartográfica da Área de Estudo
2. Bacias Hidrográficas a partir da ferramenta Basin
3. Área de estudo selecionada com furos de sondagem
4. Superfície Freática
5. Erro Percentual
6. Vetores do campo de fluxo
7. Plumas de contaminação

ANEXO 1 - Base Cartográfica da Área de Estudo

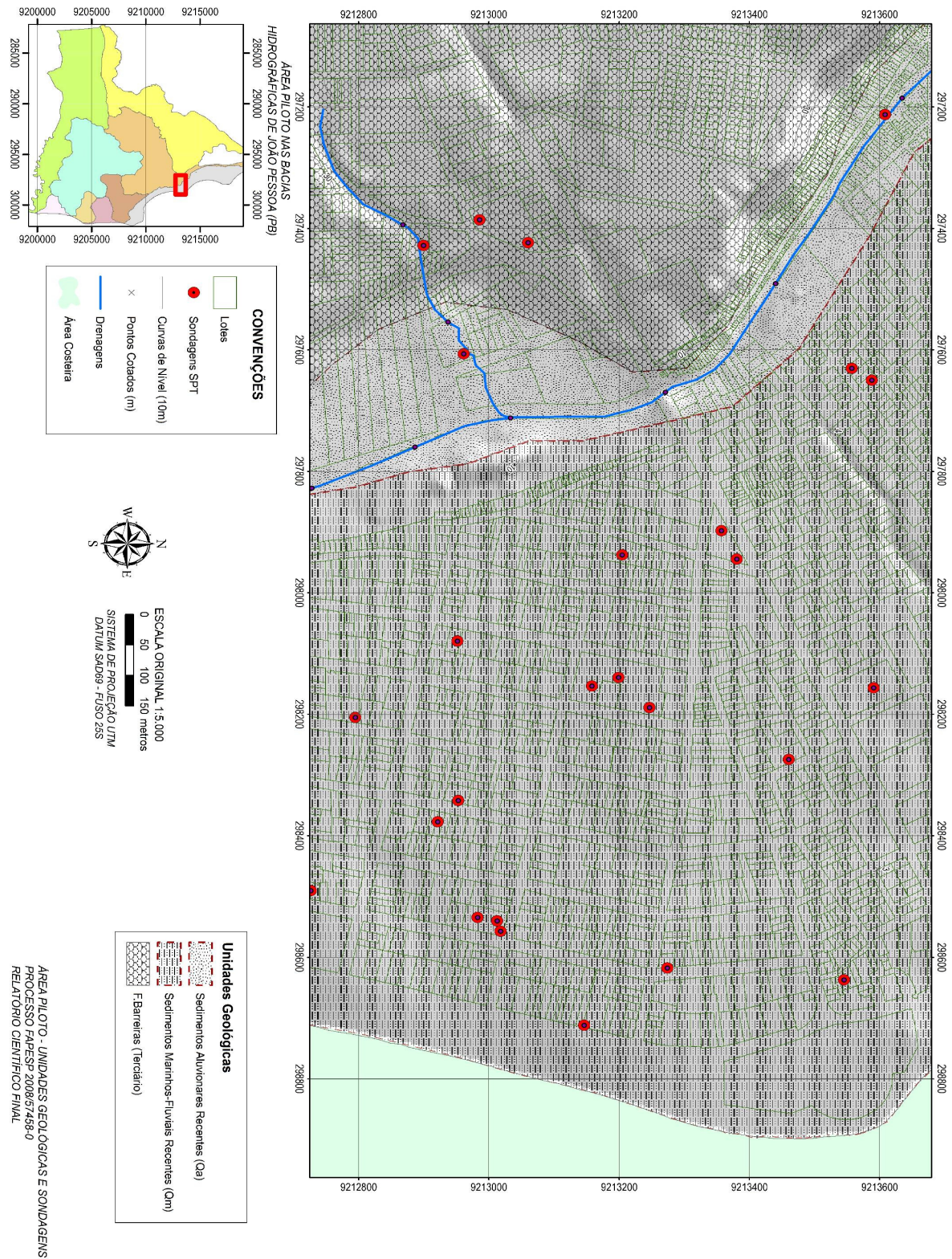


ANEXO 2 - Bacias Hidrográficas a partir da ferramenta Basin

Bacias Hidrográficas a partir da ferramenta Basin

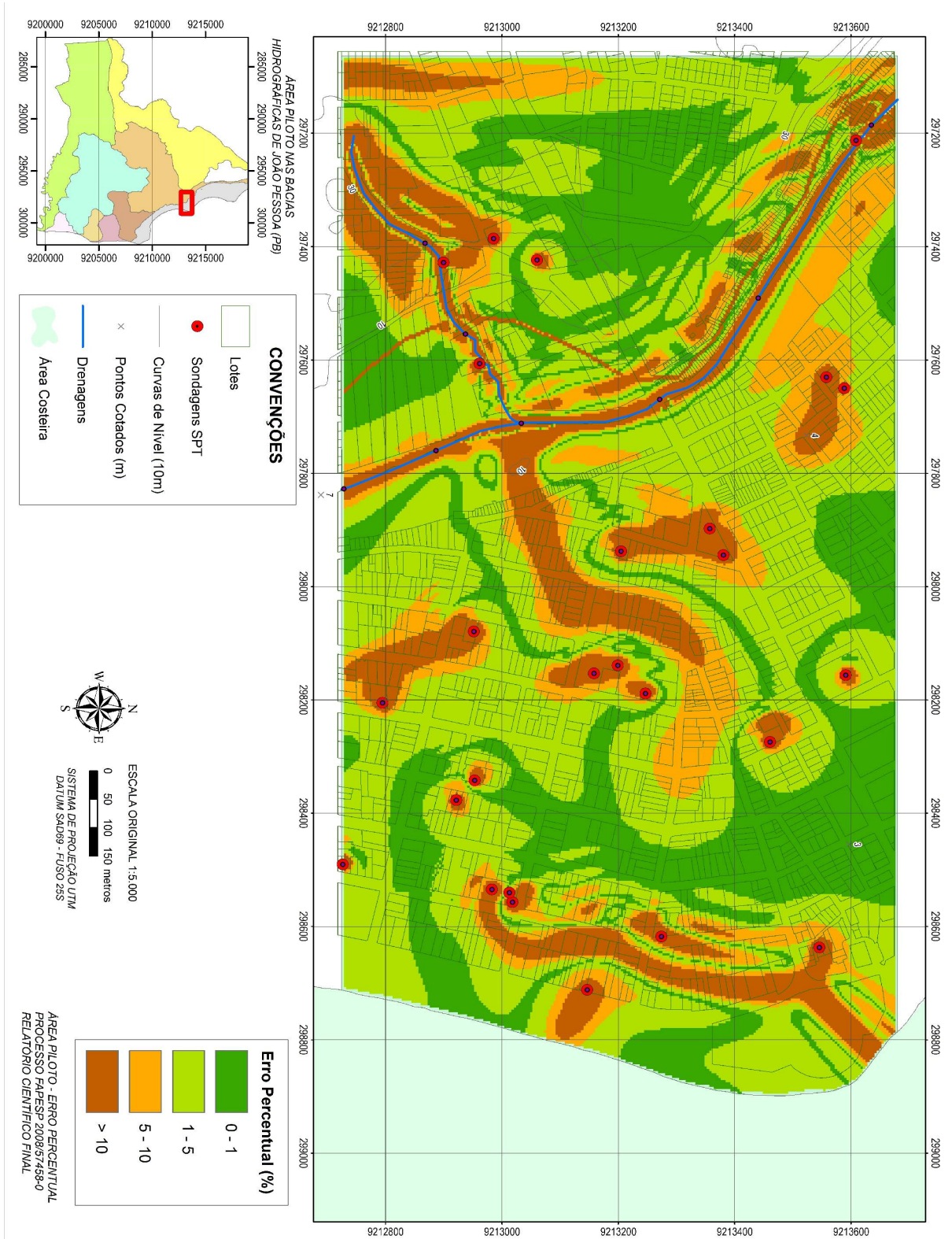


ANEXO 3 - Área de estudo selecionada com furos de sondagem

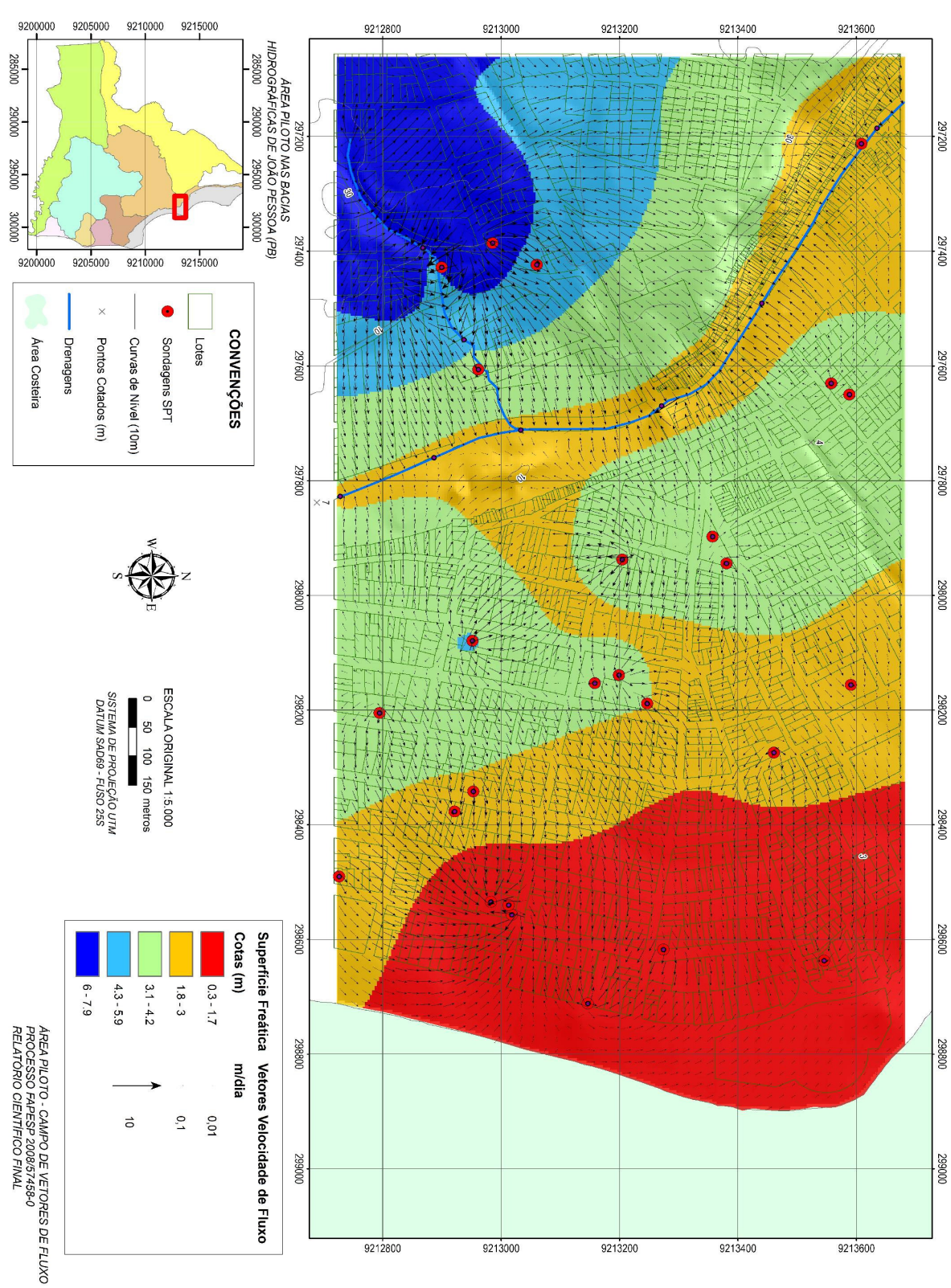




ANEXO 5 - Erro Percentual



ANEXO 6 - Vetores do campo de fluxo



ANEXO 7 - Plumas de contaminação

