



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

**SALATIEL DA ROCHA VENÂNCIO**

**AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE OCUPAÇÃO DA BACIA DO RIO PITIMBU  
COM SUBSÍDIOS PARA ESTUDOS DE POSSÍVEIS IMPACTOS SOBRE OS  
RECURSOS HÍDRICOS**

**NATAL/RN**

**2014**

SALATIEL DA ROCHA VENÂNCIO

**AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE OCUPAÇÃO DA BACIA DO RIO PITIMBU  
COM SUBSÍDIOS PARA ESTUDOS DE POSSÍVEIS IMPACTOS SOBRE OS  
RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

**Orientador:** Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto

**NATAL/RN**

**2014**

SALATIEL DA ROCHA VENÂNCIO

**AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE OCUPAÇÃO DA BACIA DO RIO PITIMBU  
COM SUBSÍDIOS PARA ESTUDOS DE POSSÍVEIS IMPACTOS SOBRE OS  
RECURSOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr. Antônio Marozzi Righetto – Orientador

---

Dr. Lucio Flavio Ferreira Moreira – Examinador UFRN

---

Dr. Roberto Pereira – Examinador Externo IFRN

**Natal, 10 de Março de 2014**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu Senhor e Deus pelo seu inefável amor e graça a mim concedidos, pelas promessas cumpridas e a certeza de que sempre estará comigo. A Ele toda honra e glória.

Aos meus pais, Emanuel Venâncio dos Santos (*In Memoriam*) e Evanilda da Rocha Alves Venâncio. Aos meus irmãos, Ruth, Daniel, Sarah, Luiz e Israel, que sempre me incentivaram diante das adversidades.

À minha esposa querida, Ana Karenyne Prata de Lucena Venâncio, pela sua compreensão e ajuda indispensável, pelas correções dos textos e dicas de Português.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), por ter me concedido esta formação. Ao programa de Pós Graduação em Engenharia Sanitária (PPgES) e seus profissionais que sempre deram o suporte necessário à conclusão do curso.

Ao Professor Orientador Antônio Marozzi Righetto, pela compreensão, paciência e força nas horas difíceis. Muito obrigado.

Aos meus sogros e cunhados, pelas orações e forças nos momentos difíceis.

Aos meus amigos José Francisco de Sousa Filho, David Mousinho, Wesley Catão e Eduardo Brandão pelas dicas e apoios sinceros.

À Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), pelo importante apoio à realização deste estudo. Ao diretor técnico da Companhia, Dr. Ricardo Varela. Ao engenheiro Josildo Lourenço dos Santos, pela compreensão e solicitude, e à engenheira Simone Maria, meus respectivos gerente e chefe da Companhia.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

## RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP), pertencente à região metropolitana da capital Potiguar, Estado do Rio Grande do Norte (RN), contribui, entre outros fins, para o consumo humano e dessedentação animal. Essa bacia é de suma importância, pois além de abastecer com água doce aproximadamente 30% da população da parte sul de Natal (zonas sul, leste e oeste), contribui para o equilíbrio do ecossistema ao longo do rio. Diante da conjuntura atual, os objetivos deste estudo foram avaliar a dinâmica do desenvolvimento urbano na BHRP, aplicando Autômatos Celulares como instrumento de modelagem, e simular cenários urbanos futuros, entre 2014 e 2033, empregando o programa de simulação SLEUTH. Na fase de calibração, foram utilizadas as manchas urbanas para os anos de 1984, 1992, 2004 e 2013, com resolução 100 metros. Após a simulação, verificou-se que houve uma predominância do crescimento orgânico, expandindo-se na BHRP, a partir de centros urbanos existentes. O crescimento espontâneo ocorreu por toda extensão da Bacia, porém a probabilidade de crescimento efetivo não deve ultrapassar 21%. Verificou-se um crescimento de 68% para o período entre 2014 e 2033, correspondendo a uma área de expansão de 1.778 ha. Para o ano de 2033, a área da nascente do rio Pitimbu e proximidades da lagoa do Jiqui terão a possibilidade efetiva de crescimento acima de 78%. Por fim, observou-se uma tendência de crescimento urbano exógeno (de fora para dentro) na Bacia. Em consequência desse crescimento, os recursos hídricos tornar-se-ão cada vez mais escassos.

**Palavras-chave:** Bacia do Rio Pitimbu. Crescimento urbano. Modelagem urbana. Autômato Celular. SLEUTH.

## ABSTRACT

The Pitimbu River Watershed (PRW), belonging to Potiguar capital metropolitan area, State of Rio Grande do Norte, contributes, among other purposes, to human using and animal watering. This watershed is extremely important because, besides filling up with freshwater approximately 30% of the south part of Natal (South, East and West Zones), contributes to the river shore ecosystem equilibrium. Face to the current conjuncture, this study aims to evaluate the urban development dynamics in the PRW, applying Cellular Automata as a modeling instrument, and to simulate future urban scenarios, between 2014 and 2033, using the simulation program SLEUTH. In the calibration phase, urban spots for 1984, 1992, 2004 and 2013 years were used, with resolution from 100 meters. After the simulation, it was found a predominance of organic growth, expanding the BHRP from existing urban centers. The spontaneous growth occurred through the fullest extent of the watershed, however the probability of effective growth should not exceed 21%. It was observed that, there was a 68% increase for the period between 2014 and 2033, corresponding to an expansion area of 1,778 ha. For 2033, the source of Pitimbu River area and the Jiqui Lake surroundings will increase more than 78%. Finally, it was seen an exogenous urban growth tendency in the watershed (outside-in). As a result of this growth, hydraulics resources will become scarcer.

**Keywords:** Pitimbu River Watershed. Urban growth. Urban Modeling. Cellular Automata. SLEUTH.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – (A) VIZINHANÇA DE VON NEUMANN (B) VIZINHANÇA DE MOORE; .....	27
FIGURA 2 – EXPANSÃO URBANA BASEADO EM AC NUMA SUPERFÍCIE PLANA .....	28
FIGURA 3 – EXPANSÃO URBANA COM RESTRIÇÃO DO TERRENO .....	29
FIGURA 4 – EXPANSÃO URBANA COM INFLUÊNCIA DA REDE VIÁRIA .....	30
FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO E ACESSO (ADAPTADO DA SERHID, 2005).....	38
FIGURA 6 – ISOIETAS DAS MÉDIAS ANUAIS DE CHUVA, NA ÁREA DE ESTUDO (FONTE: SERHID, 2005).....	41
FIGURA 7 – MAPA GEOLÓGICO DA BHRP (FONTE: SERHID, 2005).....	43
FIGURA 8 – MAPA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO (FONTE: SERHID, 2005 COM ALTERAÇÕES) .....	49
FIGURA 9 – CARACTERIZAÇÃO DO TIPO DE OCUPAÇÃO DO SOLO (SERHID, 2005).....	50
FIGURA 10 – MANCHA URBANA, DE 1984 E 2013 INSERIDAS NA BHRP (FONTE: INPE (2014), GOOGLE (2014)) .....	51
FIGURA 11 – CENTRO INDUSTRIAL AVANÇADO (CIA) DE MACAÍBA - ÁREA COM REDE DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO (FONTE: CAERN (2014), GOOGLE (2014)) .....	53
FIGURA 12 – MANCHA URBANA DE 2013.....	56
FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DO CRESCIMENTO ESPONTÂNEO (FONTE: PROJECT GIGALOPOLIS – 2013).....	57
FIGURA 14 ILUSTRAÇÃO DO CRESCIMENTO DIFUSO DE CENTROS URBANOS .....	58
FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DO CRESCIMENTO ORGÂNICO .....	58
FIGURA 16 – ILUSTRAÇÃO DO CRESCIMENTO INFLUENCIADO PELA REDE VIÁRIA.....	59
FIGURA 17 – ÁREA URBANA DE 2013 (EM PIXELS).....	62
FIGURA 18 – MALHA VIÁRIA DENTRO DA BHRP (EM PIXELS).....	63
FIGURA 19 – TOPOGRAFIA DA BHRP .....	63
FIGURA 20 – ÁREA DE EXCLUSÃO URBANA .....	64
FIGURA 21 – SOMBREAMENTO DA BACIA .....	65
FIGURA 22 – ETAPAS DA CALIBRAÇÃO ATÉ A SIMULAÇÃO .....	66
FIGURA 23 – ARQUIVO “CONTROL_STATS.LOG” COM A MÉTRICA LEE SALEE SELECIONADA .	69
FIGURA 24 – ARQUIVO "AVG.LOG" COM O RESULTADO DA CALIBRAÇÃO.....	69
FIGURA 25 – CENÁRIO 1. ÁREAS EXCLUÍDAS NO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO (FONTE: AUTORIA PRÓPRIA).....	75
FIGURA 26 – CENÁRIO 2. ÁREAS EXCLUÍDAS NO PROCESSO DE URBANIZAÇÃO (FONTE: AUTORIA PRÓPRIA).....	77
FIGURA 27 – CENÁRIO 1: CRESCIMENTO URBANO EM 2014 .....	82
FIGURA 28 – CENÁRIO 1: CRESCIMENTO URBANO EM 2022 .....	84
FIGURA 29 – CENÁRIO 1: CRESCIMENTO URBANO EM 2033 .....	86
FIGURA 30 – CENÁRIO 2: CRESCIMENTO URBANO EM 2033 .....	92
FIGURA 31 - MANCHA URBANA 1984 .....	105
FIGURA 32 - MANCHA URBANA 1992 .....	105
FIGURA 33 - MANCHA URBANA 2004 .....	106

FIGURA 34 - MANCHA URBANA - 2013 .....	106
FIGURA 35 - ÁREA DE EXCLUSÃO URBANA.....	107
FIGURA 36 - ROAD 2004.....	107
FIGURA 37 - ROAD 2013.....	108
FIGURA 38 - TOPOGRAFIA DA BHRP .....	108
FIGURA 39 - RELEVO SOMBREADO (HILLSHADE) .....	109
FIGURA 40 - MANCHA URBANA 1984 .....	109
FIGURA 41 - MANCHA URBANA 1992 .....	110
FIGURA 42 - MANCHA URBANA 2004 .....	110
FIGURA 43 - MANCHA URBANA 2013 .....	111
FIGURA 44 - ÁREA DE EXCLUSÃO URBANA .....	111
FIGURA 45 - ROAD 2004.....	112
FIGURA 46 - ROAD 2013.....	112
FIGURA 47 – TOPOGRAFIA DA REGIÃO ESTUDADA .....	113
FIGURA 48 - RELEVO SOMBREADO (HILLSHADE) .....	113

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CONTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS NA BHRP .....	37
TABELA 2 – CADASTRO DE USUÁRIOS DA BACIA DO RIO PITIMBU POR ATIVIDADES .....	48
TABELA 3 – TIPOS DE CRESCIMENTO SIMULADO PELO MODELO SLEUTH.....	59
TABELA 4 – DESCRIÇÃO DAS MÉTRICAS (FONTE: DIETZEL <i>ET AL.</i> , 2007) .....	60
TABELA 5 – VALORES RECOMENDADOS PELO MANUAL DO SLEUTH.....	67
TABELA 6 – EXEMPLO DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO. ....	68
TABELA 7 – CONFIGURAÇÃO DOS COEFICIENTES DA FASE MÉDIA.....	70
TABELA 8 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO FINA (EXEMPLO).....	70
TABELA 9 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO FINAL (EXEMPLO) .....	71
TABELA 10 – VALORES FICTÍCIOS DOS COEFICIENTES .....	72
TABELA 11 – RESULTADO FINAL DA CALIBRAÇÃO (EXEMPLO).....	73
TABELA 12 – OS COEFICIENTES PARA A MODELAGEM (EXEMPLO).....	73
TABELA 13 - COEFICIENTES FINAIS DA CALIBRAÇÃO .....	80
TABELA 14 – NOVOS PIXELS GERADOS POR TIPO DE CRESCIMENTO .....	81
TABELA 15 – CENÁRIO 1: DADOS DO ARQUIVO “AVG.LOG” GERADO NA SIMULAÇÃO (CONTINUA).....	88
TABELA 16 – CENÁRIO 1: DADOS DO ARQUIVO “AVG.LOG” GERADO NA SIMULAÇÃO.....	89
TABELA 17 – NOVOS PIXELS GERADOS POR TIPO DE CRESCIMENTO .....	90
TABELA 18 – CENÁRIO 2: DADOS DO ARQUIVO “AVG.LOG” GERADO NA SIMULAÇÃO (CONTINUA).....	93
TABELA 19 – CENÁRIO 2: DADOS DO ARQUIVO “AVG.LOG” GERADO NA SIMULAÇÃO.....	94
TABELA 20 – DESCRIÇÃO DAS MÉTRICAS ENCONTRADAS NO ARQUIVO “AVG.LOG” .....	95

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – TEMPERATURA MÉDIA DE NATAL/RN (FONTE: KOBAYASHI, 2009).....	39
GRÁFICO 2 – PRECIPITAÇÃO MÉDIA DE NATAL E PARNAMIRIM/RN (FONTE: KOBAYASHI, 2009).....	40
GRÁFICO 3 – PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO RESIDENTE NA ÁREA DA BACIA PARA O ANO DE 2025.....	47
GRÁFICO 4 – CENÁRIO 1: CRESCIMENTO URBANO ENTRE 2014 E 2033 (1 PIXEL = 1 HECTARE) .....	87
GRÁFICO 5 – CENÁRIO 1: TAXA DE CRESCIMENTO URBANO .....	87
GRÁFICO 6 – CENÁRIO 1: CRESCIMENTO URBANO ENTRE 2014 E 2033 (1 PIXEL = 1 HECTARE) .....	91
GRÁFICO 7 – CENÁRIO 2: TAXA DE CRESCIMENTO URBANO .....	91

## LISTA DE SIGLAS E VARIÁVEIS

AC	-	Autômato Celular
APP	-	Área de Preservação Permanente
BHRP	-	Bacia hidrográfica do rio Pitimbu
CA	-	Cellular Automata
CAERN	-	Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte
CIA	-	Centro Industrial Avançado
CONAMA	-	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	-	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DIM	-	Distrito Industrial de Macaíba
DQO	-	Demanda Química de Oxigênio
ERMN	-	Estação Radiogoniométrica da Marinha
FPA	-	Faixa de Proteção Ambiental
gif	-	<i>Graphics Interchange Format</i>
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
K1	-	Coefficiente de desoxigenação
MC	-	Método de Monte Carlo
OD	-	Oxigênio Dissolvido
OSM	-	<i>Optimal SLEUTH Metrics</i>
RN	-	Rio Grande do Norte
SACI	-	Simulador do Ambiente da Cidade
SIG	-	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	-	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UGD	-	<i>Urban Growth Dynamics</i>
ZPA	-	Zona de Proteção Ambiental

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. ESTUDOS REALIZADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO PITIMBU.....	16
2.1.1. A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP) .....	16
2.1.2. Aquífero Dunas/Barreiras .....	18
2.1.3. Uso e ocupação do solo .....	20
2.2. AUTÔMATOS CELULARES.....	22
2.3. AUTÔMATOS CELULARES NO BRASIL .....	23
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	26
3.1. AUTÔMATOS CELULARES E A SUA APLICAÇÃO NA MODELAÇÃO DE CENÁRIOS URBANOS .....	26
3.2. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DOS MODELOS URBANOS AC'S.....	30
3.2.1. Vantagens .....	30
3.2.2. Desvantagens.....	31
3.3. SLEUTH.....	33
3.3.1. Método Monte Carlo (MC) .....	33
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	37
4.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA.....	37
4.2. CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA .....	39
4.3. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....	47
4.4. INFRAESTRUTURA DE SANEAMENTO EXISTENTE .....	52
5. METODOLOGIA .....	55
5.1. PROCESSO DE MODELAGEM.....	55
5.1.1. Regras de transição condicionantes.....	57
5.1.2. Métricas .....	60
5.2. DADOS HISTÓRICOS.....	61
5.2.1. Manchas urbanas .....	62
5.2.2. Malhas viárias de transporte.....	62
5.2.3. Declividade (topografia).....	63
5.2.4. Áreas não urbanizáveis .....	64
5.2.5. Relevo sombreado (hillshade) .....	64
5.3. A CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	65
5.3.1. Fase grosseira .....	67
5.3.2. Fase media .....	70
5.3.3. Fase final .....	71
5.3.4. Escolha dos melhores coeficientes para a simulação .....	72
5.4. SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS ( <i>PREDICTION</i> ) .....	73
5.4.1. Cenário 1 .....	74
5.4.2. Cenário 2 .....	76

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
6.1. CALIBRAÇÃO .....	78
6.2. SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS .....	80
6.2.1. Cenário 1 .....	81
6.2.2. Cenário 2 .....	90
6.3. POSSÍVEIS IMPACTOS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS.....	96
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	97
8. BIBLIOGRAFIA.....	99
9. ANEXOS.....	105

## 1. INTRODUÇÃO

O homem, em busca de suprir suas necessidades, é o grande transformador do ambiente natural, promovendo alterações que geram as mais variadas agressões ambientais. Nesse processo, precisam ser consideradas as ações de proteção e preservação ambiental que levem em conta não somente as necessidades da atual qualidade de vida, mas também as das gerações futuras. Do contrário, incorre-se no risco de serem alcançados danos irreversíveis, que poderão dificultar ou mesmo inviabilizar a sua sobrevivência.

Com o aumento da população e o crescente uso de recursos naturais, a humanidade se depara com problemas como a escassez de água e a preocupação com o suprimento de suas necessidades. O homem vem ocupando os recursos naturais de forma desordenada sejam através da agropecuária, indústria ou urbanização, provocando o desequilíbrio do Meio Ambiente e ameaçando a existência da própria espécie (BORGES, 2002).

Neste sentido, a gestão e o controle ambiental são fundamentais para promover a adequação das modificações e adaptações do ambiente natural às necessidades individuais e coletivas, de maneira a evitar ou minimizar os impactos ambientais produzidos pelas atividades humanas.

A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP), pertencente à região Metropolitana da capital Potiguar, estado do Rio Grande do Norte (RN), se encaixa notadamente nesse contexto. Por contribuir para o consumo humano e dessedentação animal, entre outros fins, a bacia hidrográfica carece de um plano de ação em conjunto com os poderes públicos, de forma a implantar instrumentos eficazes para combater as mais diversas formas de degradação ambiental. Essa bacia é de grande importância, pois além de abastecer com água doce aproximadamente 30% da população da parte sul de Natal (zonas sul, leste e oeste), contribui para o equilíbrio do ecossistema ao longo do rio.

Na conjuntura atual, o rio Pitimbu tem relevante papel, por alimentar um reservatório natural denominado de Lagoa do Jiqui, localizada no baixo curso do rio Pitimbu (KOBAYASHI, 2009) através das águas de ressurgências subterrâneas e

das precipitações ao longo do ano. O rio é perene, com vazão de base proveniente do aquífero Dunas/Barreiras, formando um sistema hidráulico único (MELO, 1995).

A ocupação desordenada do solo e a crescente disposição de esgotos por fossas e sumidouros vêm comprometendo as águas subterrâneas e, potencialmente, as do rio Pitimbu. Por outro lado, a impermeabilização das regiões habitadas compromete a qualidade da água e das vazões de base do rio.

Diante das exposições aqui apresentadas, esta pesquisa também tem por finalidade conhecer ainda mais a BHRP, com foco no uso e ocupação do solo, contribuindo para o enriquecimento do acervo de pesquisas da região em estudo.

Nesta pesquisa foram propostos dois objetivos específicos. O primeiro consiste na interpretação da dinâmica do desenvolvimento urbano na BHRP, aplicando os Autômatos Celulares (AC) como instrumento de modelagem. O segundo, associado ao primeiro, refere-se à simulação de cenários urbanos futuros por meio de um modelo que utilizasse o AC. Neste estudo, foi empregado o programa SLEUTH.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Vários estudos realizados na BHRP contribuíram para o reconhecimento da importância desse Manancial. Nas últimas décadas, diversas pesquisas foram realizadas com intuito de identificar os problemas existentes na bacia, utilizando-se dos mais variados métodos e informações, tais como visitas em campo, coletas de amostras de água e modelagem e, também, contribuir para o aumento do acervo de pesquisas da bacia do rio Pitimbu.

Este capítulo foi dividido em dois tópicos para facilitar o desenvolvimento e compreensão do texto. O primeiro fez referência às pesquisas voltadas à BHRP, enquanto que o segundo foi desenvolvido em cima do tema da modelagem enfatizando os *Autômatos Celulares (AC)*.

### 2.1. Estudos realizados na Bacia Hidrográfica do Rio do Pitimbu

#### 2.1.1. A Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP)

OLIVEIRA (1994) pesquisou a “Autodepuração e monitoramento do rio Pitimbu”, analisando a qualidade da água através de monitoramento sistemático. As análises buscaram determinar os parâmetros físicos, químicos e biológicos e compará-los com os parâmetros da Resolução nº 20/86 do CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. Para estas análises, foram analisados nove pontos de coletas em todo o rio Pitimbu. Para calcular a autodepuração foi usado o modelo de Streeter e Phelps e para o coeficiente de desoxigenação  $k_1$ , empregou-se o método dos mínimos quadrados de Reed e Theriault.

O autor, em seus resultados, recomendou a realização de levantamento do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica, identificando as ações poluidoras pontuais ou distribuídas ao longo do curso d’água, como também o monitoramento e gerenciamento do manancial, restringindo a ocupação nas áreas próximas às margens do rio.

BORGES (2002) desenvolveu uma pesquisa visando avaliar qualitativamente as implicações das ações antrópicas e ambientais na BHRP. O autor percebeu que a área é ambientalmente frágil, em consequência das diversas formas de uso e ocupação do solo.

Constatou, ainda, que a Bacia vem passando por um processo de acentuada degradação e deterioração da qualidade de suas águas, o que pode gerar a interrupção do abastecimento na região, comprometendo, assim, a qualidade de vida da população dependente deste manancial. O autor conclui que os fatos analisados precisam ser geridos da melhor forma possível, envolvendo a população e órgãos públicos na busca por soluções ambientalmente adequadas.

SENA (2008), por sua vez, avaliou a qualidade da água do rio Pitimbu, uma das principais fontes de água doce que abastecem a cidade do Natal. Somado a isto, existe uma forte pressão de ocupação de suas margens em função do crescimento urbano, tornando ainda mais crítica a situação. O autor reuniu diversas pesquisas entre 1993 e 2007 e fez uma avaliação das condições da qualidade da água do rio através de variáveis físico-químicas e biológicas. Os resultados mostraram alto teor de ferro nas águas subterrâneas, baixos valores de oxigênio dissolvido e alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO). O parâmetro turbidez apresentou as maiores taxas em alguns pontos do rio Pitimbu, devido ao carreamento de substâncias pela drenagem. O teor de fósforo apresentado nos resultados, explica-se pela utilização do rio por parte da população ribeirinha para lavagem de roupas com detergentes.

KOBAYASHI (2009) desenvolveu seus estudos voltados à análise dos aspectos qualitativos e quantitativos da água e do sedimento no baixo curso do rio Pitimbu. Realizou testes físico-químicos da água e biomonitoramento envolvendo macro-invertebrados bentônicos. Esse monitoramento consistiu na coleta de amostras da água e do sedimento fluvial para serem analisados em laboratório. Além do OD, DBO, Nitrato, pH e Alcalinidade, foram medidos outros parâmetros como Cádmio, Cobalto, Cobre, Cromo, Prata e Níquel. A análise da qualidade da água revelou ausência da degradação por substâncias orgânicas. Entretanto, o biomonitoramento indicou sinais de degradação do ecossistema aquático. Os resultados demonstraram a necessidade de adotar medidas eficientes no gerenciamento, que resultem na proteção ambiental da bacia.

### 2.1.2. Aquífero Dunas/Barreiras

MELO *et al.*, (1994) descreveram que a cidade do Natal/RN está situada entre os rios Potengi, Pitimbu e o Oceano Atlântico, e que é coberta de sedimentos quaternários dunares que se sobrepõem a sedimentos terciário-quaternários do grupo Barreiras. Segundo os autores supracitados, estas unidades, do ponto de vista hidrogeológico, formam um sistema hidráulico único, complexo e indiferenciado, denominado de Sistema Aquífero Dunas/Barreiras. O estudo constatou ainda que as dunas exercem a função de uma unidade de transferência das águas de infiltração em direção aos níveis arenosos do Barreiras.

LUCENA *et al.*, (2002) realizaram estudo da conexão hidráulica subterrânea entre o sistema lacustre do Bonfim e a bacia do rio Pirangi (litoral leste do Rio Grande do Norte), utilizando dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos (eletro-resistividade). Concluíram que havia um aumento brusco do Aquífero Barreiras, decorrente de falhamentos entre o sistema supracitado e a bacia do rio Pirangi (da qual o rio Pitimbu faz parte), os quais propiciam uma conexão hidráulica subterrânea entre os dois sistemas.

Por representar a principal fonte de abastecimento d'água de diversas cidades do litoral leste, LUCENA *et al.* (2004) estudaram a potencialidade do aquífero Barreiras e sua relação com os mananciais superficiais. Com os resultados obtidos, elaboraram o mapa potenciométrico do Barreiras, evidenciando a presença de uma zona de recarga principal na região da sede municipal de Parnamirim, e de outra ao sul, adjacente ao limite da bacia do rio Pirangi. Esta segunda zona de recarga caracterizou uma importante conexão hidráulica entre o sistema lacustre do Bonfim e a bacia do Pirangi. A descarga do aquífero verifica-se no baixo curso do riacho Ponte Velha (rio Pitimbu), que inclui a lagoa do Jiqui e o riacho Taborda. Os gradientes hidráulicos apresentam-se relativamente menores nestas zonas de recarga, da ordem de  $10^{-3}$ , atingindo valores em torno de  $10^{-2}$  nas áreas de descarga do aquífero, principalmente no baixo curso do rio Pirangi.

Portanto, toda a área pesquisada evidencia uma ampla relação entre mananciais superficiais e subterrâneos do Aquífero Barreiras. O regime perene dos canais fluviais locais é creditado ao caráter influente do aquífero. Esta influência é

igualmente evidente nas duas principais lagoas da área, Jiqui e Pium, sendo esta última regularizada, sob o ponto de vista de volume armazenado, em razão da contribuição subterrânea proveniente do sistema do Bonfim.

RIGHETTO e ROCHA (2005) desenvolveram um estudo dentro do perímetro urbano da cidade do Natal, sobre a exploração sustentável do aquífero Dunas/Barreiras, dada a grande expansão urbana e da pequena área de recarga do Aquífero. Nele, foi avaliado o balanço hídrico, que incluiu a recarga natural, a exploração dos recursos hídricos, as fugas pelas fronteiras e o retorno das águas servidas. Os autores, além de abordar a contaminação por nitrato, aplicaram um modelo de exploração sustentável, buscando a exploração ótima em função das características do Aquífero e da recarga.

Os resultados obtidos no estudo foram os seguintes:

- A recarga efetiva supre as demandas, desde que mantida a situação atual de retorno de grande parte da água servida. Esta recarga não depende apenas da precipitação pluviométrica, mas é fortemente influenciada pela ação urbana, que tem como principal fator a impermeabilização do solo;
- Em não havendo modificação das condições de recarga, o abastecimento da área estudada será garantido por longo tempo, à custa de maior contaminação do aquífero, pois a água de retorno tem papel fundamental para o suprimento do aquífero, mesmo em face de sua contaminação.

Concluem o estudo afirmando que, caso haja a eliminação do retorno de água servida para o Aquífero, o sistema de exploração entrará rapidamente em colapso com os volumes atuais de bombeamento.

CABRAL *et al.*, (2009) fizeram um estudo sobre o comportamento do nitrato em poços do aquífero Dunas/Barreiras, abrangendo os bairros de Tirol, Nova Descoberta e Planalto. De acordo com os resultados, o bairro Planalto obteve o valor do teor de nitrato abaixo do limite de potabilidade, mas com tendência de crescimento. Concluíram que o aumento do teor de nitrato tem uma correlação com

o aumento da densidade populacional e a ausência de um sistema de esgotamento sanitário adequado, já que se trata da captação Dunas.

Segundo os autores supracitados, há uma preocupação premente, haja vista a captação dos poços atenderem uma parcela significativa da população de Natal, principalmente os bairros da zona Leste da Capital, onde vem crescendo os níveis de nitrato provenientes de efluentes tipicamente domésticos.

### **2.1.3. Uso e ocupação do solo**

A ocupação e o uso do solo em bacias hidrográficas devem ser feitos com base em um planejamento que considere as características e vulnerabilidades dessas áreas, de modo a garantir uma quantidade suficiente para o abastecimento da população. Entretanto, para além da quantidade, é imprescindível uma boa qualidade dessa água, para que haja um aproveitamento consciente dos mananciais, superficiais ou subterrâneos.

COSTA (1995 apud SENA 2008) destaca que a agricultura era a principal ocupação da bacia do rio Pitimbu em 1979, correspondendo por cerca de 35,7% da área. Em 1988, a área agrícola foi reduzida em 1.195 ha, passando a ocupar apenas 26,4% desta Bacia. Embora a área fosse relativamente pequena, os sítios urbanos experimentaram crescimento médio de 195%, principalmente na cidade de Parnamirim, no período de nove anos.

SANTOS (1999) fez uma pesquisa visando analisar as implicações na sub-bacia do rio Pitimbu, em decorrência do processo de uso e ocupação do solo. Utilizou dados obtidos com uso de fotografias aéreas, além das bases cartográficas dos anos de 1971 e 1996, com atualização dos dados em pesquisa de campo.

Após a análise dos dados, o autor supracitado constatou que a expansão urbana no entorno do rio Pitimbu vem ocorrendo de forma a alterar o equilíbrio dinâmico do sistema. Em Natal, mesmo tendo um Plano Diretor, verificou-se que a área transformada em Zona de Proteção Ambiental aos poucos vem sendo degradada, com sérios riscos de ocupação urbana desordenada. Em Parnamirim, a ocupação da margem do rio Pitimbu ocorre de forma contínua, com riscos, também, de ocupação indevida, principalmente pela inexistência de um Plano Diretor. O autor

conclui que a intervenção antrópica da região sem planejamento da área altera o regime hídrico, influenciando o curso fluvial.

VASCONCELOS (1999) estudou o processo de ocupação e uso do solo no bairro Planalto, Natal/RN, com o objetivo de analisar as transformações espaciais ali ocorridas, bem como as condições socioeconômicas da população. O autor utilizou-se do método operacional da abordagem dialética com os seguintes procedimentos metodológicos: pesquisa bibliográfica, documental, empírica e o registro fotográfico. A pesquisa concluiu que a ocupação e o uso do solo urbano no bairro Planalto apresentam-se de forma irregular, interferindo negativamente na formação do espaço urbano e nas condições de vida da população.

SANTOS (2002) em sua pesquisa discutiu a descaracterização geoambiental do afluente do rio Pitimbu (riacho do Tabuleiro), provocada pela implantação do Centro Industrial Avançado (CIA) no município de Macaíba. O autor utilizou uma abordagem teórica entre as variáveis de paisagens, pesquisas bibliográfica e cartográfica. Após a análise dessas informações, o autor concluiu que as intervenções feitas para a implantação do CIA, acarretaram consideráveis transformações na qualidade geoambientais do riacho Tabuleiro. Desse modo, podendo até comprometer o volume hídrico do rio Pitimbu, além de provocar um desequilíbrio irreversível na paisagem, vegetação e solo.

O uso e ocupação do solo, segundo SENA (2008), são fatores determinantes na geração de poluentes. As águas resultantes de drenagem urbana, juntamente com os resíduos das atividades antrópicas, são carregadas para o curso do rio, que influenciam diretamente para o desequilíbrio ambiental da Bacia. As águas subterrâneas, por sua vez, podem ser afetadas pela disposição inadequada de efluentes líquidos e sólidos no solo, que, conectados ao manancial superficial, comprometem a qualidade de suas águas.

Devido a crescente ocupação na bacia do rio Pitimbu, BARBOSA (2006) estudou os conflitos de uso da água e ocupação do solo dessa bacia no município de Macaíba/RN. O autor descreve que a ocupação humana se deu de forma desordenada, através de desmatamento, queimadas, atividade extrativa agressiva e ocupação urbana sem planejamento que causam a impermeabilização do solo.

Observou ainda que, além da grande quantidade de barramentos ao longo do rio, há também o lançamento de lixo nas proximidades das margens.

## 2.2. Autômatos Celulares

Nos anos 1940, o matemático húngaro John von Neumann desenvolveu a ideia de um robô que se auto-replicasse – “um autômato”. Seu interesse era encontrar um tipo de organização lógica suficiente para um autômato controlar a si próprio, de tal forma que pudesse também se reproduzir.

Entretanto, esta teoria só despertou a atenção quando os matemáticos poloneses Stan Ulam e Stan Mazur apresentaram uma ideia muito mais simples, baseada em padrões de grade de células, cujo comportamento era orientado a partir de uma sequência lógica de regras simples. Este comportamento era muito parecido com a reprodução dos seres vivos e foi considerado uma Máquina de Turing, capaz de fazer sua própria reprodução (LANGTON, 1986 apud CASTRO *et al.* 2008).

Em 1970, o matemático britânico John Holton Conway desenvolveu o “jogo da vida”, um autômato celular que simulava alterações em populações de seres vivos baseados em regras locais. Neste autômato, a regra era simples: cada célula nasce ou morre de acordo com as células vizinhas e há uma tendência de morte de todas as células ou a geração de padrões estáveis.

WOLFRAM (1984), através de seu artigo “*Cellular automata as models of complexity*”, estudou sistematicamente a mecânica estatística do funcionamento dos ACs e a formação de padrões particularmente similares. Os resultados o levaram a concluir que o AC poderia ser utilizado como modelo matemático de sistemas físicos, biológicos e computacionais.

CLARKE *et al.*, (1997) estudaram os modelos tradicionais de urbanização, com suas várias características particulares. Alguns modelos procuravam prever tanto as relações econômicas, quanto os padrões sociais e econômicos internos, dentro dos limites da cidade. Outros modelos, entretanto, dependiam menos da geometria e da economia e mais dos padrões sociais e raciais como determinantes da estrutura da cidade. Um terceiro grupo previa a estrutura e as formas das cidades, com base na diferença entre as interações dos indivíduos e seu

comportamento. Os autores constataram que todos os grupos de modelos urbanos foram desenvolvidos para uma determinada região.

Clarke e seus colaboradores entenderam que o desenvolvimento de um modelo de AC envolvia a definição de regras, calibração com dados históricos e também a análise do passado e presente para prever cenários futuros.

Foi então desenvolvido o Autômato Celular, um *software* chamado SLEUTH, que consistia em um modelo para simular o crescimento urbano influenciado pela urbanização, através de regras simples de crescimento para qualquer região. Após a primeira versão, o Software passou por mais duas atualizações, chegando à versão 3.0.

CASTRO & CASTRO (2008) fizeram um estudo sobre a evolução dos Autômatos Celulares desde o seu surgimento e constataram que são ferramentas capazes de representar quase todos os sistemas evolutivos. Sua principal característica é a capacidade das células evoluírem baseando-se apenas nos estados anteriores do sistema celular e na simplicidade de suas regras.

Ainda segundo os autores supracitados, pesquisadores de vários campos utilizaram modelos de autômatos celulares para simular diferentes tipos de aplicações, tais como: biologia evolutiva, dinâmica das reações químicas, sistemas dinâmicos da física ou no comportamento de mercados. Encerraram mostrando que as aplicações hoje existentes são de alguma forma baseadas nos trabalhos de John von Neumann, John Holton Conway e Stephen Wolfram.

### **2.3. Autômatos Celulares no Brasil**

Os Autômatos Celulares têm sido utilizados em todo o mundo, inclusive no Brasil. As pesquisas realizadas com modelagem estão praticamente em todos os segmentos: engenharia, computação, economia e no desenvolvimento urbano.

Este tópico, portanto, descreve alguns estudos desenvolvidos no Brasil, utilizando os ACs como ferramenta de modelagem.

LEÃO *et al.* (2001) estudaram a demanda de disposição de resíduos sólidos na região urbana de Porto Alegre, por meio da modelagem dinâmica do AC

em um ambiente SIG. Apresentaram um método para quantificar a relação entre a demanda e a oferta de terrenos adequados para a disposição de resíduos ao longo do tempo, através de técnicas de modelagem com base em projeções de crescimento da população, expansão urbana e geração de resíduos. O resultado sugeriu a implantação de políticas públicas e tomada de decisão para dimensionar a escassez de terreno para o futuro.

GRIGIO (2008) realizou um estudo intitulado “*Evolução da paisagem do baixo curso do Rio Piranhas-Assu (1988-2024): uso de Autômatos Celulares em Modelo Dinâmico espacial para simulação de cenários futuros*” e buscou conhecer a dinâmica do uso e ocupação do solo do baixo curso do rio Piranhas-Assu. Para tanto, fez uma análise multitemporal entre o passado e presente, e desenvolveu projeções futuras através de simulações. A conclusão do trabalho, dentre outras assertivas, afirmou que o baixo curso do rio Piranhas-Assu não apresentava uma mudança intensa da paisagem. Mostrou, também, que os fatores determinantes para a mobilidade espacial das atividades antrópicas, na área em foco, estavam relacionados à pré-existência de comunidades com vocação agropecuária e à existência de vias de acesso e escoamento.

PERES e POLIDORI (2009) desenvolveram um estudo integrando fatores urbanos, naturais e institucionais por meio de modelos baseados em Autômatos Celulares. Foram feitas simulações em ambiente computacional através do modelo SACI (Simulador do Ambiente da Cidade), capaz de capturar morfologias e processos de mudança no solo, expansões urbanas e modificações ambientais associadas. Os autores concluíram que a modelagem urbana e simulações tiveram caminho promissor nos estudos e que a integração de fatores urbanos, naturais e institucionais poderia auxiliar de modo privilegiado a compreensão do desenvolvimento urbano.

Em seu estudo, FURTADO *et al.*, (2011) abordaram a riqueza de literatura e as experiências com modelos baseados em autômatos celulares, detalhando os princípios teóricos e as possibilidades efetivas aplicadas à economia, urbanismo e políticas públicas.

Os autores supracitados destacaram também as aplicações no desenvolvimento urbano regional, transportes e ressaltou que no Brasil as modelagens que envolvem Autômatos Celulares (AC) são tímidas.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para fundamentar este estudo, o presente capítulo abordará o crescimento urbano através dos Autômatos Celulares e a modelagem dos cenários por meio do Software SLEUTH.

Segundo COSTA (2010), investigações recentes em sistemas abertos e não lineares conduziram à compreensão das cidades como sistemas complexos e evolucionários, sendo as mesmas entendidas como sistemas auto-organizados adequados para a simulação computacional.

O planejamento regional e urbano vem crescendo através de modelos dinâmicos para gerar cenários de apoio à decisão. O AC é caracterizado por fases de transições, onde pode gerar padrões complexos através de simples regras.

LIU (2009) enfatiza que o modelo de AC tem estado na vanguarda de algumas das mais recentes aplicações no domínio do planejamento e gestão territorial, permitindo criar cenários, mitigar problemas e maximizar ganhos.

LI *et al* (2002) comentam que os modelos de AC se tornaram bastante atrativos para simulações em ambiente urbano, constituindo uma poderosa ferramenta para compreender a cidade, vista como um sistema complexo e evolucionário.

#### **3.1. Autômatos celulares e a sua aplicação na modelação de cenários urbanos**

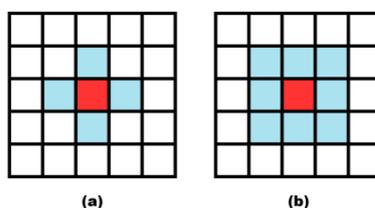
Segundo BATTY (1997), os ACs são modelos que utilizam malha de células retangulares, de forma que as células contíguas ou adjacentes, alteram o seu estado (os seus atributos ou características), através da aplicação repetitiva de regras simples. Entretanto, para uma situação real, as condições geográficas duma área nunca poderão ser uniformes, como a morfologia da paisagem.

O autor destaca que as células podem ser definidas em várias dimensões, no entanto, para aplicações urbanas o formato padrão utilizado são duas dimensões. Os resultados das regras de transição são interpretados como um aumento ou diminuição do crescimento urbano.

Esta mudança é realizada em função do que está acontecendo na vizinhança da célula. Um excelente exemplo disso é o crescimento urbano ou declínio de um bairro em uma cidade.

O AC contém pelo menos cinco características:

- a) *Célula*: é a unidade básica do AC e normalmente é formada pela interseção de linhas e colunas formando uma grade (grid);
- b) *Estado*: Cada célula pode ter apenas um estado a partir de um conjunto de estados em um tempo  $t$ . Nos modelos baseados em AC, os estados das células representam os tipos de uso e ocupação do solo – urbano ou rural;
- c) *Vizinhança*: É o conjunto de células que está interagindo diretamente com a célula selecionada. Num espaço bidimensional, existem dois tipos de vizinhanças (Figura 1): vizinhança de von Neumann, que inclui os vizinhos norte, sul, leste e oeste da célula central em estudo, enquanto que a vizinhança de Moore inclui todas as células ao redor da célula selecionada;



**Figura 1 – (a) vizinhança de Von Neumann (b) vizinhança de Moore;**

- d) *Regras de transição*: É a mudança de um estado de uma célula em resposta ao estado atual e também em relação aos estados das células vizinhas. As regras são essenciais para o desenvolvimento celular e não há limite em termos de quantidade. Além das regras serem extremamente simples, elas podem gerar padrões complexos de desenvolvimento e também ser determinísticas ou aleatórias no comportamento;
- e) *Tempo  $t$* : É a dimensão temporal que existe num sistema de AC, pois todas as células são atualizadas simultaneamente nas iterações com o tempo;

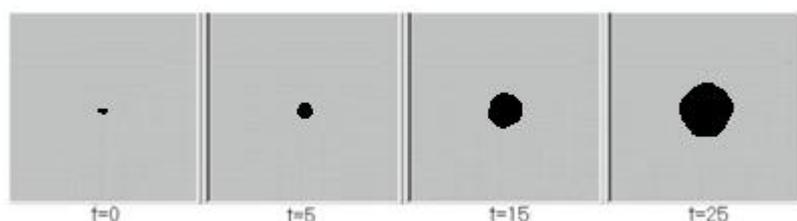
O exemplo a seguir, ilustra de forma simplificada o modelo de desenvolvimento urbano.

Considere uma cidade imaginária construída em um grid bidimensional de células regulares  $n \times n$ , onde cada célula pode ter um dos dois estados possíveis: urbano ou rural. A vizinhança representa a região que impactará o desenvolvimento da célula ativa. As regras de transição determinarão como uma parcela de solo influenciará o seu estado, implicando no processo de desenvolvimento da localidade (COSTA, 2010).

Assumindo as condições sociais, econômicas e ambientais uniformes, as parcelas representam as áreas urbanizadas e o restante das células é considerado área rural. Portanto, o único fator que impulsiona o desenvolvimento ou não da célula central é a quantidade de células vizinhas urbanizadas (LIU *et al* 2001).

O exemplo abaixo descreve como as regras de transição influenciam um bairro de uma cidade.

- **SE** existem três ou mais células urbanas (desenvolvidas) na vizinhança de uma célula não urbanizada, **ENTÃO** a parcela de solo rural será desenvolvida e o estado mudará para urbano (Figura 2).



**Figura 2 – Expansão urbana baseado em AC numa superfície plana**  
Área urbanizada (preto) e área rural (cinza). Adaptado de LIU *et al.* 2001.

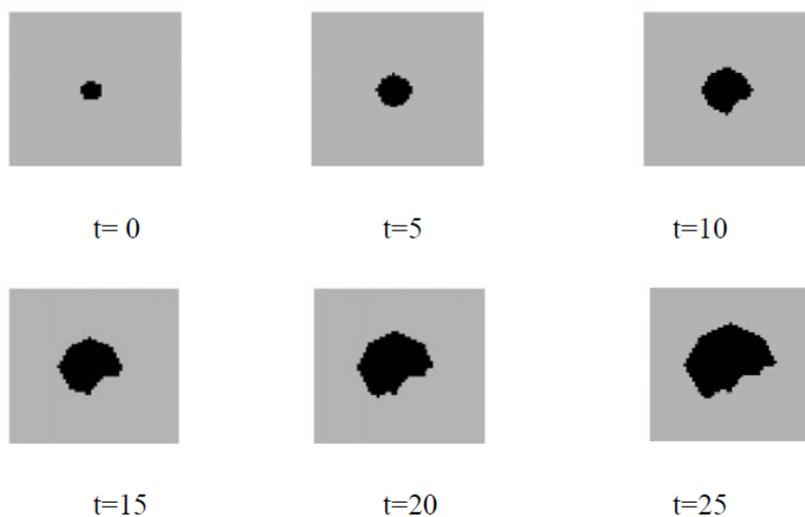
A fim de reduzir os custos na construção de instalações municipais, nesta cidade, o crescimento urbano é restrito às áreas com um relevo de mais de 300 m. Portanto, nenhum desenvolvimento será realizado em células com uma topografia superior a 300 m. Nesta situação, uma nova regra precisa ser implementada no modelo para refletir a restrição do terreno.

Com a nova regra de transição, o modelo gera uma série de cenários de crescimento urbano em diferente tempo  $t$ . Portanto, tem-se:

- **SE** o relevo da paisagem for mais que 300 m, **ENTÃO** a célula permanecerá em estado rural.



(a) Relevo



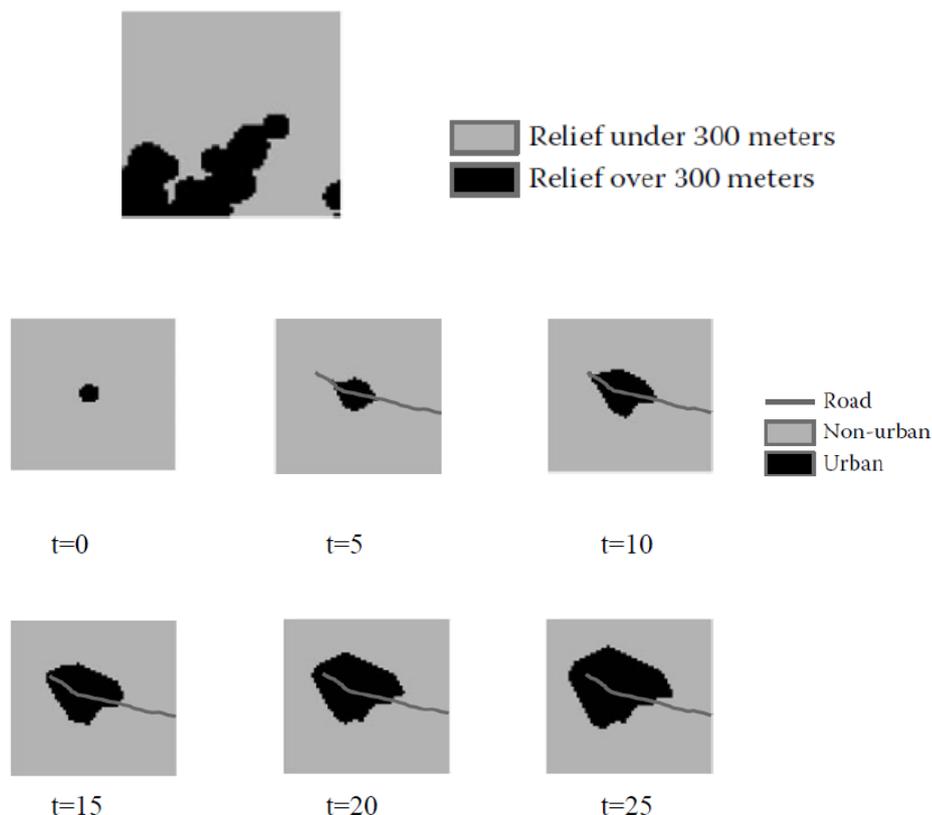
b) Desenvolvimento urbano

**Figura 3 – Expansão urbana com restrição do terreno**  
a) relevo (preto: mais de 300m; cinzento: menos de 300m). b) Desenvolvimento urbano (preto: parcelas urbanas; cinzento: parcelas não urbana; t: período temporal).  
Adaptado de (LIU *et al* 2001).

Com as duas regras atuando, o cenário de crescimento urbano será alterado com o passar do tempo  $t$  (Figura 3).

Outro fator importante que contribui para o crescimento urbano é a malha viária, onde o desenvolvimento é atraído ao longo das vias de transporte. Esta nova regra é acrescentada às já existentes.

- **SE** existe uma ou duas células urbanas na vizinhança de uma célula rural e existe uma via que atravessa essa célula, **ENTÃO** a célula passará do estado rural para o estado urbano (Figura 4).



b) rede de transporte e desenvolvimento urbano

**Figura 4 – Expansão urbana com influência da rede viária**  
a) relevo (preto: mais de 300 m; cinzento: menos de 300 m); b) Rede de transporte (linha cinza); Desenvolvimento urbano (preto: parcelas urbanas; cinza: parcelas não urbana; t: período temporal). Adaptado de LIU *et al.* 2001.

Este exemplo ilustra bem um modelo simplificado de desenvolvimento urbano. Percebe-se como regras simples podem ser aplicadas para simular o comportamento de um sistema urbano complexo num espaço celular.

### 3.2. Vantagens e limitações dos modelos urbanos AC's

Os AC's têm sido cada vez mais utilizados para modelar fenômenos urbanos. A simulação urbana associada ao Sistema de Informação Geográfica (SIG) vieram para simplificar e tornar mais fácil a compreensão e interpretação dos resultados. Entretanto, como em tudo que envolve informações dinâmicas, existem erros e limitações na modelagem urbana.

#### 3.2.1. Vantagens

Como relatado anteriormente, o modelo urbano baseado em autômato celular pode ser construído como uma matriz simples com dois estados – urbano ou

rural e a transição é baseada em regras básicas “*IF-THEN*”. Esta característica não só simplifica o processo de construção do modelo, como também torna mais fácil o processo de compreensão do desenvolvimento do sistema bem como a interpretação dos resultados (COSTA, 2010).

Em razão de suas características de se auto organizarem e auto reproduzirem, os AC's podem gerar padrões espaciais muito complexos a partir de um *design* simples, quando o sistema evolui ao longo do tempo.

Outra vantagem importante é a dinâmica do modelo urbano AC, que costuma concentrar a atenção na simulação dos processos dinâmicos do desenvolvimento urbano e na definição das regras que se concentram mais ou menos no padrão espacial do crescimento urbano, ao contrário da maioria dos modelos convencionais. Esta dinâmica, segundo LIU (2009), se deve às características de como os autômatos celulares fornecem informações no processo de modelagem.

Além disso, o modelo procura explorar a forma como o sistema urbano tende a se desenvolver e como se comporta em determinadas situações, proporcionando, portanto, um ambiente de apoio às experiências “*WHAT-IF*”, permitindo aos modeladores explorar diversos cenários possíveis e agregar informações úteis ao planejamento urbano.

Também os modelos urbanos desenvolvidos a partir de AC, naturalmente relacionados com SIG, podem fornecer dados espaciais como resultados da simulação e podem ser importados pelo SIG para posterior processamento, visualização e armazenamento.

O SIG (CLARKE *et al*, 1998) tem sido uma ferramenta indispensável aplicada à modelagem urbana, sendo praticamente impossível sem os recursos de gestão de dados do SIG, posto que há uma interdependência de dados entre ambos.

### **3.2.2. Desvantagens**

YEH *et al* (2003) relataram em estudo a propagação de erros e incertezas em simulações com SIG, utilizando o modelo urbano de AC. Confirmaram que os

dados contidos no SIG são passíveis de erros e podem “passar” para o modelo estas anomalias. Por exemplo, erros de posicionamento no SIG afetariam a precisão da simulação urbana, causando erros probabilísticos.

Abaixo estão relacionados alguns erros comuns utilizando o SIG com a modelagem urbana AC.

- Transformação de *vector/raster*;
- Transformação *raster/raster* (reamostragem, por exemplo);
- Operações de *overlay* ou *buffer*.

Erros de atributos e levantamento de mapas estão normalmente associados a erros operados pelo usuário.

YEH *et al* (2006) pesquisaram os erros utilizando o AC em modelagem urbana e relataram que os próprios modelos têm incertezas, porque eles são aproximações da realidade, tendo impacto sobre o resultado da simulação. A identificação e avaliação dessas imprecisões são cruciais para compreender e implementar corretamente os resultados da simulação.

Outros erros inerentes aos modelos urbanos podem estar relacionados aos seguintes aspectos:

- Entidades discretas no espaço e no tempo;
- Definições de vizinhança (tipos e tamanhos);
- Estruturas do modelo e regras de transição;
- Valores de parâmetro;
- Variáveis aleatórias (estocásticas).

Os modelos concebidos por intermédio do AC não conseguem lidar com processos que envolvam decisões políticas ou humanas, o que faz com que diminua a taxa de sucesso da simulação.

Portanto, a modelagem urbana utilizando o AC faz apenas a aproximação da realidade e, mesmo que as entradas de dados fossem completamente isentas de erros, poderiam divergir de uma situação real. Ademais, existem outros tipos de erros não produzidos fisicamente durante o processo de captura de dados, que

provêm dos próprios modelos, devido à limitação tecnológica, do conhecimento humano e da complexidade da natureza.

### 3.3. SLEUTH

O SLEUTH é *software* de modelagem urbana que utiliza como ferramenta o Autômato Celular para simular cenários futuros do desenvolvimento urbano em uma determinada área. O nome dado ao programa é um acrônimo como se vê abaixo (SILVA *et al.* 2005).

- *Slope* (relevo);
- *Land use* (uso do solo);
- *Exclusion* (áreas não urbanizáveis);
- *Urban Extent* (manchas urbanas);
- *Transportation* (infraestrutura viária);
- *Hillshade* (exposição solar).

Sua criação e manutenção são de responsabilidade do Departamento de Geografia da Universidade da Califórnia, Santa Barbara – UCSB, através da equipe do professor de Geografia Keith C. Clarke (CLARKE, 1997, 1998).

O *software* é gratuito e faz parte do Projeto Gigalópolis ([www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig](http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig)), desenvolvido na linguagem C, sendo sua última versão a 3.0. Ele “roda” sob o Sistema Operacional LINUX/UNIX ou Cygwin. Este último é um emulador Linux rodando no ambiente Windows.

Este modelo foi adotado para simular esta modelagem, por ser amplamente utilizado em escala regional e ter uma capacidade de se ajustar a diferentes tipos de terreno, bem como uma relativa facilidade de implementação e de cálculo (JANTZ, *et al.* 2003).

O processo de funcionamento do SLEUTH será detalhado no capítulo que trata da metodologia.

#### 3.3.1. Método Monte Carlo (MC)

Este tópico abordará sucintamente o método Monte Carlo (MC), haja vista o *software* SLEUTH utilizá-lo para gerar seus resultados.

O SLEUTH é um modelo estocástico que se baseia em amostragem aleatória e que, através do MC, gera as simulações de crescimento. O MC é requisitado nas etapas de calibração e simulação, onde para cada fase há um número mínimo de ciclos que geram os parâmetros de crescimento (CLARKE *et al*, 1997; JANTZ *et al*, 2010).

### **Histórico**

Segundo BAUER (1958), o método consiste na formulação de um processo estocástico que produz uma variável aleatória, cujo valor esperado é a solução de um determinado problema. Uma aproximação para o valor esperado é então obtida por meio de amostragem, a partir da distribuição resultante.

HAMMERSLEY *et al* (1964) descreveram que o uso real do MC como uma ferramenta de pesquisa originou-se no projeto Manhattan, com o intuito de solucionar problemas de blindagem em reatores nucleares durante a Segunda Guerra Mundial.

Somente a partir de 1948 o modelo se popularizou. Este nome foi dado em homenagem à atividade mais popular de Monte Carlo, no Principado de Mônaco (BAUER, 1958; HAMMERSLEY *et al*. 1964).

### **Princípio do Método Monte Carlo**

SARAIVA (1997) analisa o método MC como sendo o mais conhecido exemplo da aplicação prática do conceito relacionado com a simulação computacional de um experimento aleatório.

A sua utilização requer a geração de N amostras independentes do vetor das variáveis aleatórias X, obtidas a partir da função densidade de probabilidade conjunta  $f_x(X)$ .

A probabilidade de falha é expressa, utilizando o método Monte Carlo, a partir da integral definida abaixo:

$$P_f = \int_{G_x(x) \leq 0} \int \cdots \int f_x(X) dX \quad (1)$$

Ou

$$P_f = \int_{V_X} \int \cdots \int I[G_X(X) \leq 0] f_X(X) dX \quad (2)$$

Onde  $G_X(X)$  é a função de falha, que relaciona as variáveis envolvidas na análise, e a função  $I[\cdot]$  é um indicador que corresponde aos valores apresentados em:

$$I[\cdot] = \begin{cases} 1 & \text{se } G_X(X) > 0 \\ 0 & \text{se } G_X(X) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Reescrevendo a expressão 2, tem-se:

$$P_f = \sum_{i=1}^N I[G_X(X^i) \leq 0] \cdot \frac{1}{N} \quad (4)$$

Onde  $X^i$  representa a  $i$ -ésima amostra do vetor das variáveis  $X$  geradas a partir da função densidade de probabilidade  $f_X(X)$ . O valor de  $P_f$  passa a ser determinado pela expressão abaixo:

$$P_f = \frac{\text{Número de Simulações onde } G_X(X) \leq 0}{N} \quad (5)$$

A variância, para valores pequenos da probabilidade de falha, é expressa em:

$$\text{Var}(P_f) = P_f \cdot \frac{(1-P_f)}{N} \cong \frac{P_f}{N} \quad (6)$$

Como  $\text{Var}(P_f)$  é expressa de forma inversamente proporcional ao número total de simulações, o valor de  $N$  deve ser elevado para que possa obter aproximações aceitáveis de  $P_f$  (PULIDO *et al.* 1992).

Para conhecer o processo de execução do método de uma maneira mais geral, o ciclo é iniciado da seguinte forma:

1. Determine a pseudo-população que representa a verdadeira população de interesse;
2. Aplique uma técnica de amostragem para obter uma amostra da pseudo-população;
3. Calcule o valor da estatística de interesse e armazene a mesma;
4. Repita as etapas 2 e 3  $M$  vezes;

5. Use os  $M$  valores obtidos na etapa 3 para estudar a distribuição da estatística.

BARBOSA (2005) relata que, embora seja fácil a implementação do método, as iterações para um número grande de ciclos pode exigir um tempo de processamento elevado.

#### 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente capítulo descreve, de modo geral, as características da região estudada – a Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu, enfocando sua localização geográfica e fisiografia. Conclui com o uso e ocupação do solo, compreendendo a dinâmica da mancha urbana ao longo dos anos.

##### 4.1. Localização Geográfica

A BHRP está localizada na zona costeira oriental do estado do Rio Grande do Norte, entre os paralelos 5°50'00" e 5°57'53" de latitude sul e os meridianos 35°11'08" e 35°23'19" de longitude oeste de Greenwich (Figura 5), com cerca de 132,1 km<sup>2</sup>, distribuídas ao longo dos municípios de Macaíba, Natal e Parnamirim. A Tabela 1 mostra a distribuição das áreas da bacia de cada cidade.

<b>CIDADE</b>	<b>ÁREA DA BHRP</b>
MACAIBA	6.039,15 ha – (46%)
NATAL	722,28 ha – (5%)
PARNAMIRIM	6.455,15 ha – (49%)
<b>TOTAL</b>	<b>13.216,58 ha – (100%)</b>

**Tabela 1 – Contribuição das áreas na BHRP**

O rio Pitimbu tem extensão total de 33 km, nasce no município de Macaíba, especificamente na comunidade de Lagoa Seca, sendo os 2 km iniciais não perenes. Deságua na Lagoa do Jiqui, município de Parnamirim. Essa bacia é parte integrante do sistema Pirangi, tornando-se um dos tributários.

A disponibilidade hídrica da bacia, de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) (SERHID, 2005), possui volume afluente médio anual estimado em 50 milhões de m<sup>3</sup>/ano, correspondendo a uma vazão média de 3,20m<sup>3</sup>/s. Ainda de acordo com o Plano, o valor da vazão afluente média à lagoa é da ordem de 3,10m<sup>3</sup>/s.

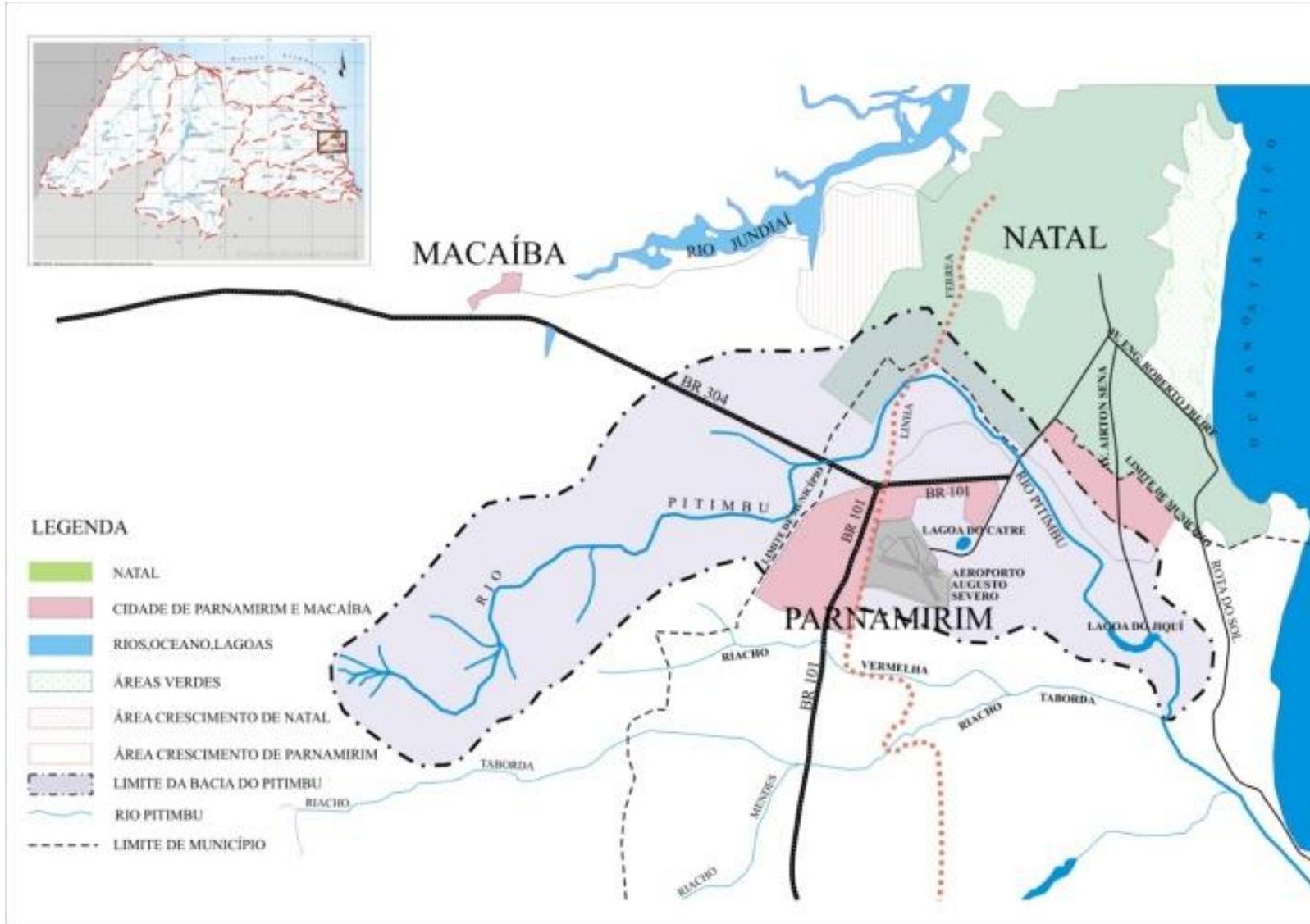


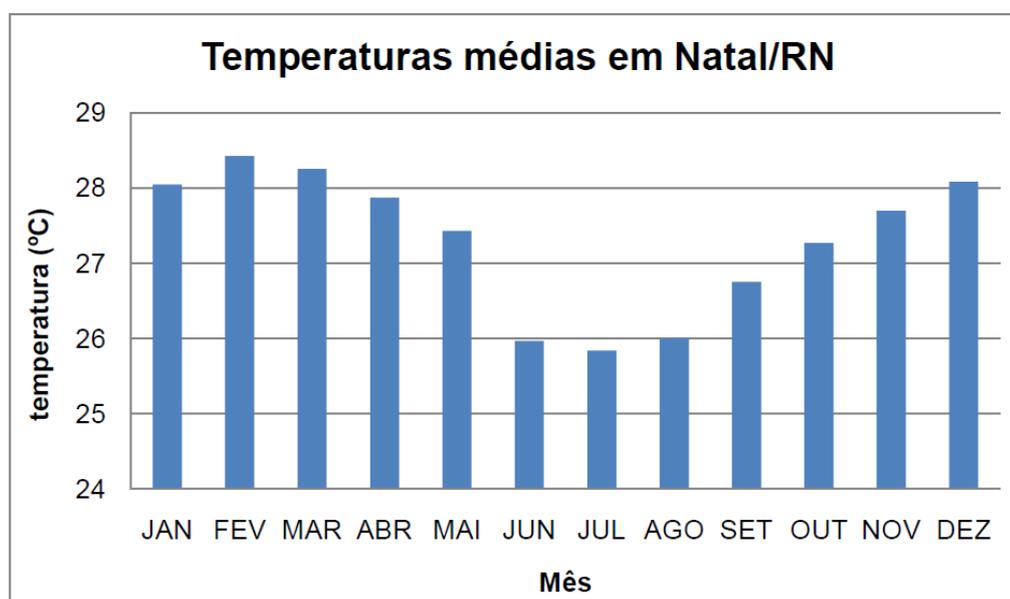
Figura 5 – Localização e Acesso (Adaptado da SERHID, 2005)

## 4.2. Caracterização Fisiográfica

### a) Aspectos Climáticos

As variações climáticas afetam diretamente o comportamento das espécies de plantas, animais e seres humanos.

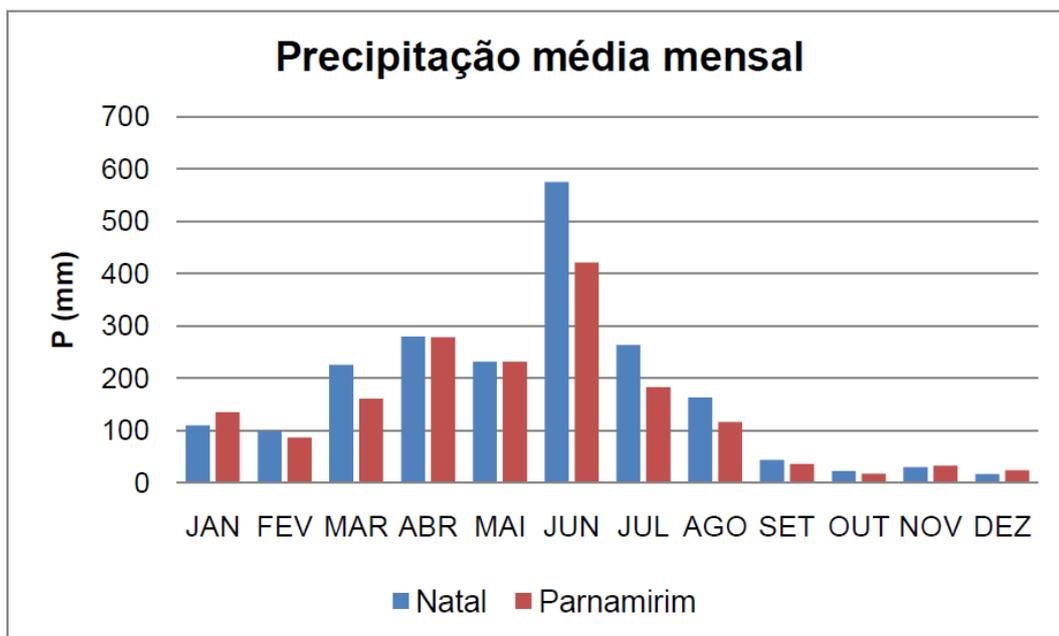
O clima na região da BHRP é classificado como tropical chuvoso com verão seco, temperatura média superior a 18°C do mês mais frio e forte precipitação anual, com chuvas no período de inverno e outono (Gráfico 1).



**Gráfico 1 – Temperatura média de Natal/RN (Fonte: KOBAYASHI, 2009)**

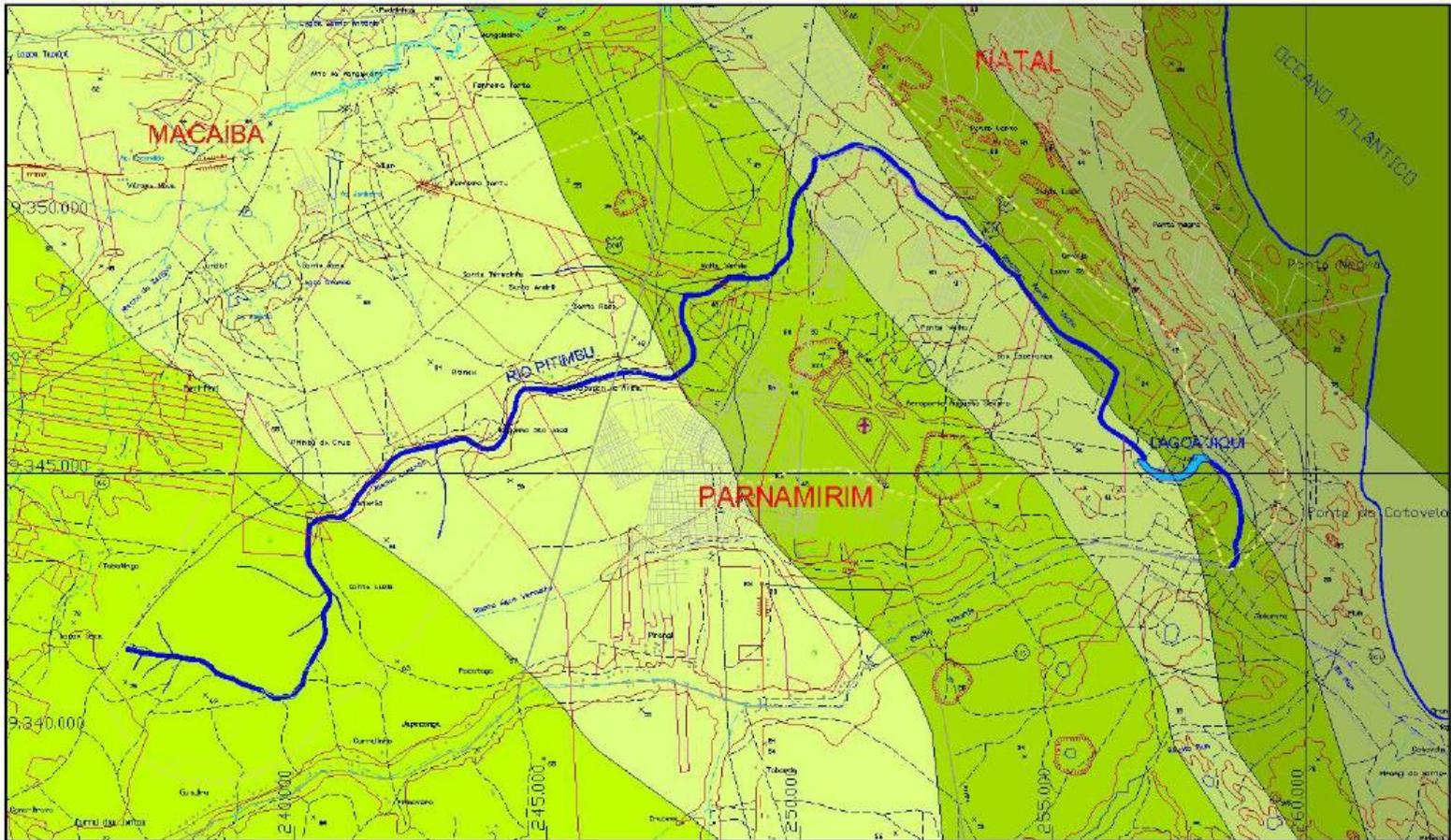
O regime pluviométrico da região caracteriza-se por apresentar concentração das chuvas no primeiro semestre do ano, e variação em anos alternados de seus totais. O trimestre mais chuvoso é o de março/maio, respondendo por 44,8% da precipitação anual. A Figura 6 destaca as isoietas das médias anuais das precipitações da região da BHRP.

No semestre fevereiro/julho, este índice atinge 79,9%. Nos totais anuais de precipitação, a bacia apresenta maiores valores na sua porção Leste, reduzindo ao afastar-se do litoral, em direção ao Oeste. Os meses mais secos são outubro, novembro e dezembro, com o total de precipitação, em média, abaixo de 40 mm (FUNPEC, 1998 apud SENA, 2008). O período úmido engloba os meses de março a julho e o período seco de agosto a fevereiro (Gráfico 2).



**Gráfico 2 – Precipitação média de Natal e Parnamirim/RN (Fonte: KOBAYASHI, 2009)**

Ao longo do ano, a umidade relativa é alta em razão da proximidade do mar e dos ventos carregados de vapor d'água do oceano, que sopram constantemente em direção ao continente (SILVA, 1996). A BHRP exibe uma pequena amplitude térmica em relação às médias mensais ao longo do ano. SILVA (1996) relata que essa pequena amplitude é consequência da baixa latitude, da proximidade do mar e da baixa altitude.



S/ESCALA

**LEGENDA:**

- RIO PERMANENTE
  - · - · - RIO INTERMITENTE
  - - - - BACIA HIDROGRÁFICA
  - LIMITE MUNICIPAL
- |   |         |   |         |   |         |
|---|---------|---|---------|---|---------|
|  | 1300 MM |  | 1600 MM |  | 1900 MM |
|  | 1400 MM |  | 1700 MM |   |         |
|  | 1500 MM |  | 1800 MM |   |         |

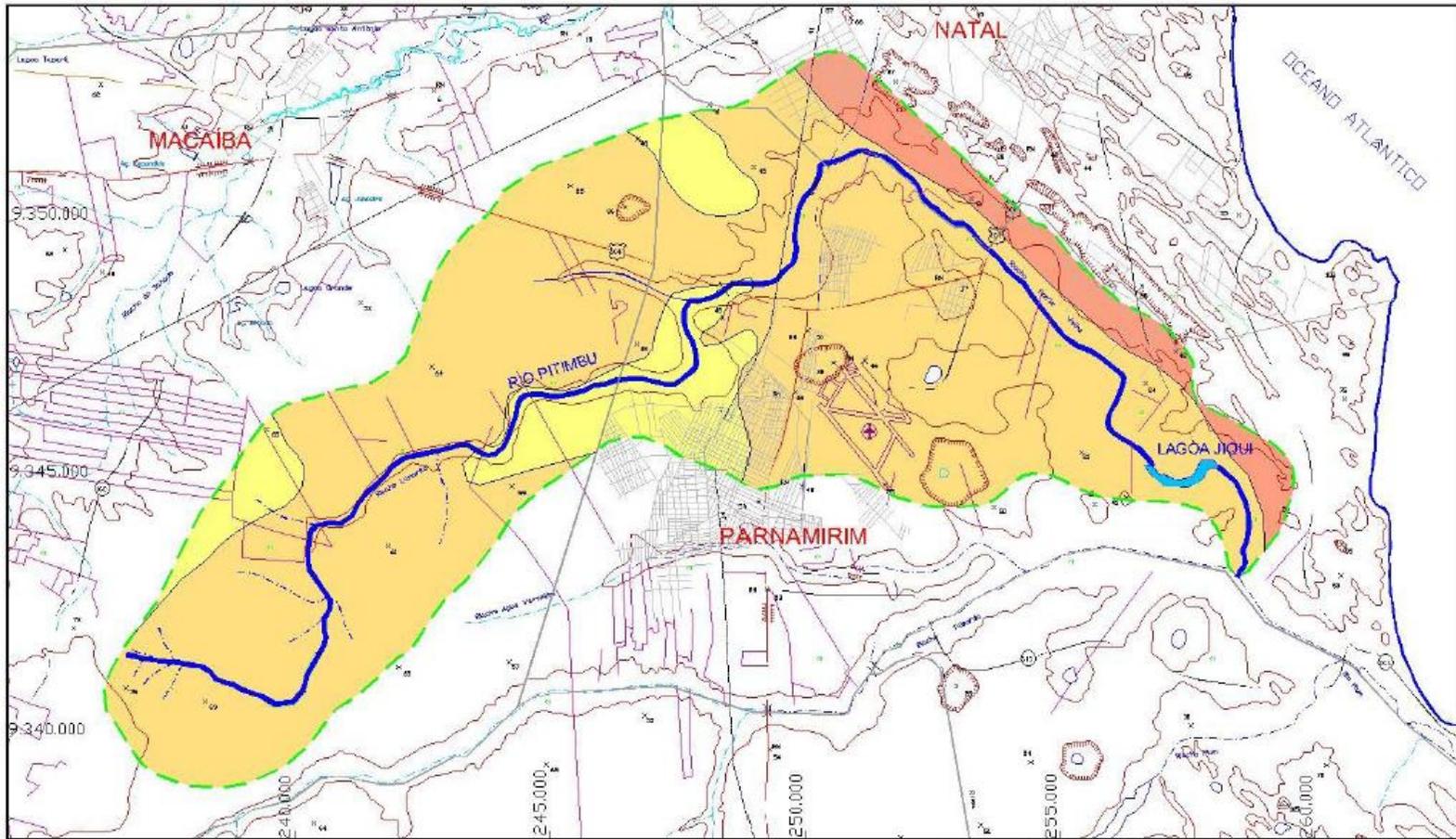
**Figura 6 – Isoietas das médias anuais de chuva, na área de estudo (Fonte: SERHID, 2005)**

## **b) Geologia**

A geologia de superfície da área da bacia do rio Pitimbu compreende três unidades: formação barreiras, depósitos eólicos e aluviões. Em subsuperfície apresenta uma estratigrafia constituída por rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino, sobrepostos por sedimentos areníticos e calcários com idade geológica Mesozóica e período Cretáceo (Figura 7) (SERHID, 2005).

As rochas Pré-Cambrianas e os sedimentos Mesozóicos da bacia sedimentar costeira são recobertas irregularmente pela formação Barreiras, ocorrendo ao longo do litoral brasileiro no trecho compreendido entre os estados do Rio de Janeiro até o Pará, penetrando na baixada amazônica (IPT, 1981).

A BHRP é caracterizada por depósitos aluvionares e sedimentos argilosos, arenosos e cascalhos. Os sedimentos Quaternários (Holoceno) são formações recentes, constituídas por depósitos de diversas origens litológicas, as quais apresentam textura bastante variada, (BARBOSA, 2006).



FONTE: MAPA GEOLÓGICO DO RIO G.DO NORTE, 1998 – Esc.:1/500.000

**LEGENDA:**

- RIO PERMANENTE
- - - RIO INTERMITENTE
- - - BACIA HIDROGRÁFICA
- LIMITE MUNICIPAL
- TQb — GRUPO BARREIRAS
- TQc — PALEOCASCALHEIRAS
- TQd — PALEODUNAS

SEM ESCALA

**Figura 7 – Mapa Geológico da BHRP (Fonte: SERHID, 2005)**

### **c) Geomorfologia**

Quanto ao relevo, a área de interesse é caracterizada por duas regiões distintas. A parte alta da bacia tem altitudes variando entre as cotas 180 m e 45 m, sendo a declividade média de 2,30 m/Km. Já a parte baixa, apresenta altitudes que variam de 4 a 45 m, com declividade de 0,29 m/Km.

Na área objeto de estudo, os aspectos geomorfológicos permitem identificar quatro compartimentos do relevo: leito recente e sub-recente, vertente, tabuleiro e dunas, todos inseridos nas terras baixas.

O tabuleiro costeiro é a unidade morfológica predominante na bacia. Tem característica plana e diferentes ordens de grandezas ou altitudes e com aprofundamento de drenagem (canal de escoamento), geralmente separados por vales de fundo plano.

A continuidade do relevo é quebrada pelo aparecimento de dunas que cobrem grande parte da área. Estas dunas são fixas, elevam-se até 60 m de altura e apresentam-se na margem esquerda do rio, na área do município de Natal em cores brancas, amarelas ou avermelhadas (NUNES, 1996).

As dunas são fixas ou móveis e elevam-se até 60 m de altura, sendo constituídas por Areias Quartzosas, de cores brancas, amareladas e avermelhadas, resultantes de gerações diversas (NUNES, 1996).

### **d) Vegetação**

Segundo COSTA (1995), a cobertura vegetal natural da BHRP é classificada como Savana Florestada, com predominância da restinga.

As espécies inseridas na BHRP correspondem a uma vegetação secundária onde alguma sucessão vegetal ocorreu, caracterizando assim, um ambiente remanescente de Mata Atlântica, apresentando uma composição fitogeográfica que está relacionada com as condições climáticas, topográficas e do solo (BARBOSA, 2006).

A Mata Atlântica vem sendo substituída por vegetação secundária, decorrentes de vários fatores, como o antrópico, que vem modificando a constituição natural desse ecossistema. Com a fixação de grupos humanos deu-se início ao processo de destruição de espécies nativas, com a posterior introdução de culturas, pastagens e edificações.

#### **e) Fauna**

Existe uma série de animais que tem como *habitat* natural a BHRP. Entre eles, o jacaré-de-papo-amarelo, preá e a raposa. Ainda foram encontrados em maior número a falsa-coral, coral-verdadeira, corricampo, cobra-de-duas cabeças, víbora, lagartixa, camaleão e o calango camaleão.

As aves também fazem parte desse ecossistema. Entre elas estão o urubu-de-cabeça-preta, rolinha branca, anum, beija-flor-verde, lavandeira-de-cara-branca, e o galo-de-campina-bigodinho.

Os peixes encontrados foram o muçum, a traíra, o cascudo, o piaui, o jundiá, o cangatí, o maria doce-bagre de água doce e o bebel.

#### **f) Hidrogeologia**

##### **Águas Subterrâneas**

As águas subterrâneas da Bacia do rio Pitimbu são essencialmente compostas por formações sedimentares do aquífero Dunas/Barreiras. O aquífero Dunas se forma nas áreas mais próximas ao litoral, e o Barreiras é predominante nas regiões de alto e médio curso da bacia.

O Aquífero compõe um sistema hidráulico único, composto por um aquífero livre, no qual as dunas exercem a função de transferência das águas de infiltração em direção aos estratos inferiores do Barreiras. Pode apresentar semi-confinamentos e seu nível potenciométrico flutua com as variações sazonais. Mostra-se vulnerável à poluição elevada a muito elevada, dada a excessiva permeabilidade dos solos arenosos (SERHID, 2005).

MELO (1995) elaborou o mapa potenciométrico e constatou que o fluxo subterrâneo em direção ao rio Pitimbu tem gradiente médio de 0,66%, com descarga anual da ordem de  $23,50 \times 10^6 \text{ m}^3$ , considerando uma frente de escoamento de 10 km. A zona principal do aquífero está situada nos setores sul e sudeste do município de Natal, incluindo a faixa do Planalto, San Vale e Ponta Negra, onde se localizam importantes lagoas como Jiqui, Pirangi e Ponta Negra.

Em termos qualitativos, as águas do aquífero Dunas/Barreiras apresentam excelente potabilidade, com níveis de salinidade inferiores a 150 mg/l, não apresentando restrições para o consumo humano (SERHID, 2005). Entretanto, há crescente contaminação por nitrato das águas subterrâneas da bacia do Pitimbu, provocada pelo aporte de efluentes sanitários nas áreas urbanizadas aí existentes. Estudos desenvolvidos (RIGHETTO *et al.* 2005; CABRAL *et al.* 2009) registraram teores elevados de nitrato nas imediações dos bairros Planalto, Cidade Satélite e Nova Parnamirim. A contaminação encontra-se diretamente associada ao avanço das áreas urbanizadas, sendo sua expansão facilitada pelo fluxo subterrâneo/hidrodinâmico do aquífero em direção ao mar e ao vale do rio Pitimbu.

### **Águas Superficiais**

O rio Pitimbu nasce na comunidade de Lagoa Seca, município de Macaíba, e desemboca à jusante da lagoa do Jiqui no riacho Taborda. Constitui-se numa sub-bacia do rio Pirangi (corresponde a 27,62% dessa bacia) e abrange os municípios de Macaíba, Parnamirim e Natal, estando posicionadas nestes dois últimos as áreas urbanizadas.

A Bacia do rio apresenta o formato de um polígono irregular. O rio principal possui 37,0 km de extensão desde sua nascente, desenvolvendo-se no sentido sudoeste/nordeste por longo trecho do seu percurso, até o ponto onde deságua, no rio Taborda, com uma acentuada curva de sudoeste para leste. O rio Pitimbu é perene e alimentado por ressurgências de águas subterrâneas do aquífero Barreiras (SERHID, 2005).

O rio Pitimbu recebe duas denominações ao longo do seu curso: a primeira, riacho Lamarão, que vai da nascente até ao encontro da BR – 304. A

segunda, riacho Ponte Velha, compreende o trecho que parte da BR – 304 até o seu desaguadouro e tem como exutório a lagoa do Jiqui.

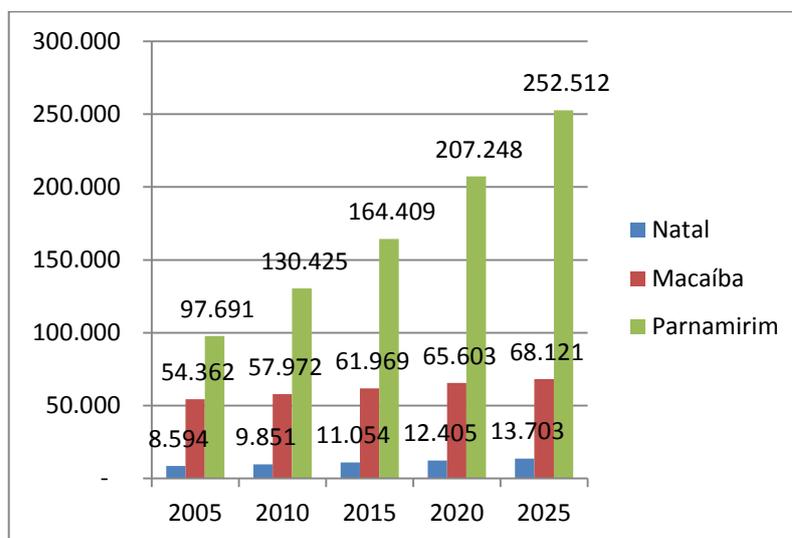
Convém salientar que desde a nascente até a entrada da lagoa do Jiqui, o rio Pitimbu estende-se por 33 km. Nos 13 km iniciais, o rio corta áreas rurais pertencentes ao município de Macaíba. No segundo trecho, próximo à periferia de Natal e Parnamirim, há uma maior ocupação da bacia, percebendo-se a presença de parques industriais e conjuntos habitacionais em direção as suas margens.

O rio apresenta profundidades de até 1,5 m em seu leito maior e ao longo de seu desenvolvimento não é difícil encontrar pequenos barramentos que, em geral, são voltadas para o uso da irrigação.

#### 4.3. Uso e Ocupação do Solo

A ocupação e o uso do solo na BHRP vêm sendo feitos de forma desordenada, sem critérios e sem planejamento que considerem as características e vulnerabilidades da área, de modo a garantir a sua sustentabilidade.

Em 2005 foi realizado um estudo que se baseou no número da população residente de cada município da Bacia, com valores de crescimento demográfico projetados até o ano de 2025, conforme o Gráfico 3 (SERHID, 2005). Nele, percebe-se um crescimento acentuado para o município de Parnamirim, enquanto que nos outros municípios, a taxa de crescimento é bem menor.



**Gráfico 3 – Projeção da população residente na área da Bacia para o ano de 2025**  
(Fonte: SERHID, 2005)

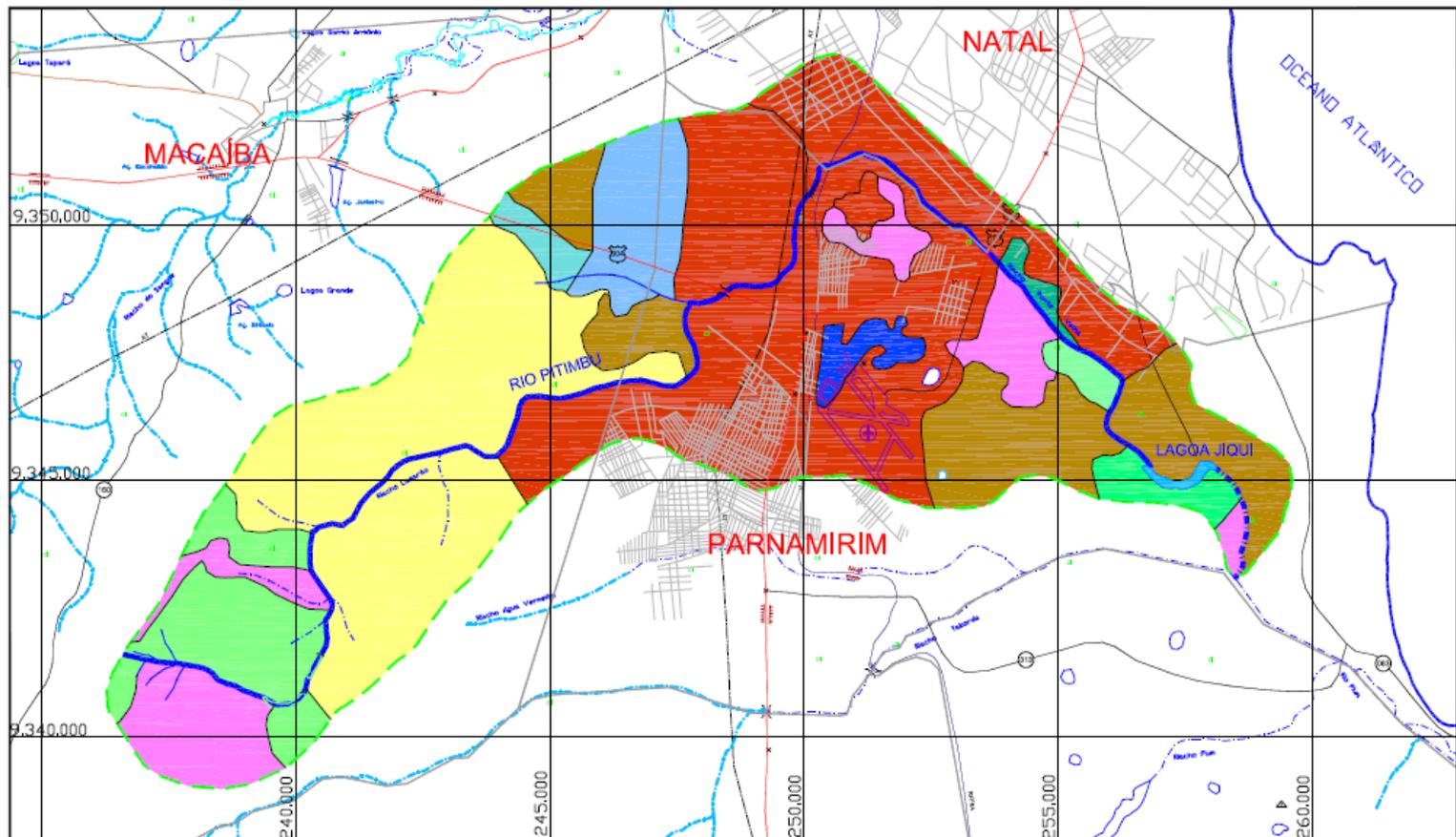
Nesse mesmo estudo foram enumeradas 255 propriedades ao longo de toda faixa de preservação da Bacia. Destas, 81 estão situadas no município de Macaíba, 145 em Parnamirim e 29 em Natal, conforme Tabela 2.

CLASSES	MUNICÍPIOS			TOTAL
	MACAÍBA	NATAL	PARNAMIRIM	
Fazendas/sítios	22	2	10	34
Granjas/chácaras	28	3	42	73
Indústrias	23	0	16	39
Condomínios	0	2	6	8
Público	0	1	8	9
Serviços	1	0	7	8
Residências rurais	3	1	2	6
Propriedades urbanas	0	19	28	47
Apenas identificados – sem cadastro	4	1	11	16
Abandonos	0	0	6	6
Sub-moradias	0	0	9	9
<b>TOTAL</b>	<b>81</b>	<b>29</b>	<b>145</b>	<b>255</b>

**Tabela 2 – Cadastro de usuários da bacia do rio Pitimbu por atividades**

**Fonte: SERHID (2005)**

A Figura 8 exibe a distribuição do uso e ocupação do solo na área da bacia, incluindo as Áreas de Preservação Permanente (APP). Por intermédio das informações do quadro acima, pode-se elaborar a Figura 9 com os tipos de ocupação na BHRP. A Figura 10 mostra as manchas urbanas de 1984 e 2013 da bacia hidrográfica do rio Pitimbu.



**LEGENDA**

 RIO PERMANENTE	 VAAd—Vegetação Arbórea	 ATP—Agricultura Tradicional com cultivo permanente
 RIO INTERMITENTE	 VAHd—Vegetação Arbustiva	 AMp—Agricultura Mecanizada com cultivo permanente
 BACIA HIDROGRÁFICA	 VAHr—Vegetação Arbustiva Herbácea	 SGJ—Sítios e Granjas
 LIMITE MUNICIPAL	 SLa—Solo	 APP—Áreas de Preservação Permanente
	 Ape—Agricultura+Pecuária	 AUR—Áreas Urbanas Residenciais
	 ATpe—Agricultura Tradicional com cultivo misto	 AUCI—Complexo Industrial
	 Ate—Agricultura Tradicional	

FONTE: MAPA GEOLÓGICO DO RIO G.DO NORTE, 1998 – Esc.:1/500.000  
S/ESCALA

**Figura 8 – Mapa do Uso e Ocupação do Solo (Fonte: SERHID, 2005 com alterações)**

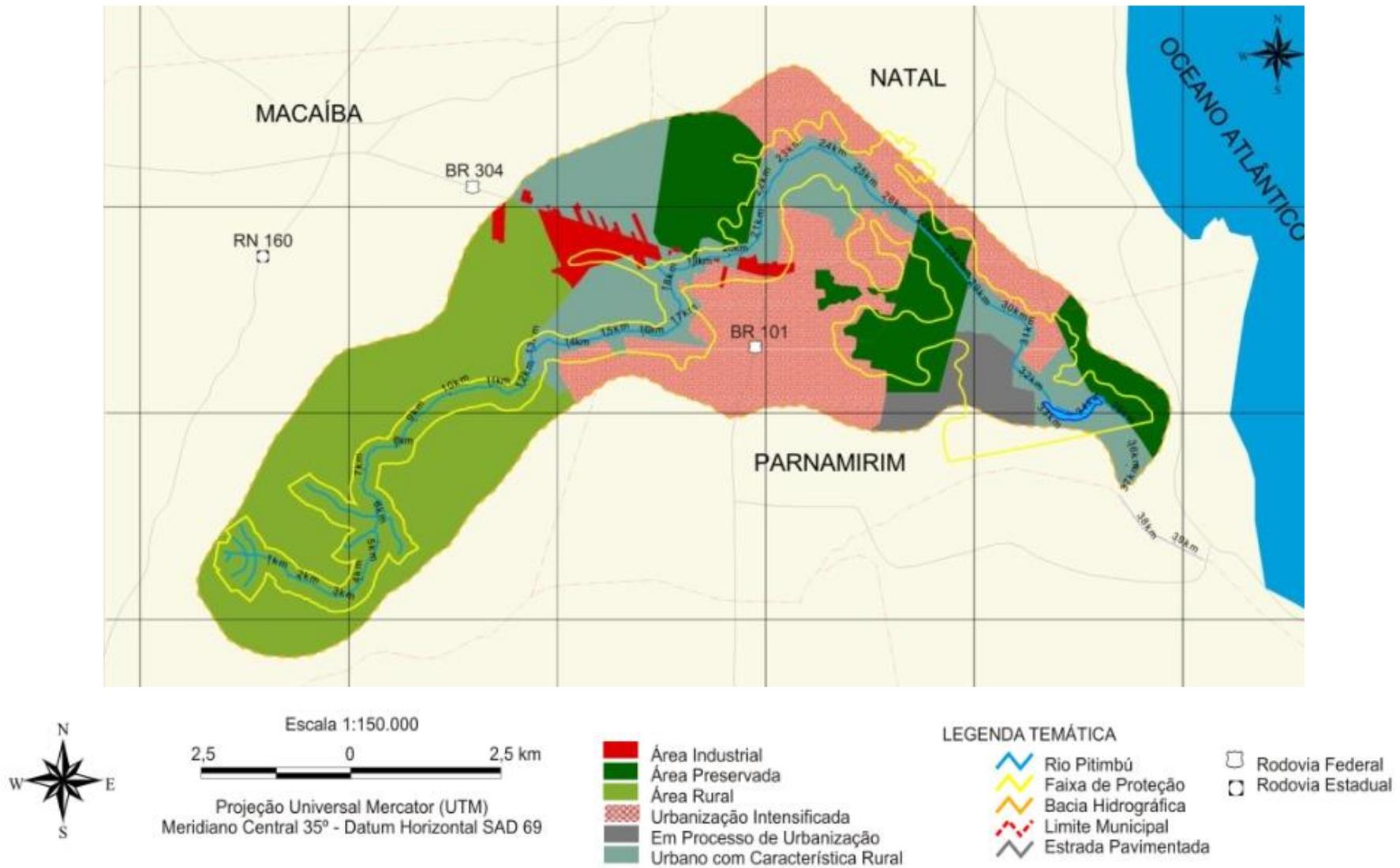


Figura 9 – Caracterização do tipo de ocupação do solo (SERHID, 2005)

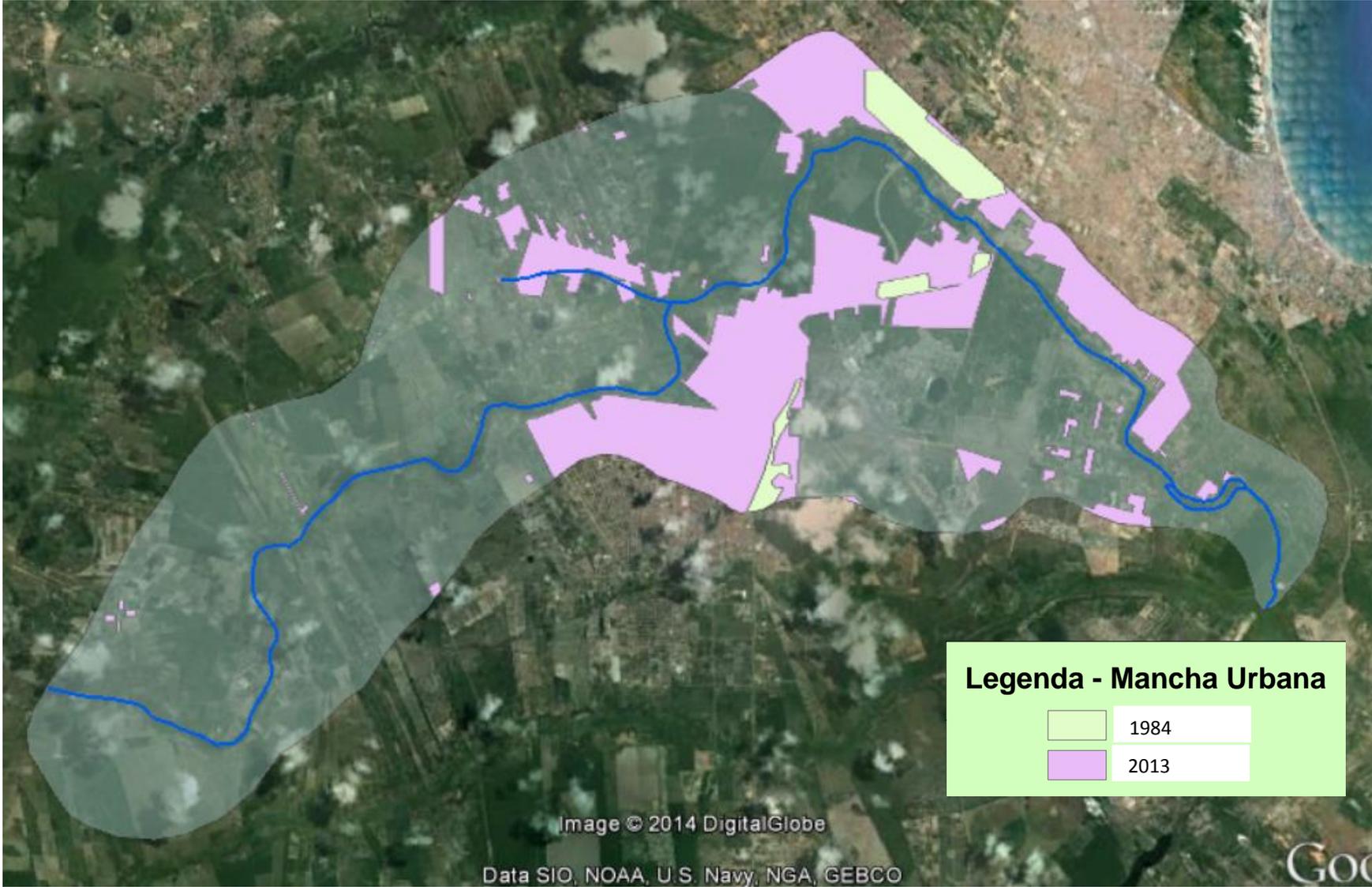


Figura 10 – Mancha urbana, de 1984 e 2013 inseridas na BHRP (Fonte: INPE (2014), GOOGLE (2014))

#### **4.4. Infraestrutura de Saneamento Existente**

##### **a) Abastecimento de água e esgotamento sanitário**

O abastecimento de água nos municípios que compõem a BHRP é o setor da infraestrutura de saneamento que apresenta o melhor índice de atendimento à população, com aproximadamente 100% (CAERN, 2013).

Enquanto a rede de abastecimento de água atinge, atualmente, índices próximos dos 100% nos municípios da BHRP, a rede de esgotamento sanitário é mínima, porquanto não alcança sequer o patamar de 40% das áreas contempladas com abastecimento de água.

Natal é o município com o maior índice de abrangência da rede coletora, beneficiando aproximadamente 35% de suas famílias (CAERN, 2013). No município de Parnamirim, a situação é mais crítica, vez que a rede de esgotamento é praticamente inexistente. Em Macaíba, na região da bacia, apenas o Centro Industrial Avançado (CIA) tem esgotamento sanitário (Figura 11).

Considerando somente a BHRP, o índice da população beneficiada é praticamente nulo, haja vista o CIA não contemplar edificações residenciais.

É importante observar que, integradas a esse processo, existem empresas limpa-fossas que executam as limpezas quando demandadas, descarregando com frequência seus resíduos em locais inadequados, sem a devida supervisão, controle ou fiscalização efetivos dos órgãos competentes. Tal atividade polui e contamina os corpos aquáticos superficiais e o próprio lençol freático. Conseqüentemente, já foram estabelecidos focos de contaminação nos aquíferos em diversos poços de abastecimento de água na região de Natal (SERHID, 2005).

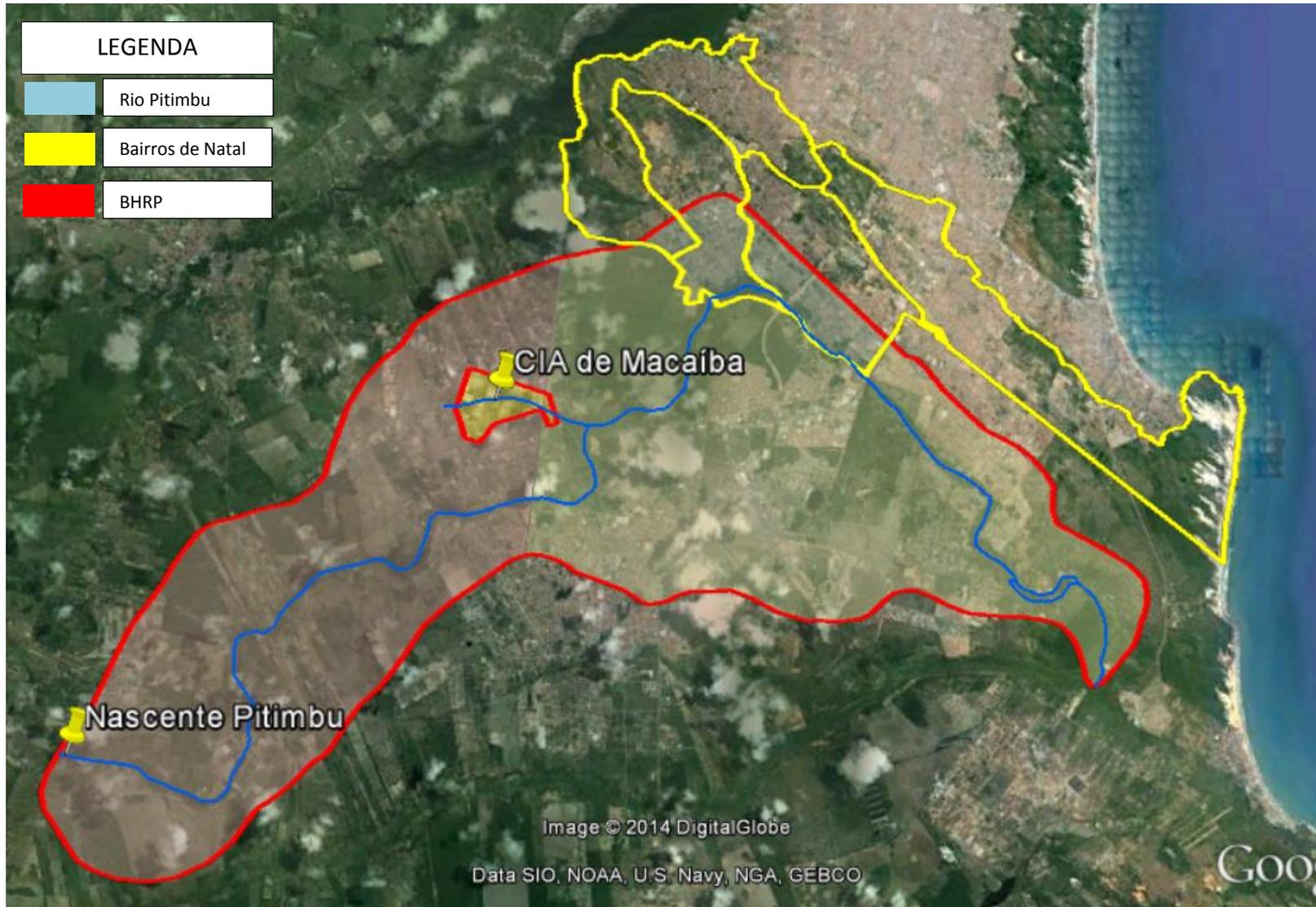


Figura 11 – Centro Industrial Avançado (CIA) de Macaíba - Área com rede de esgotamento sanitário (Fonte: CAERN (2014), GOOGLE (2014))

## **b) Resíduos Sólidos**

Os resíduos sólidos produzidos nos centros urbanos de Natal e Parnamirim têm como destino final o aterro sanitário gerenciado pela Braseco S/A, localizado no município de Ceará Mirim.

Em Macaíba, foi construída recentemente uma estação de transbordo, com o intuito de desativar definitivamente o lixão Pé do Galo, localizado na área da bacia do rio Pitimbu, a 4 km da margem da estrada que liga Macaíba ao município de São Gonçalo do Amarante. Após a desativação, o destino final dos resíduos sólidos será o aterro gerenciado pela empresa supracitada.

Entretanto, para os referidos municípios, a situação da coleta e transporte do lixo domiciliar ainda é deficiente. Ademais, a falta de controle da coleta do lixo hospitalar gera impacto negativo. Todavia, na destinação final a situação é ainda mais crítica, pois ainda persiste o descarte de lixo em locais proibidos ou inapropriados, causando danos ambientais nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

## **c) Drenagem Urbana**

Na região da bacia do rio Pitimbu, o sistema de drenagem urbana é bastante deficiente, quando não inexistente. No município de Parnamirim constata-se, pelo seu alto grau de urbanização, redução drástica das áreas de infiltração, além do subdimensionamento e diminuição de volume de suas bacias de acumulação.

Em Natal, as características peculiares da cidade relativas à distribuição do seu solo e do seu relevo, acarretam problemas gerados pela formação de uma série de bacias sem exutório, o que provoca o surgimento de inúmeros pontos de acumulação de água. Além disso, os sistemas de bombeamento operam precariamente e inúmeras ligações clandestinas de esgotos sanitários nas galerias dificultam ainda mais a solução do problema (SERHID, 2005).

## 5. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido em quatro tópicos. O primeiro concentrou-se no processo de modelagem do SLEUTH. O segundo deteve-se em conhecer os dados históricos necessários à entrada do modelo. Ao passo que o terceiro descreveu o processo de calibração. E finalmente, o quarto delineou a simulação dos cenários futuros.

### 5.1. Processo de modelagem

A modelagem ocorre em duas etapas gerais: a primeira é a etapa de calibração, onde os padrões históricos de crescimento são simulados. A segunda é a previsão dos cenários projetados para o futuro.

Essas etapas foram desenvolvidas por meio do *software* SLEUTH, utilizando o Autômato celular como ferramenta de modelagem. O nome dado ao programa é um acrônimo das palavras *Slope, Land use, Exclusion, Urban Extent, Transportation e Hillshade*.

A área de estudo do SLEUTH é representada por uma grade regular de células (pixels) homogêneas, onde cada célula tem apenas um dos dois estados: urbano ou rural. As células fora da bacia são consideradas inativas (Figura 12).

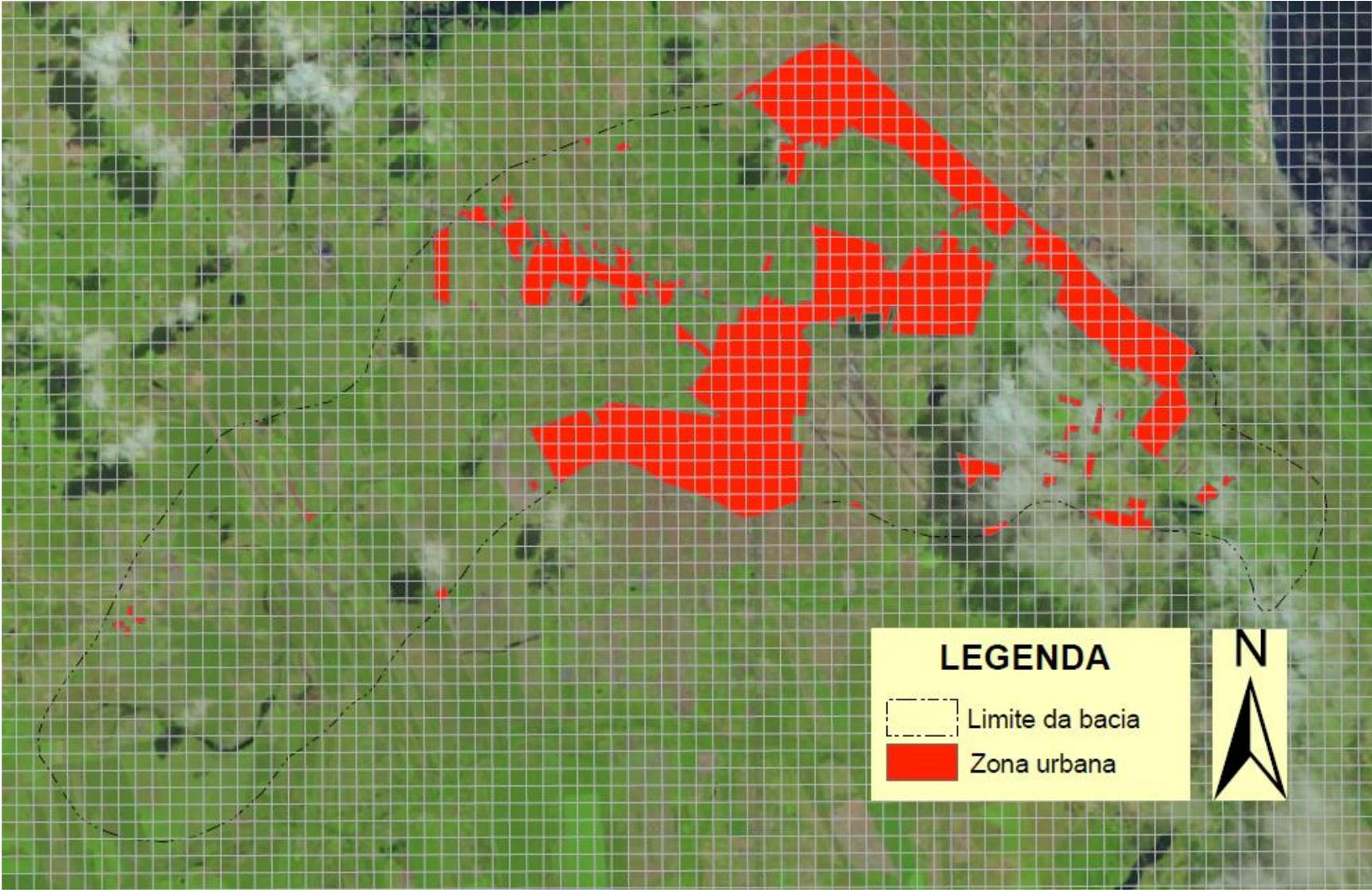


Figura 12 – Mancha urbana de 2013

Além disto, a modelagem conta com quatro regras, onde cada uma simula um tipo de crescimento. São elas: crescimento espontâneo, crescimento difuso e origem de novos centros, crescimento orgânico e crescimento influenciado pela malha viária de transporte.

Essas regras são aplicadas sequencialmente e controladas por meio da interação de cinco coeficientes de crescimento: *dispersion*, *breed*, *spread*, *road gravity* e *slope*.

### 5.1.1. Regras de transição condicionantes

O modelo utiliza as regras de transição para modificar o estado das células. Seguem a descrição do funcionamento dessas regras.

#### a) Crescimento espontâneo

Esse tipo regra ocorre de forma aleatória. Isto significa que qualquer célula rural é uma candidata a se tornar urbanizada em qualquer espaço de tempo. O comportamento dessa regra é controlado pelo coeficiente *dispersion* (Figura 13).

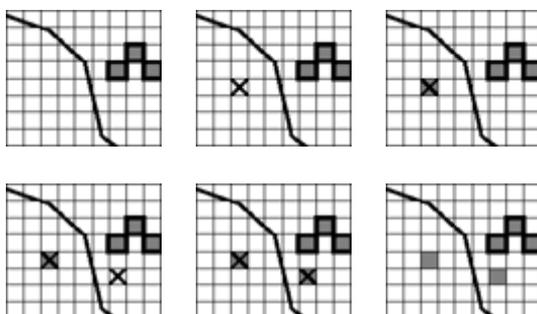
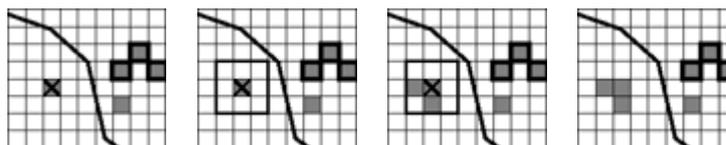


Figura 13 – Ilustração do crescimento espontâneo (Fonte: Project Gigalopolis – 2013)

#### b) Crescimento difuso e origem de novos centros urbanos

Esta regra é aplicada nas células urbanizadas espontaneamente. O coeficiente *breed* definirá a probabilidade do surgimento de um novo centro de expansão. Estes novos centros serão criados a partir das células urbanizadas pela regra anterior (Figura 14).

Para duas células vizinhas disponíveis para urbanização, o coeficiente *slope* determina a probabilidade ponderada da declividade local.

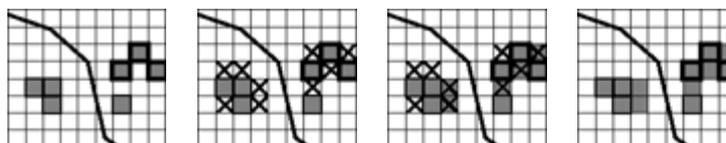


**Figura 14 Ilustração do crescimento difuso de centros urbanos**

(Fonte: Project Gigalopolis – 2013)

c) Crescimento orgânico

Este tipo de crescimento nasce a partir dos centros em expansão. Caso uma célula rural tenha pelo menos três células vizinhas urbanizadas, há possibilidade desta célula ser urbanizada (Figura 15). O coeficiente *spread* controla esta regra.



**Figura 15 – Ilustração do crescimento orgânico**

(Fonte: Project Gigalopolis, 2013)

d) Crescimento influenciado pela malha viária de transporte

Esta regra se desenvolve da seguinte forma: (1) as células recém-urbanizadas (da regra anterior) são selecionadas aleatoriamente (a partir do coeficiente *breed*); (2) para cada célula selecionada é feita uma varredura, à procura de estradas num determinado raio de distância; (3) se existir estrada dentro desse raio (determinada pelo coeficiente *road gravity*), uma célula é selecionada temporariamente e percorre aleatoriamente essa via (determinada pelo coeficiente *dispersion*), até encontrar uma célula favorável ao crescimento; (4) a localização desta célula é finalmente considerada como um novo núcleo de expansão urbana (Figura 16).

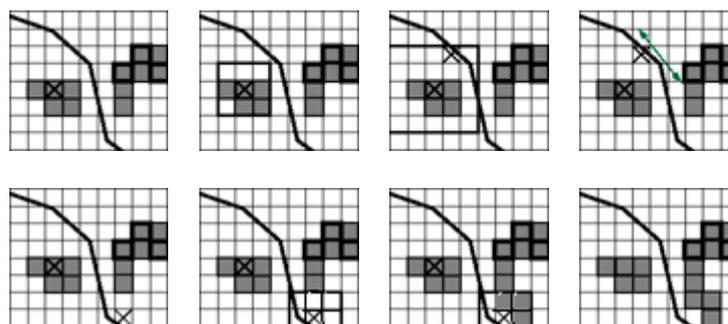


Figura 16 – Ilustração do crescimento influenciado pela rede viária

(Fonte: Project Gigalopolis, 2013)

e) Crescimento *Slope*

Este coeficiente representa a influência da topografia sobre o desenvolvimento urbano, e é aplicado como um teste antes de qualquer célula ser urbanizada. Caso o valor deste coeficiente seja alto, a probabilidade da célula se tornar urbanizada diminuirá, por se situar em encostas íngremes.

Na Tabela 3 consta um resumo das regras de crescimento do SLEUTH.

Tabela 3 – Tipos de crescimento simulado pelo modelo SLEUTH

Ordem do ciclo de crescimento	Tipos de crescimento	Coeficientes de controle	Descrição
1	espontâneo	<i>dispersion</i>	seleciona aleatoriamente novas células com potencial para o crescimento
2	difuso e origem de novos centros	<i>breed</i>	crescimento de centros urbanos a partir do crescimento espontâneo
3	orgânico	<i>spread</i>	crescimento a partir de centros urbanos existentes
4	influenciado pela malha viária de transporte	<i>road gravity, dispersion, breed</i>	células recém urbanizada gera crescimento ao longo malha viária de transporte.
Atua nos quatro ciclos de crescimento	declividade	<i>slope</i>	efeito da declividade na redução da probabilidade de urbanização

Para este estudo, os valores dos coeficientes foram atribuídos por meio da calibração (descrita em seção específica), e por padrão variam entre 0 e 100.

Além das cinco regras de crescimento, o modelo conta com um segundo nível de regras de comportamento, chamadas “*self-modification*”. São regras

requisitadas pelo sistema quando há uma taxa de crescimento excepcionalmente alta ou baixa.

O exemplo disso é o *boom* imobiliário, quando a taxa de crescimento estiver acima de um limite crítico específico, os coeficientes são multiplicados por um fator maior que um, simulando um ciclo de crescimento alto. Igualmente, se a taxa de crescimento ficar abaixo do limite crítico, os coeficientes serão reduzidos por um multiplicador inferior a um, simulando um sistema de depressão (*bust*).

Não serão abordadas neste estudo as regras *self-modification* por não estarem bem documentadas. Não se explica, por exemplo, como o usuário pode determinar os limites críticos. Entretanto, foram utilizados os valores padrões do SLEUTH.

### 5.1.2. Métricas

Após cada fase de calibração, o SLEUTH calcula 14 medidas estatísticas para a análise e acompanhamento do desenvolvimento urbano que são chamadas de métricas.

DIETZEL e CLARKE (2007) fizeram algumas simulações para selecionar as melhores medidas estatísticas, visto que não havia consenso entre os pesquisadores. Os autores concluíram que as melhores métricas são: *compare*, *pop*, *edges*, *clusters*, *slope*, *x-mean* e *y-mean*.

Portanto, para esta modelagem, somente serão levadas em conta as métricas supracitadas (Tabela 4).

O valor de cada métrica varia entre 0 e 1 sendo 1 o ajuste perfeito.

Tabela 4 – Descrição das métricas (Fonte: DIETZEL *et al.*, 2007)

NOME	DESCRIÇÃO
<b>Compare</b>	É relação da população modelada e a população real para os anos de controle (em <i>pixels</i> );
<b>Pop (<math>r^2</math>)</b>	É a relação entre a modelagem urbana e a urbanização real para os anos de controle, em <i>pixels</i> (regressão do método dos mínimos quadrados);
<b>Edges (<math>r^2</math>)</b>	É a relação entre a modelagem do crescimento urbano periférico e o crescimento urbano periférico real para os anos de controle, em <i>pixels</i> (regressão do método dos mínimos quadrados);

NOME	DESCRIÇÃO
<b>Clusters (<math>r^2</math>)</b>	É a relação entre a modelagem do crescimento de agrupamentos urbanos e do crescimento de agrupamento urbano real para os anos de controle, em pixels (regressão do método dos mínimos quadrados);
<b>Slope</b>	Inclinação média das células urbanizadas;
<b>X-Mean</b>	A média dos <i>pixels</i> urbanos dos valores da coluna x;
<b>Y-Mean</b>	A média dos <i>pixels</i> urbanos dos valores da coluna y;

## 5.2. Dados Históricos

Para a etapa de calibração são necessárias informações históricas de anos passados, com objetivo de ajustá-la mais próxima possível da realidade. Os dados requeridos são os seguintes:

- Quatro arquivos da mancha urbana;
- Dois arquivos contendo a malha de rodovias;
- Um arquivo das áreas não urbanizáveis;
- Um arquivo da topografia;
- Um arquivo do relevo.

As imagens adquiridas foram geradas partir do satélite *Landsat* e cedidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O Sistema de Coordenadas utilizado para o tratamento dos arquivos foi o DATUM WGS84, WGS\_1984\_UTM\_Zone\_25S.

Faz-se necessário lembrar que a resolução original das imagens era de 30 m, entretanto, elas foram reclassificadas para a resolução de 100 m. O propósito dessa ação foi o de tentar minimizar os custos computacionais, pois quanto maior a resolução maior seria a necessidade de um processamento mais robusto.

Estas imagens foram importadas para o ambiente SIG (*ArcGis v10*), vetorizadas, georreferenciadas, convertidas em arquivos *raster* e exportadas para o formato GIF-8 bits. O resultado desse procedimento são arquivos “gif” em tons de cinza com dimensões 233 x 143 (colunas x linhas) e resolução 100 x 100 metros.

É importante lembrar que os *pixels* do arquivo tipo *raster* devem variar entre 0 e 100 e todos os arquivos devem ter as mesmas dimensões. Os mapas resultantes dessa exportação são arquivos binários. Essa variação de cor é pré-requisito para o modelo.

### 5.2.1. Manchas urbanas

As manchas urbanas selecionadas para este estudo foram as de 1984, 1992, 2004 e 2013. O primeiro ano é usado como semente (*seed*) e os outros anos definidos como “anos de controle”, para medir os valores estatísticos.

Para o modelo, os *pixels* brancos são considerados áreas urbanizadas enquanto que os pretos, áreas desprovidas de urbanização ou limitadas ao crescimento (Figura 17).

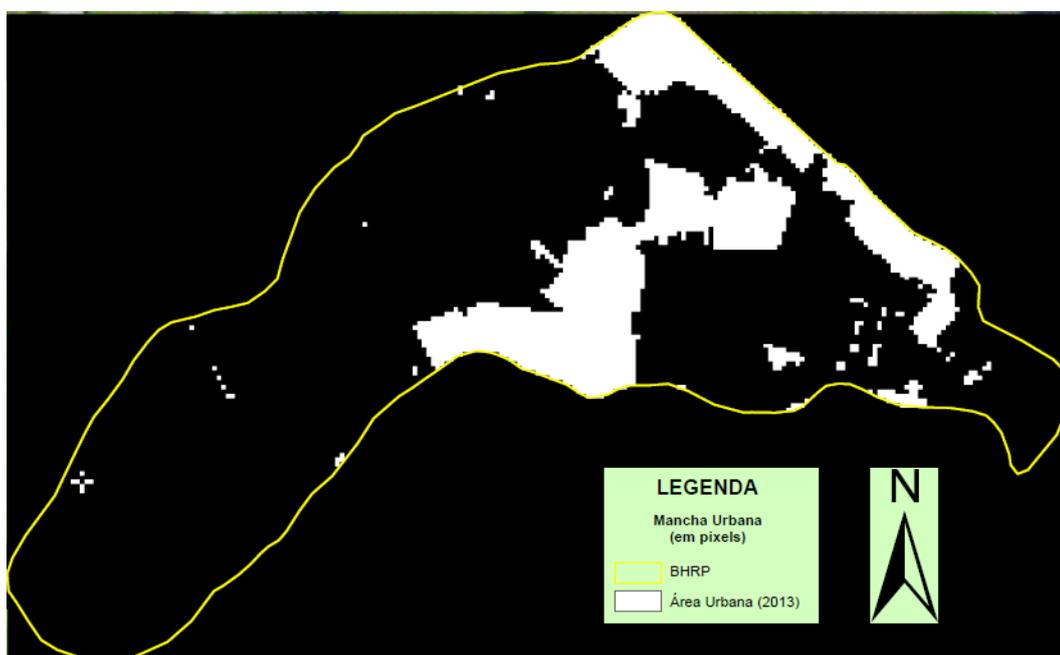


Figura 17 – Área urbana de 2013 (em pixels)

### 5.2.2. Malhas viárias de transporte

As malhas viárias selecionadas foram as dos anos 2004 e 2013. Esses arquivos representam importantes papéis no desenvolvimento urbano, haja vista influenciarem o crescimento ao longo das rodovias.

Foram escolhidas as principais rodovias que cortam BHRP e a estrada próxima da nascente do rio Pitimbu. São elas: BR 101, BR 304, prolongamento da Avenida Prudente de Moraes, rua Dr. Francisco de Sá, Avenida Olavo Lacerda Montenegro, estrada de Pium e estrada do Lamarão (Figura 18).

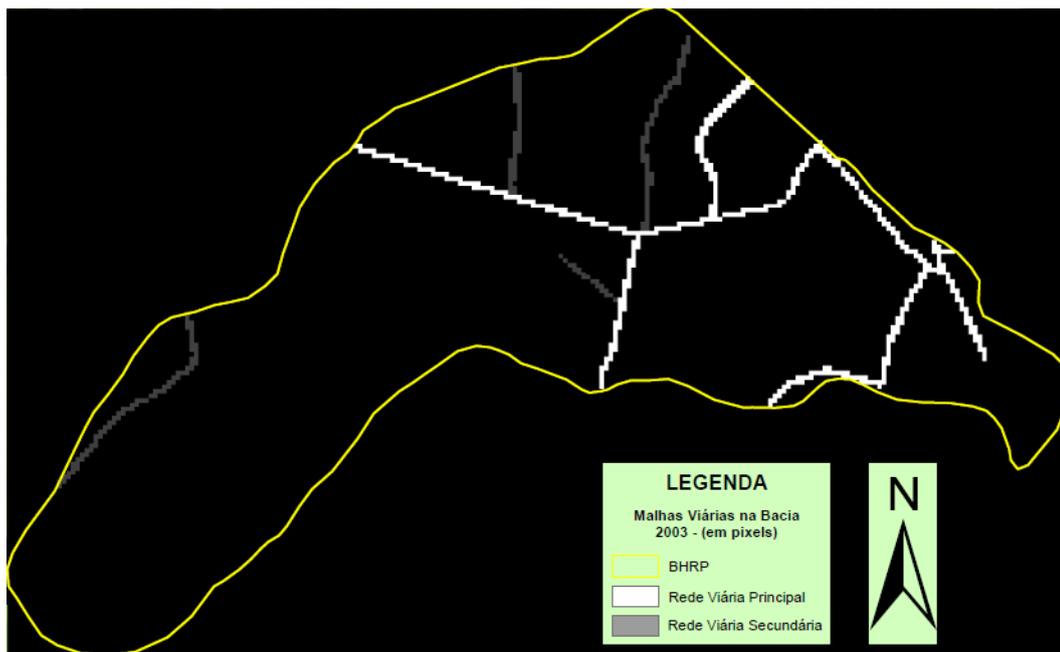


Figura 18 – Malha viária dentro da BHRP (em pixels)

### 5.2.3. Declividade (topografia)

O *raster* da topografia foi selecionado a partir de imagem de satélite da base cartográfica da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), por meio do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM (MIRANDA, 2005).

Os pixels são em tons de cinza e variam entre 0 e 100. Esse raster deve ficar em percentual e não em graus (Figura 19).

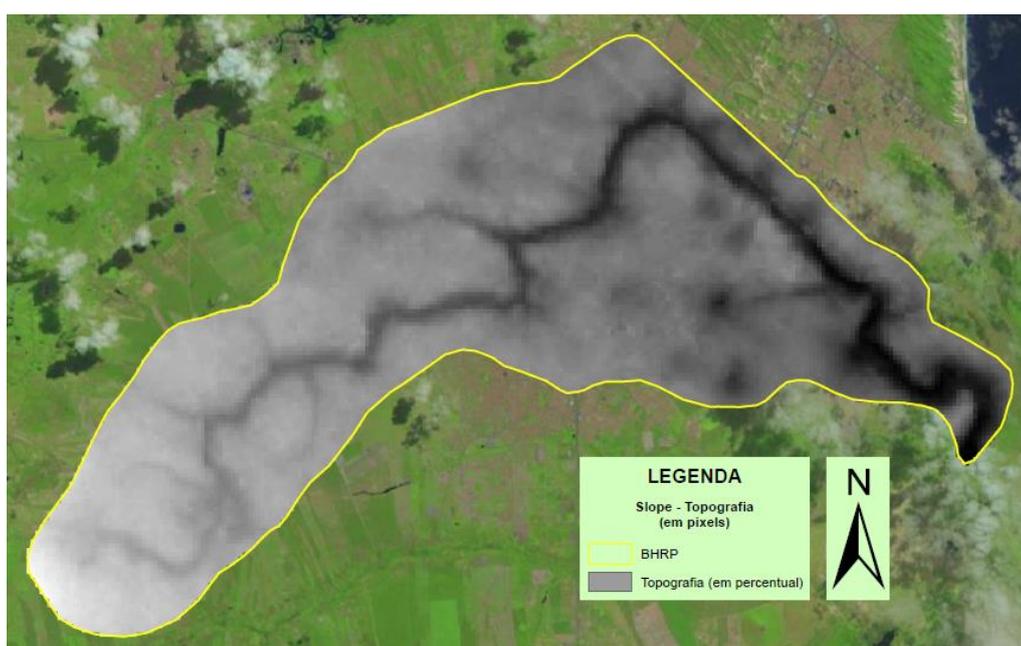


Figura 19 – Topografia da BHRP

#### 5.2.4. Áreas não urbanizáveis

A camada de exclusão é usada para restringir o crescimento urbano. As áreas como Zonas de Proteção Ambiental (ZPAs), Áreas de Preservação Permanente (APPs), parques nacionais ou lagos fazem parte desta restrição. Nesse estudo foram excluídos o rio Pitimbu com suas margens, áreas militares, aeroporto, ZPA 3, distritos industriais e a mata de Emaús (Figura 20).

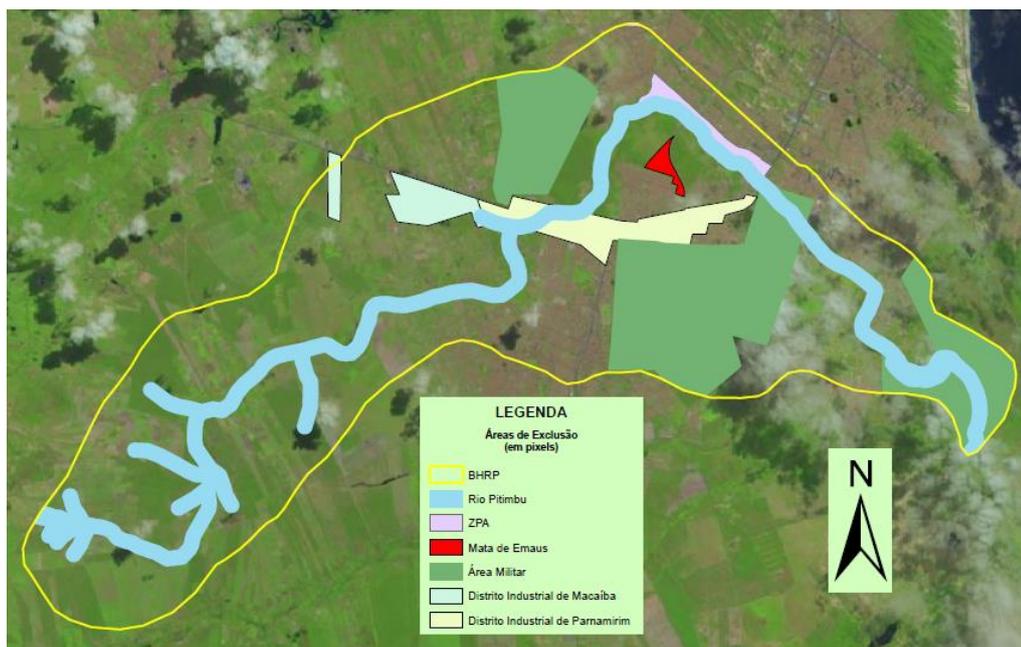


Figura 20 – Área de Exclusão urbana

#### 5.2.5. Relevo sombreado (hillshade)

O *raster* requerido pelo modelo serve apenas para fins de visualização, como uma imagem de fundo, e não desempenha papel na determinação do comportamento dos resultados. O modelo exige que a imagem seja em tons de cinza (Figura 21).

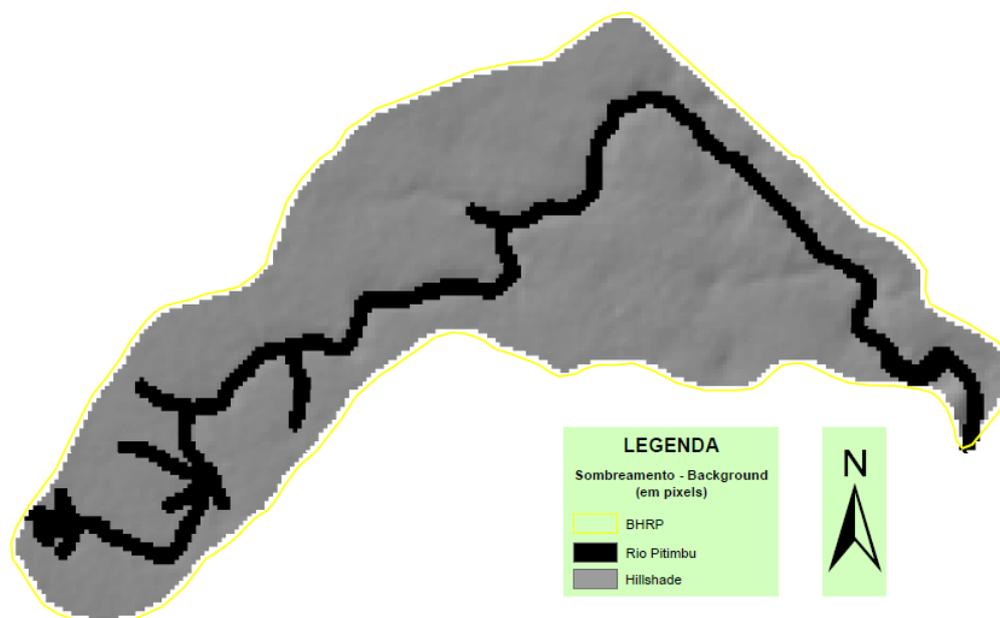


Figura 21 – Sombreamento da Bacia

### 5.3. A calibração do modelo

O objetivo da calibragem foi o de encontrar um conjunto de valores para os parâmetros de crescimento (*dispersion*, *breed*, *spread*, *slope* e *roads-gravity*) para serem aplicados na simulação de cenários futuros.

A calibração do modelo é a etapa mais importante para o sucesso da simulação. Ela determina os parâmetros iniciais que serão executados na modelagem.

Esses valores foram calculados a partir dos anos históricos (1984 – 2013) através do método Monte Carlo. Esse método consiste em percorrer o período desses anos fazendo combinações para os valores dos coeficientes de crescimento, comparando sempre com o padrão de crescimento histórico.

O processo de calibração se constitui de três fases: a fase grosseira (*coarse*), média e final e é complementada com a etapa chamada *forecast*, que consiste em selecionar os parâmetros que serão usados na simulação dos cenários (Figura 22).



Figura 22 – Etapas da calibração até a simulação

### 5.3.1. Fase grosseira

A finalidade desta fase é gerar os coeficientes de crescimento, utilizando os dados históricos para serem aplicados na próxima etapa. Antes de rodar a fase de calibração, foram feitos os ajustes de configuração, da seguinte forma:

1. O arquivo padrão da configuração do SLEUTH foi copiado e renomeado para “*scenario.pitimbu100\_coarse*”;
2. Alterou-se o *flag INPUT\_DIR*, para incluir a pasta onde estão os arquivos “gif”;
3. Alterou-se o *flag OUTPUT\_DIR* para incluir a pasta de saída dos resultados;
4. Atribuiu-se o valor 5 para o *flag MONTE\_CARLO\_ITERATIONS*, conforme recomendação do manual do modelo;
5. Definiram-se as configurações dos coeficientes iniciais para calibração. Para essa fase, recomenda-se configurar todos os coeficientes para {1 – 25 – 100} (Tabela 5), onde o primeiro número é o valor *start*, o segundo é *step* e o terceiro *stop*. O valor desses coeficientes podem variar entre 1 e 100;

**Tabela 5 – Valores recomendados pelo manual do SLEUTH.**

COEFICIENTE	{START – STEP – STOP}
<i>Dispersion</i>	{1 – 25 – 100}
<i>Breed</i>	{1 – 25 – 100}
<i>Spread</i>	{1 – 25 – 100}
<i>Slope</i>	{1 – 25 – 100}
<i>Road gravity</i>	{1 – 25 – 100}

Após a conclusão da configuração, seguiram-se os passos para a execução da calibração.

6. Executou-se a calibração com a seguinte linha de comando: **grow.exe calibrate scenario.pitimbu100\_coarse <ENTER>**. Dependendo da configuração do computador, a execução pode durar horas, dias e até semanas. Para este caso, o processo durou pouco mais de duas horas;
7. Após o processo de calibração, seguiu-se a análise dos resultados preliminares.

Durante esse processo, o SLEUTH calculou os coeficientes e gravou essas informações no arquivo “*control\_stats.log*”.

A análise desse arquivo foi feita da seguinte forma (Figura 23):

8. Escolheu-se uma métrica para ser estudada e, a partir dela, encontrar o conjunto dos melhores coeficientes;
9. Classificaram-se os dados em ordem decrescente para a métrica escolhida;
10. Selecionaram-se os coeficientes mínimos e máximos (*start*, *stop* respectivamente), a partir das três primeiras linhas;
11. A variável *step* é usada como incremento entre valores mínimos e máximos. Deve ser incluída pelo usuário.

**Tabela 6 – Exemplo dos Resultados da calibração.**

COEFICIENTE	{START – STOP}
<i>Dispersion</i>	{1 – 1}
<i>Breed</i>	{51 – 76}
<i>Spread</i>	{1 – 1}
<i>Slope</i>	{51 – 51}
<i>Road gravity</i>	{1 – 76}

Com os dados dos coeficientes em mãos, seguiu-se então para a próxima fase.

Run	Product	Compare	Pop	Edges	Clusters	Cluster Size	<i>sort value</i>	<i>initial coefficient values</i>										
							Leesalee	Slope	%Urban	Xmean	Ymean	Rad	Fmatch	Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
696	0.09178	0.70813	0.9958	0.99999	0.62293	0.92098	<b>0.50055</b>	0.965	0.9846	0.65794	0.99831	0.99859	0.7273	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>11</b>	<b>87</b>	<b>1</b>
697	0.09178	0.70813	0.9958	0.99999	0.62293	0.92098	<b>0.50055</b>	0.965	0.9846	0.65794	0.99831	0.99859	0.7273	1	3	11	87	10
698	0.09178	0.70813	0.9958	0.99999	0.62293	0.92098	<b>0.50055</b>	0.965	0.9846	0.65794	0.99831	0.99859	0.7273	1	3	11	87	20
435	0.11017	0.69032	0.9969	0.99991	0.62174	0.95949	<b>0.49951</b>	0.91687	0.98605	0.89465	0.91054	0.99921	0.7301	1	2	11	81	30
933	0.10363	0.77654	0.99716	1	0.5881	0.85638	<b>0.49902</b>	0.95635	0.98816	0.78703	0.98132	0.99911	0.73023	1	4	11	78	30

Figura 23 – Arquivo “control\_stats.log” com a métrica Lee Salee selecionada

(Fonte: Project Gigalopolis, 2014)

run	year	index	sng	sdg	og	rt	pop	edges	clusters	cl_size	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav	%urban	grw_rate	leesalee	grw_pix
0	1950	1	1.15	0.1	22.27	2.28	993.09	490.46	64.65	15.02	1.2	13.13	3.58	80.95	1.61	4.72	2.59	0.58	25.8
0	1970	2	1.55	0.1	38.09	4.17	1664.3	723.58	102.21	15.88	1.47	16.03	4.37	70.02	2.71	7.49	2.63	0.48	43.91
0	1990	3	1.65	0.14	63.07	3.73	2777.29	1033.16	141.46	19.21	<b>1.79</b>	<b>19.55</b>	<b>5.33</b>	<b>52.38</b>	<b>4.47</b>	11.19	2.46	0.41	68.59

Figura 24 – Arquivo "avg.log" com o resultado da calibração

(Fonte: Project Gigalopolis, 2014)

### 5.3.2. Fase media

1. O arquivo padrão da configuração do SLEUTH foi copiado e renomeado para “*scenario.pitimbu100\_fina*”;
2. Alterou-se o *flag INPUT\_DIR*, para incluir a pasta onde estão os arquivos “gif”;
3. Alterou-se o *flag OUTPUT\_DIR* para incluir a pasta de saída dos resultados;
4. Atribuiu-se o valor 8 para o *flag MONTE\_CARLO\_ITERATIONS* (recomendação do manual do modelo);
5. Com os resultados da calibração anterior, foram alterados os valores dos coeficientes de crescimento, conforme Tabela 7;

**Tabela 7 – Configuração dos coeficientes da fase média**

COEFICIENTE	{START – STOP}
<i>Dispersion</i>	{1 – 1}
<i>Breed</i>	{51 – 76}
<i>Spread</i>	{1 – 1}
<i>Slope</i>	{51 – 51}
<i>Road gravity</i>	{1 – 76}

Após a conclusão das alterações, seguiram-se os passos para a execução da calibração.

6. Executou-se a calibração média com a seguinte linha de comando:  
***grow.exe calibrate scenario.pitimbu100\_fina <ENTER>***;
7. Após o processo de calibração, seguiram-se os passos de 8 a 11 da calibração grosseira para analisar os dados e extrair os coeficientes à próxima fase.

**Tabela 8 – Resultados da calibração fina (exemplo)**

COEFICIENTE	{START – STOP}
<i>Dispersion</i>	{1 – 1}
<i>Breed</i>	{56 – 74}
<i>Spread</i>	{1 – 1}
<i>Slope</i>	{51 – 51}
<i>Road gravity</i>	{1 – 68}

Com os dados dos coeficientes da calibração mediana, passou-se para a última fase.

### 5.3.3. Fase final

1. O arquivo padrão da configuração do SLEUTH foi copiado e renomeado para “*scenario.pitimbu100\_final*”;
2. Alterou-se o *flag INPUT\_DIR*, para incluir a pasta onde estão os arquivos “gif”;
3. Alterou-se o *flag OUTPUT\_DIR* para incluir a pasta de saída dos resultados;
4. Atribuiu-se o valor 10 para o *flag MONTE\_CARLO\_ITERATIONS*, conforme recomendação do manual do modelo;
5. Foram atribuídos aos coeficientes os valores mínimos e máximos da Tabela 8. Nesta fase em especial, o valor de incremento (*step*) será considerado 1.

Após a conclusão da configuração, seguiram-se os passos para a execução da calibração.

6. Executou-se a calibração final com a seguinte linha de comando: ***grow.exe calibrate scenario.pitimbu100\_final <ENTER>***;
7. Após o processo de calibração, seguiram-se os passos 8 e 9 da calibração grosseira para analisar os dados e extrair os coeficientes para a simulação do modelo.
8. Os valores destes coeficientes foram selecionados em função apenas da primeira linha do arquivo “*control\_stats.log*”, já classificado em ordem decrescente;

**Tabela 9 – Resultados da calibração final (exemplo)**

COEFICIENTE	VALOR
<i>Dispersion</i>	{1}
<i>Breed</i>	{70}
<i>Spread</i>	{1}
<i>Slope</i>	{51}
<i>Road gravity</i>	{54}

Após as três fases descritas acima, o próximo passo será o de encontrar os coeficientes finais para a simulação dos cenários.

### 5.3.4. Escolha dos melhores coeficientes para a simulação

Este processo é o último passo antes da simulação, sendo, portanto, considerado a continuação da calibração. Com os melhores coeficientes advindos da última calibração, esse processo produzirá um conjunto único de coeficientes.

1. Criou-se o arquivo “*scenario.pitimbu100\_fore*”;
2. Alterou-se o *flag INPUT\_DIR*, para incluir a pasta onde estão os arquivos “*gif*”;
3. Alterou-se o *flag OUTPUT\_DIR* para incluir a pasta de saída dos resultados;
4. Atribuiu-se o valor 100 para o *flag MONTE\_CARLO\_ITERATIONS*;
5. Foram atribuídos aos coeficientes, os valores mínimos e máximos da Tabela 9. Os valores *start* e *stop* deverão ser iguais e a iteração (*step*) 1.

**Tabela 10 – Valores fictícios dos coeficientes**

COEFICIENTE	{START – STEP – STOP}
<i>Dispersion</i>	{1 – 1 – 1}
<i>Breed</i>	{70 – 1 – 70}
<i>Spread</i>	{1 – 1 – 1}
<i>Slope</i>	{51 – 1 – 51}
<i>Road gravity</i>	{54 – 1 – 54}

Concluindo-se o processo de configuração, seguem-se os passos para a execução do comando.

6. Executou-se a seguinte linha de comando: ***grow.exe calibrate scenario.pitimbu100\_fore <ENTER>***;

Terminada esta etapa, os coeficiente necessários à próxima etapa foram gravados no arquivo “*avg.log*” pelo SLEUTH.

7. Os coeficientes são selecionados a partir da linha que contém o ano final de calibração (Figura 24). Para este estudo, o ano é 2013. Os valores devem ser inteiros (Tabela 11).

Tabela 11 – Resultado final da calibração (exemplo)

<i>Dispersion</i>	<i>Breed</i>	<i>Spread</i>	<i>Slope</i>	<i>Road gravity</i>
2	20	5	52	4

#### 5.4. Simulação dos Cenários (*prediction*)

O processo de simulação consistiu em utilizar os coeficientes finais da etapa anterior e configurá-los para a execução do modelo. Por intermédio dessa simulação, o SLEUTH fez uma previsão do crescimento urbano para os cenários futuros, entre os anos de 2014 e 2033.

Seguiu-se os seguintes passos para a execução da simulação.

1. Copiou-se e renomeou o arquivo padrão dos cenários para “*scenario.pitimbu100\_predict*”;
2. Foram alterados os *flags* *INPUT\_DIR* e *OUTPUT\_DIR*. O primeiro diz respeito a localização da pasta dos arquivos (input); o segundo é a pasta de saída dos resultados;
3. Atribuiu-se 100 para o *flag* *MONTE\_CARLO\_ITERATIONS* e os coeficientes da calibração, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Os coeficientes para a modelagem (exemplo)

FLAG	VALOR
<i>prediction_diffusion_best_fit</i>	2
<i>prediction_breed_best_fit</i>	20
<i>prediction_spread_best_fit</i>	5
<i>prediction_slope_best_fit</i>	52
<i>prediction_road_best_fit</i>	4

4. Os *flags* dos anos inicial e final de previsão foram alterados para 2014 e 2033 respectivamente (*prediction\_start\_date* e *prediction\_stop\_date*).

Concluindo-se o processo de configuração, seguiram-se os passos para a execução do comando.

5. Executou-se a seguinte linha de comando: ***grow.exe predict scenario.pitimbu100\_predict <ENTER>***;

Após a simulação, o SLEUTH gerou 22 arquivos em formato “*gif*” e 6 em formato “*log*” contendo os resultados da modelagem.

Para a simulação, foram criados dois cenários de previsão futura, respeitando os planos diretores vigentes em Natal, Macaíba e Parnamirim, além da legislação municipal, estadual e federal.

Segue abaixo a descrição de cada um dos cenários com suas áreas de exclusão da urbanização.

#### **5.4.1. Cenário 1**

O primeiro cenário representa a situação atual da BHRP. Seu propósito é investigar por onde se dará o crescimento urbano nos próximos 20 anos (2014 e 2033).

As áreas excluídas (Figura 25) para desenvolvimento urbano foram:

- Rio Pitimbu com sua Faixa de Proteção Ambiental (FPA);
- Áreas Militares (Marinha, Aeronáutica e Base de lançamento da Barreira do Inferno);
- Parques industriais de Macaíba e Parnamirim;
- Mata de Emaús (Parnamirim);
- Zona de Proteção Ambiental 3 (ZPA 3 localizada no bairro de Cidade Satélite, do município de Natal);
- Aeroporto Internacional Augusto Severo.

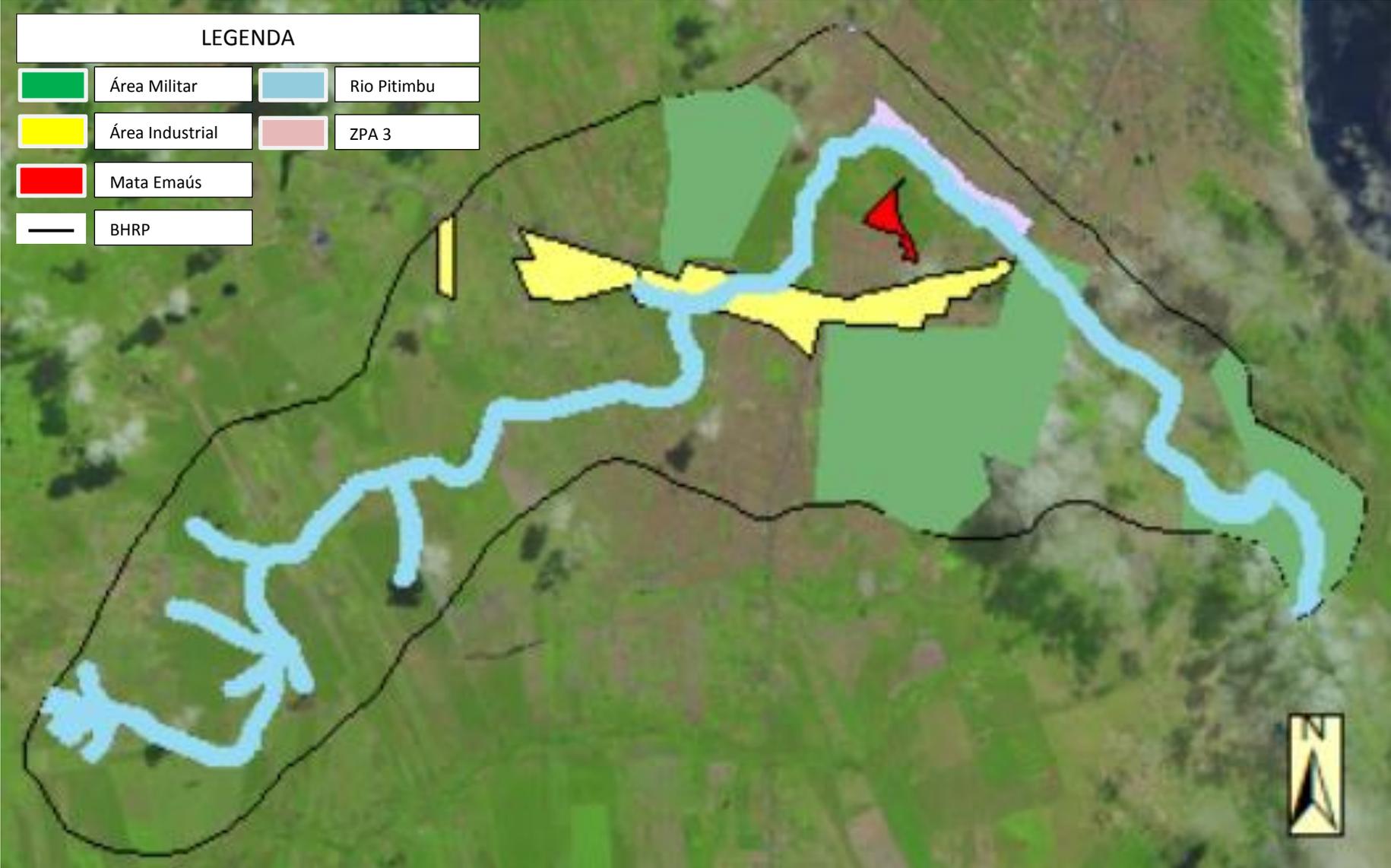


Figura 25 – Cenário 1. Áreas excluídas no processo de urbanização (Fonte: Autoria própria)

### 5.4.2. Cenário 2

Há muitos núcleos urbanizados que fazem fronteira com a BHRP, mas que não estão encravados na área de estudo e que poderiam contribuir para o crescimento urbano (crescimento exógeno) da bacia do rio Pitimbu. Diante desta realidade, criou-se um segundo cenário, propondo verificar a influência holística no crescimento interno da BHRP.

Para essa nova proposta, a bacia foi ampliada em 500 metros ao longo do seu contorno.

Após alargar a bacia, as áreas excludentes foram as seguintes:

- Rio Pitimbu com sua Faixa de Proteção Ambiental (FPA);
- Áreas Militares (Marinha, Aeronáutica e Base de lançamento da Barreira do Inferno);
- Parques industriais de Macaíba e Parnamirim;
- Mata de Emaús (Parnamirim);
- Zona de Proteção Ambiental 3 (ZPA 3 no bairro de Cidade Satélite, do município de Natal);
- Zona de Proteção Ambiental 4 (ZPA 4 – campo dunar dos bairros de Guarapes e Planalto, pertencentes a Natal);
- Aeroporto Internacional Augusto Severo.

Observa-se que a ZPA 4, que antes fazia fronteira com a BHRP, agora faz parte do novo cenário. Além da ZPA 4, aumentaram a participação o Distrito Industrial de Macaíba (DIM) e os bairros de Cidade Satélite e Planalto, conforme Figura 26.

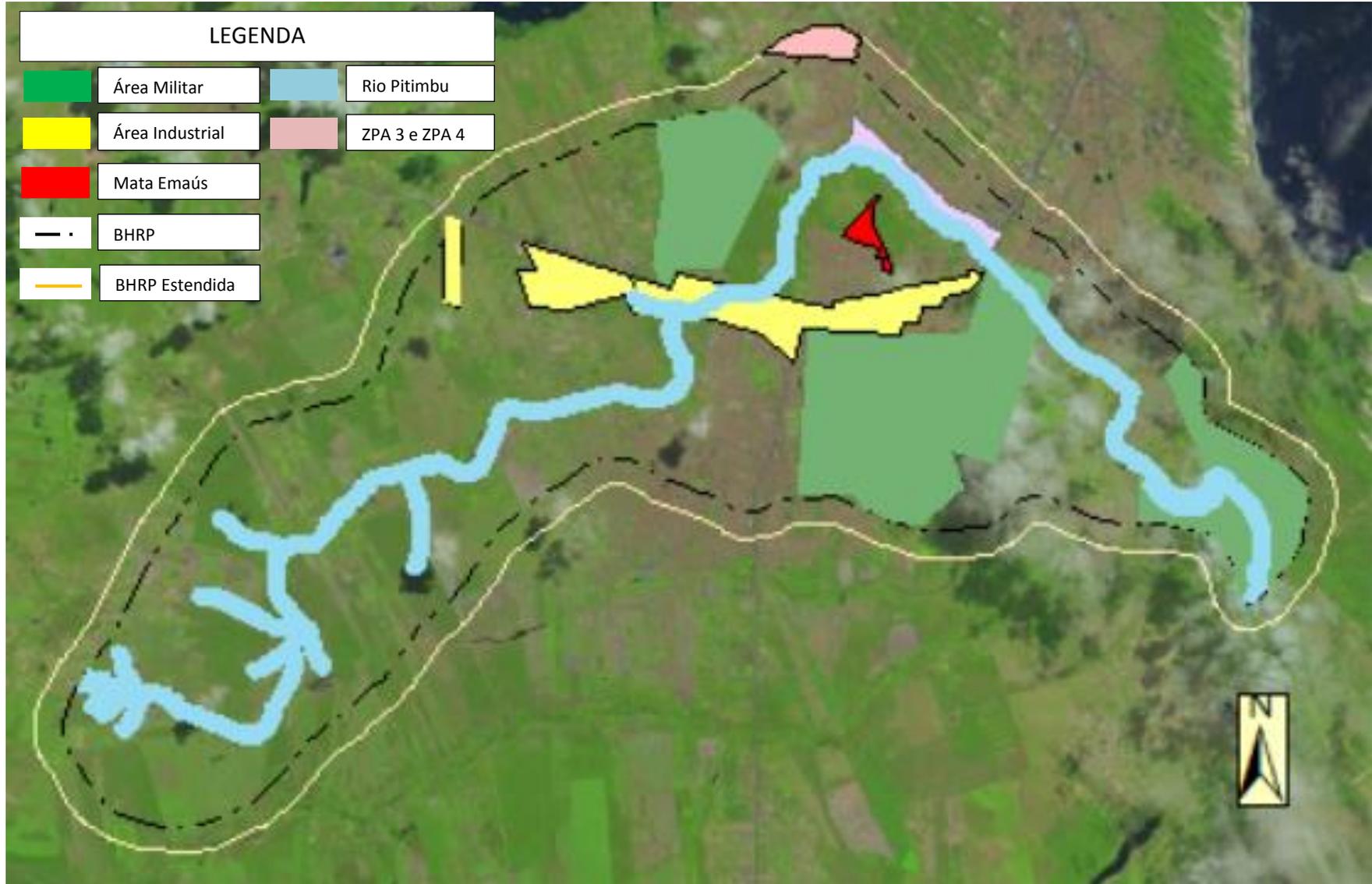


Figura 26 – Cenário 2. Áreas excluídas no processo de urbanização (Fonte: Autoria própria)

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processo de simulação da BHRP consistiu em dois procedimentos. O primeiro foi a calibragem, necessária em toda a modelagem para ajustar os parâmetros mais próximos da realidade. E por fim, a simulação dos cenários futuros, que é objeto desse estudo.

### 6.1. Calibração

De posse dos arquivos de entrada, foram executados os procedimentos de calibração, seguindo as três fases requeridas pelo SLEUTH. As tabelas 13 e 14 mostram os resultados das métricas e coeficientes, retiradas a partir dos arquivos “*controls\_stats.log*”.

Tabela 13 - Resultado da etapa de calibração

MÉTRICA	FASE		
	GROSSEIRA	MÉDIA	FINAL
Estatística Compare	0,99	0,79	0,82
Estatística Pop ( $r^2$ )	0,95	0,83	0,96
Estatística Edges ( $r^2$ )	0,99	0,82	0,99
Estatística Clusters ( $r^2$ )	0,83	0,91	0,90

Tabela 14 – Valores dos coeficientes de crescimento da etapa da simulação

FASES	START/STOP/STEP	COEFICIENTES				
		DISPERSION	BREED	SPREAD	SLOPE	ROAD GRAVITY
Fase Grosseira	Start/Stop/Step	1/100/25	1/100/25	1/100/25	1/100/25	1/100/25
Fase Média	Start/Stop/Step	51/51/1	76/76/1	1/1/1	1/51/5	1/26/1
Fase Final	Start/Stop/Step	51/51/1	76/76/1	1/1/1	31/31/1	5/5/1

Na etapa de calibração foram estudadas as seguintes métricas: *compare*, *population (pop)*, *edges* e *clusters*.

A análise da variação dos valores ao longo das três fases de calibração permite verificar a relação entre as populações modelada e real, o comportamento dos diversos elementos, como progridem, seu grau de variação e qual a importância para o sistema como um todo etc.

Essa análise deve ser feita para conhecer a verdadeira correlação entre a calibragem e os dados históricos. As métricas supracitadas servem para verificar o quanto a calibragem é fiel aos dados históricos. Quanto mais a estatística se aproxima de 1, mais próximo é da realidade.

Portanto, essa análise permite extrair um conjunto de conclusões a partir dos resultados da Tabela 13.

a) Métrica *Compare*

A métrica *compare* apresentou em sua calibração final, o valor de 82%, que corresponde à correlação entre o número de células urbanas modeladas e existentes, o que demonstra que o modelo tende a simular a realidade.

b) Métrica population ( $r^2$ )

Para esse índice houve uma variação entre as três fases, (0,95; 0,83 e 0,96). Essa métrica compara a extensão urbana modelada com o desenvolvimento real e é sensível a alteração do coeficiente *dispersion*. O valor final de 0,95 demonstra uma estreita relação entre a calibração e a realidade.

c) Métrica edges ( $r^2$ )

Essa métrica oscilou um pouco. Isto se deveu principalmente pela sensibilidade às mudanças do coeficiente *spread*. O valor 0,99 da métrica *edges* atesta que a calibragem é confiável perante os dados históricos.

d) Métrica clusters ( $r^2$ )

O índice *clusters* ( $r^2$ ) representa a quantidade (*em pixels*) de aglomerados urbanos modelados em comparação com o número real de aglomerados urbanos para os anos de controle. O índice 0,90 é uma representação de que há uma forte relação entre esses aglomerados urbanos.

Diante do que foi visto, verificou-se que realmente há uma forte correlação entre o crescimento real e a calibragem realizada para este trabalho, dado que 82 % da modelagem significa refletir os dados históricos.

Após a calibração, foram gerados os coeficientes finais para a previsão de cenários futuros. Esses parâmetros influenciam diretamente as regras de crescimento urbano.

COEFICIENTES FINAIS				
DISPERSION	BREED	SPREAD	SLOPE	ROAD GRAVITY
67	1	99	13	7

**Tabela 13 - Coeficientes finais da calibração**

Para o coeficiente *dispersion/diffusion* o valor 67 se traduz em um elevando crescimento espontâneo para os dois cenários da bacia hidrográfica do rio Pitimbu. O crescimento difuso e de novos centros não terá grande influência nesses cenários, dados que o valor de *breed* estagnou no patamar 1.

Diferentemente do *spread*, com valor 99, acarretando um alto crescimento periférico, a partir de centros urbanos, o parâmetro *road gravity* com valor igual a 7 é considerado pequeno e, portanto, não houve tanta influência das malhas viárias nas simulações.

O papel do coeficiente *slope* é o de limitar o crescimento em áreas íngremes e esse parâmetro influencia todas as regras de crescimento. Entretanto, para valores baixos, como o calculado, há uma probabilidade relativamente alta de crescimento urbano.

## 6.2. Simulação dos Cenários

A simulação dos cenários foi realizada em função dos parâmetros da calibração. A análise do primeiro cenário se deteve em compreender o comportamento urbano para os anos 2014, 2023 e 2033. O segundo procurou apontar os crescimentos exógenos que interferem diretamente na BHRP.

O simulador SLEUTH gerou, em cada cenário, 22 imagens em formato “*gif*” e arquivos acessórios para análise, entre os anos 2014 e 2033.

Os resultados dos cálculos feitos pelo SLEUTH, que refletem o prognóstico do desenvolvimento urbano entre 2014 e 2033 estão elencados na Tabela 15 e Tabela 18

Igualmente, a relação das 27 métricas e suas respectivas descrições encontra-se em inglês para preservar a definição original (Tabela 20). Essas métricas são encontradas no arquivo “avg.log”.

### 6.2.1. Cenário 1

Este cenário corresponde à influência da situação atual do crescimento urbano da bacia. Objetiva fazer um prognóstico do comportamento urbano na área estudada.

Ao simular este cenário, foram geradas várias imagens, entretanto apenas as dos anos 2014, 2023 e 2033 serão analisadas, que correspondem a dois ciclos de dez anos.

A Tabela 14 sintetiza o resultado do crescimento urbano para os 20 anos.

PERÍODO	CRESCIMENTO				Número de novos <i>pixels</i>
	ESPONTÂNEO	NOVOS CENTROS	ORGÂNICO	REDE VIÁRIA	
2014	14	0	51	2	67
2015-2023	128	3	613	12	755
2024-2033	128	3	884	8	1023

**Tabela 14 – Novos pixels gerados por tipo de crescimento**

#### **Previsão para 2014**

Em 2014 (Figura 27) verifica-se um crescimento urbano lento, esparso e sem novos centros. Há, porém, um desenvolvimento mais acelerado para o espontâneo e orgânico, sendo esse último com 51 pixels de crescimento (Tabela 14).

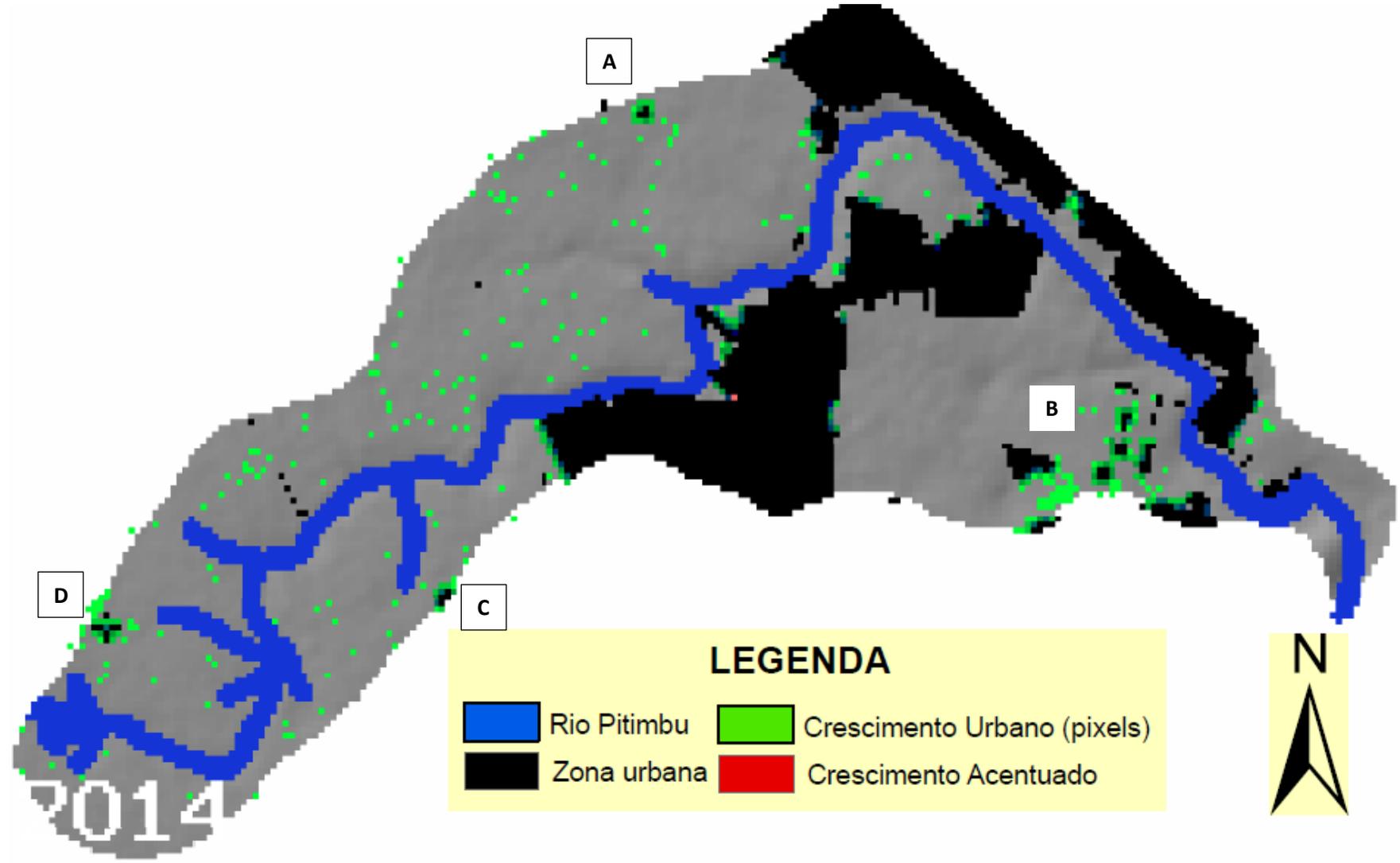


Figura 27 – Cenário 1: Crescimento urbano em 2014

### **Previsão para 2023**

Para 2023 a expansão urbana se desenvolveu em função do crescimento espontâneo e principalmente pelo orgânico, totalizando 741 pixels (Tabela 14). Observando os valores de novos centros e rede viária, verifica-se que há pouco crescimento urbano envolvendo essas duas regras.

Vem se consolidando o trecho no ponto “B” que correspondem aos bairros Parque do Jiqui e Parque das Nações em Parnamirim/RN. No ponto “E”, começa-se a se expandir com mais intensidade essas áreas que já são adensadas.

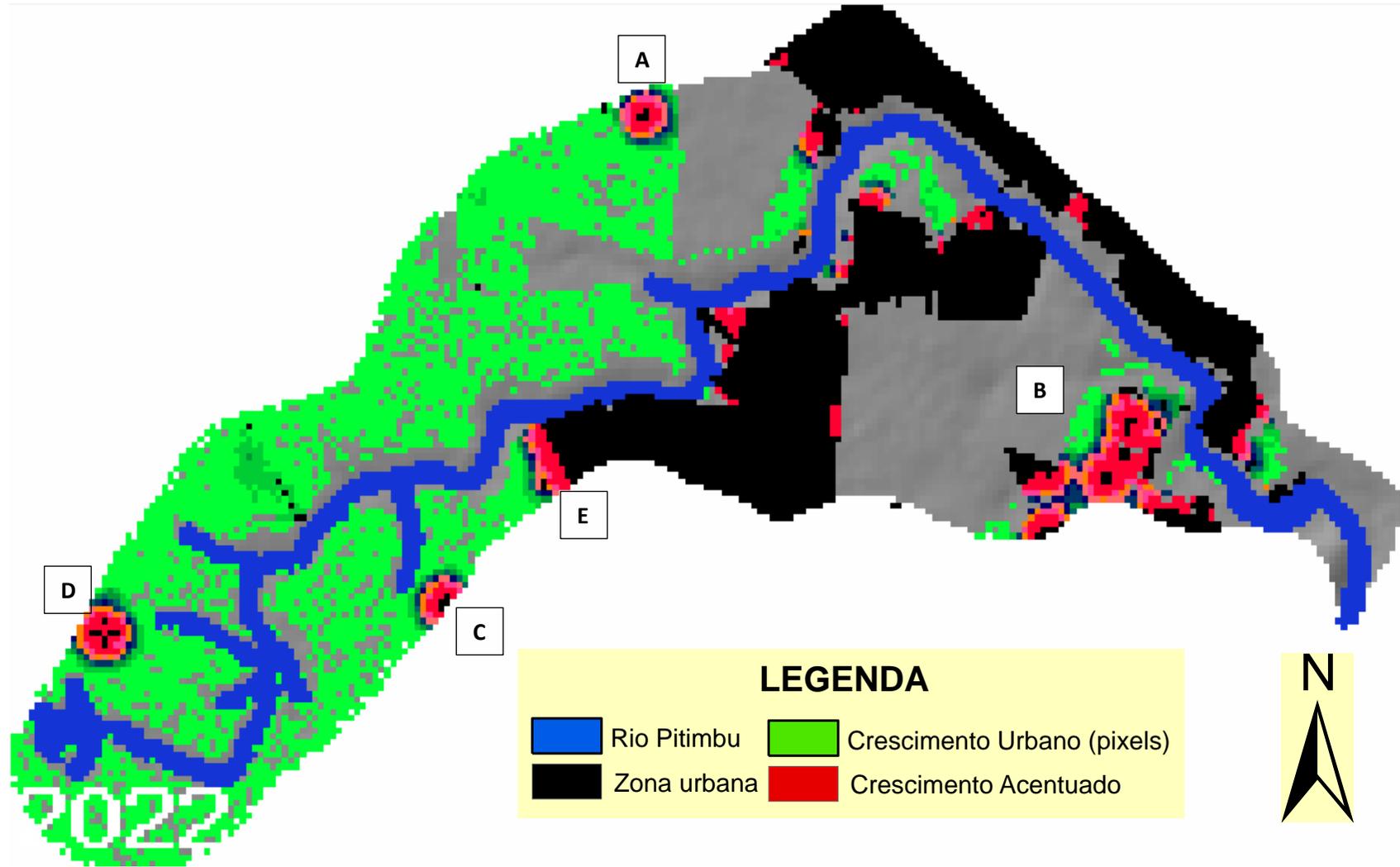


Figura 28 – Cenário 1: Crescimento urbano em 2022

Finalmente, em 2033 o cenário do crescimento se desencadeou como já vinha sendo “desenhado”. Essa expansão urbana envolveu os dois tipos de crescimento que mais sobressaíram: o espontâneo e orgânico, com aproximadamente 1012 pixels gerados entre 2024 e 2033.

Ademais, observa-se que nas áreas selecionadas da Figura 29, existem grandes aglomerados urbanos, que corrobora para confirmar os resultados da modelagem.

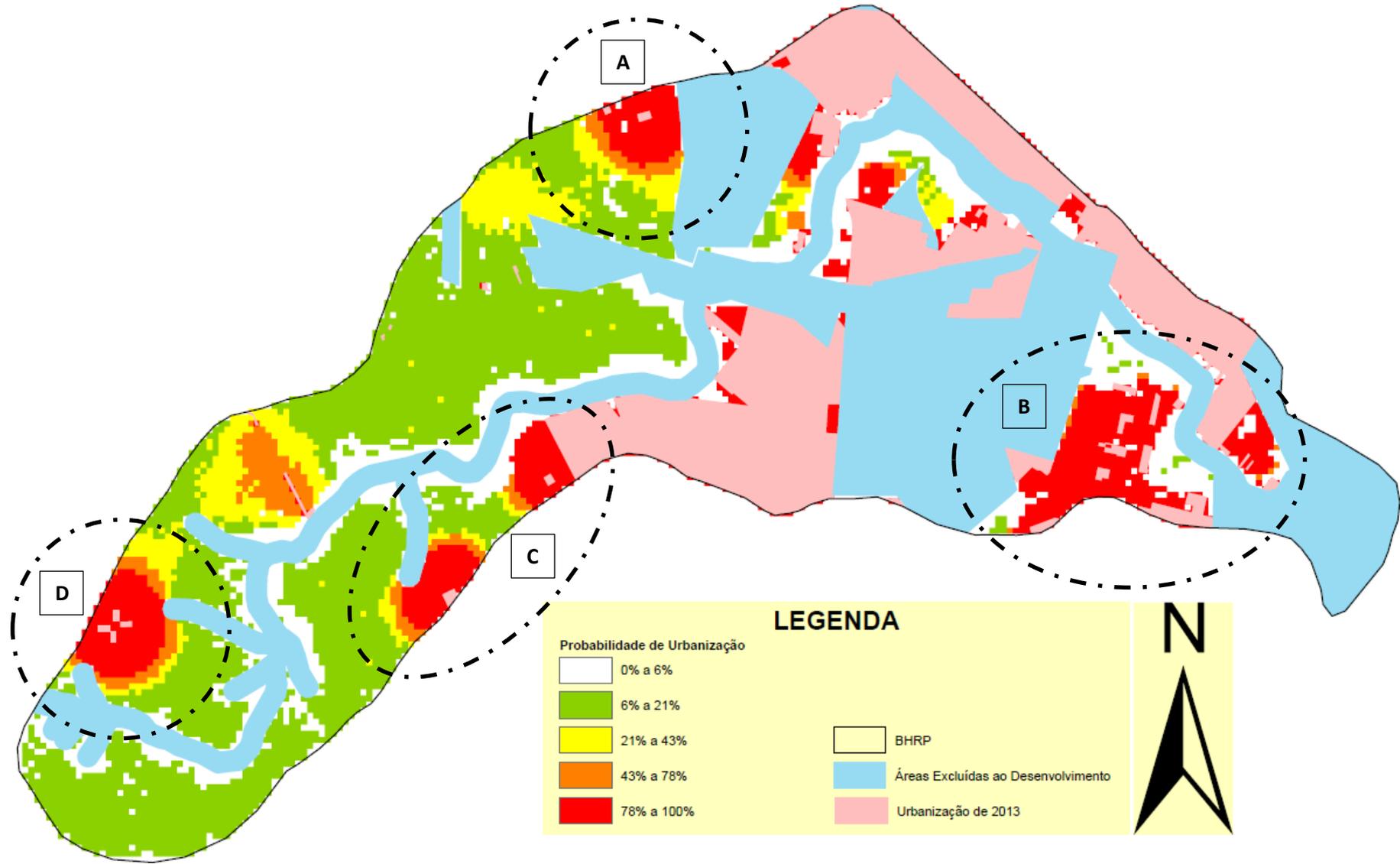


Figura 29 – Cenário 1: Crescimento urbano em 2033

### Crescimento urbano do cenário 1

O crescimento urbano entre 2014 e 2023 foi de aproximadamente 28,9% (756 *pixels*), enquanto que entre 2024 e 2033 essa taxa subiu para 30,3% (1023 *pixels*).

A expansão urbana total superou os 68% com 1779 *pixels* ou 1779 hectares (célula de 100x100). O Gráfico 4 descreve a trajetória desse crescimento.

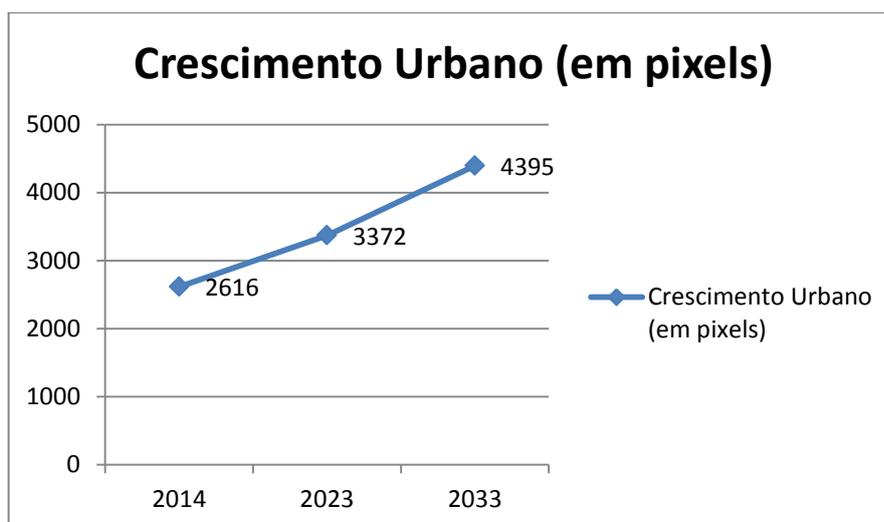


Gráfico 4 – Cenário 1: Crescimento urbano entre 2014 e 2033 (1 pixel = 1 hectare)

Entre os anos 2014 e 2023 a taxa de crescimento se acentuou até chegar a 2,70%. A partir desse ano houve uma redução, com tendência de queda (Gráfico 5), possivelmente pela diminuição espacial na região. A taxa média anual de crescimento ficou em torno de 2,68%.

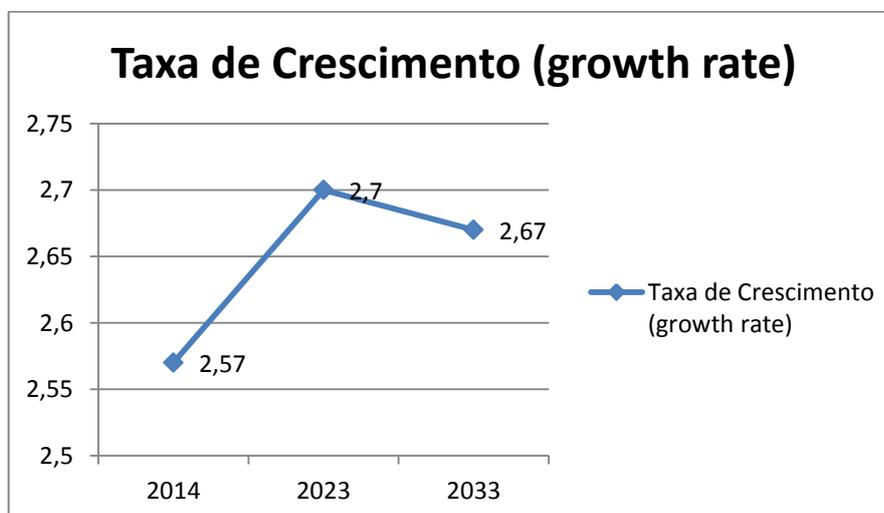


Gráfico 5 – Cenário 1: Taxa de crescimento urbano

run	year	index	sng	sdg	sdc	og	rt	pop	area	edges	clusters	xmean	ymean
0	2014	0	14,1	0,32	0	51,21	1,72	2616,35	2616,35	671,2	58,36	146,7	49,33
0	2015	0	14,69	0,26	0	56,68	1,38	2689,36	2689,36	713,85	73,75	146,18	49,78
0	2016	0	14,34	0,36	0	59,99	1,48	2765,53	2765,53	755,43	85,88	145,61	50,28
0	2017	0	14,42	0,42	0	63,46	1,58	2845,41	2845,41	797,1	97,47	144,99	50,79
0	2018	0	13,84	0,32	0	66,12	1,36	2927,05	2927,05	836,59	107,16	144,34	51,32
0	2019	0	14,21	0,22	0	69,04	1,73	3012,25	3012,25	874,45	116,88	143,6	51,86
0	2020	0	14,01	0,28	0	71,43	1,41	3099,38	3099,38	909,72	126,62	142,79	52,39
0	2021	0	13,91	0,29	0	73,98	1,38	3188,94	3188,94	943,37	134,66	141,88	52,93
0	2022	0	14,18	0,26	0	76,41	1,03	3280,82	3280,82	975,34	143,78	140,93	53,44
0	2023	0	13,91	0,31	0	75,96	0,81	3371,81	3371,81	1005,71	153	139,89	53,93
0	2024	0	14,25	0,18	0	77,13	0,89	3464,26	3464,26	1035,57	161,25	138,79	54,4
0	2025	0	13,66	0,29	0	77,79	0,91	3556,91	3556,91	1064,9	168,99	137,62	54,84
0	2026	0	13,77	0,3	0	78,96	0,66	3650,60	3650,6	1096,52	176,21	136,38	55,28
0	2027	0	13,18	0,37	0	82,12	0,79	3747,06	3747,06	1129,99	183,4	135,04	55,71
0	2028	0	12,58	0,24	0	84,74	0,77	3845,39	3845,39	1161,46	188,15	133,68	56,13
0	2029	0	12,5	0,17	0	88,47	0,87	3947,40	3947,4	1195,84	194,14	132,25	56,56
0	2030	0	12,83	0,26	0	92,21	0,69	4053,39	4053,39	1232,26	199,17	130,76	56,98
0	2031	0	11,94	0,29	0	96,73	0,37	4162,72	4162,72	1268,7	202,33	129,22	57,41
0	2032	0	11,92	0,25	0	100,83	1,17	4276,89	4276,89	1305,44	204,93	127,62	57,84
0	2033	0	11,6	0,38	0	105,15	0,7	4394,72	4394,72	1342,43	206,72	126,02	58,27

**Tabela 15 – Cenário 1: Dados do arquivo “avg.log” gerado na simulação (continua)**

rad	slope	cl_size	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav	%urban	%road	grw_rate	leesalee	grw_pix
28,86	10,32	44,52	67	99	1	13	7	11,59	0	2,57	0	67,35
29,26	10,04	36,15	67,67	99,99	1,01	11,84	7,12	11,85	0	2,71	0	73,01
29,67	9,76	31,84	68,35	100	1,02	10,66	7,23	12,12	0	2,75	0	76,17
30,1	9,49	28,83	69,03	100	1,03	9,44	7,36	12,4	0	2,81	0	79,88
30,52	9,22	27	69,72	100	1,04	8,2	7,48	12,7	0	2,79	0	81,64
30,96	8,96	25,36	70,42	100	1,05	6,93	7,61	13	0	2,83	0	85,2
31,41	8,71	24,11	71,12	100	1,06	5,63	7,74	13,31	0	2,81	0	87,13
31,86	8,47	23,29	71,83	100	1,07	4,3	7,87	13,63	0	2,81	0	89,56
32,32	8,23	22,4	72,55	100	1,08	2,94	8,01	13,96	0	2,8	0	91,88
32,76	8,01	21,59	73,28	100	1,09	1,54	8,15	14,28	0	2,7	0	90,99
33,21	7,8	21,04	74,01	100	1,1	0,24	8,29	14,61	0	2,67	0	92,45
33,65	7,59	20,6	74,75	100	1,12	1	8,43	14,94	0	2,6	0	92,65
34,09	7,4	20,25	75,5	100	1,13	1	8,58	15,27	0	2,56	0	93,69
34,53	7,21	19,98	76,25	100	1,14	1	8,74	15,61	0	2,57	0	96,46
34,98	7,03	20,03	77,01	100	1,15	1	8,89	15,96	0	2,55	0	98,33
35,44	6,84	19,89	77,78	100	1,16	1	9,05	16,33	0	2,58	0	102,01
35,92	6,67	19,88	78,56	100	1,17	1	9,22	16,71	0	2,61	0	105,99
36,4	6,49	20,2	79,35	100	1,18	1	9,38	17,09	0	2,62	0	109,33
36,89	6,32	20,46	80,14	100	1,2	1	9,55	17,5	0	2,66	0	114,17
37,4	6,15	20,87	80,94	100	1,21	1	9,73	17,92	0	2,67	0	117,83

Tabela 16 – Cenário 1: Dados do arquivo “avg.log” gerado na simulação

### 6.2.2. Cenário 2

Este cenário propõe verificar a influência externa no crescimento interno da BHRP. Diante disto, foram ampliadas as fronteiras da bacia em 500 metros.

Em geral, não foram comentados os resultados do desenvolvimento urbano da bacia, mas somente o crescimento externo que interferem diretamente na BHRP.

Para esta simulação, utilizaram-se os mesmos parâmetros da simulação anterior. Abaixo estão os resultados da expansão urbana em função de cada tipo de regra de crescimento.

**Tabela 17 – Novos pixels gerados por tipo de crescimento**

PERÍODO	CRESCIMENTO				Número de novos <i>pixels</i>
	ESPONTÂNEO	NOVOS CENTROS	ORGÂNICO	REDE VIÁRIA	
2014	21	0	116	2	139
2015-2023	178	3	1298	16	1495
2024-2033	166	3	1699	8	1877

Após a simulação deste cenário, observou-se uma aproximação dos resultados com a simulação anterior, o que já era esperado (Figura 30). A expansão urbana se deu em sua grande maioria através do crescimento orgânico, precedido pelo espontâneo.

Ao visualizar a Figura 30, foram percebidos detalhes considerados importantes para o estudo.

O ponto (A), gerado a partir do crescimento orgânico se desenvolveu na fronteira da BHRP. Essa expansão se desenvolveu de fora para dentro da bacia, interferindo no seu crescimento.

Houve uma expansão urbana no ponto (B), fazendo com que os dois núcleos se fundissem numa só mancha. Essa ação também afeta o crescimento urbano interno da bacia.

Para o ponto (C) a simulação criou três núcleos a partir de aglomerados urbanos. Um dos núcleos se desenvolveu no sentido da bacia hidrográfica do rio Pitimbu, corroborando para o crescimento interno da área.

É importante ressaltar que para as regiões dos pontos descritos acima, há uma probabilidade real de crescimento urbano superior a 85%.

### Crescimento urbano do cenário 2

Para este cenário, o crescimento urbano foi de aproximadamente 93%, com 3372 *pixels* (3372 hectares) urbanizados entre os anos de 2014 e 2033 (Gráfico 6).

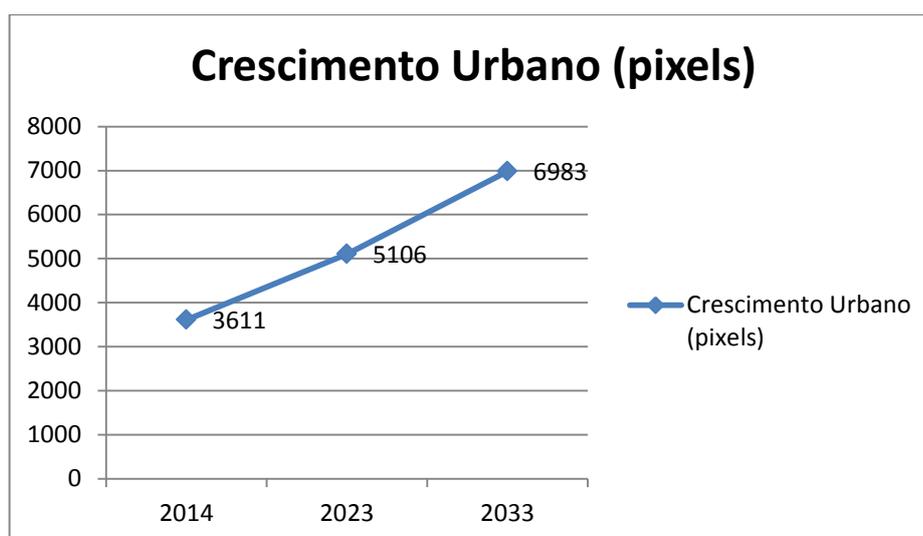


Gráfico 6 – Cenário 1: Crescimento urbano entre 2014 e 2033 (1 pixel = 1 hectare)

A taxa de crescimento para esse cenário começou em 3,85% com tendência de queda para 2,90% em 2033. Esse resultado denota uma acomodação do crescimento urbano para o período (Gráfico 7). A taxa média anual foi de 3,43%.

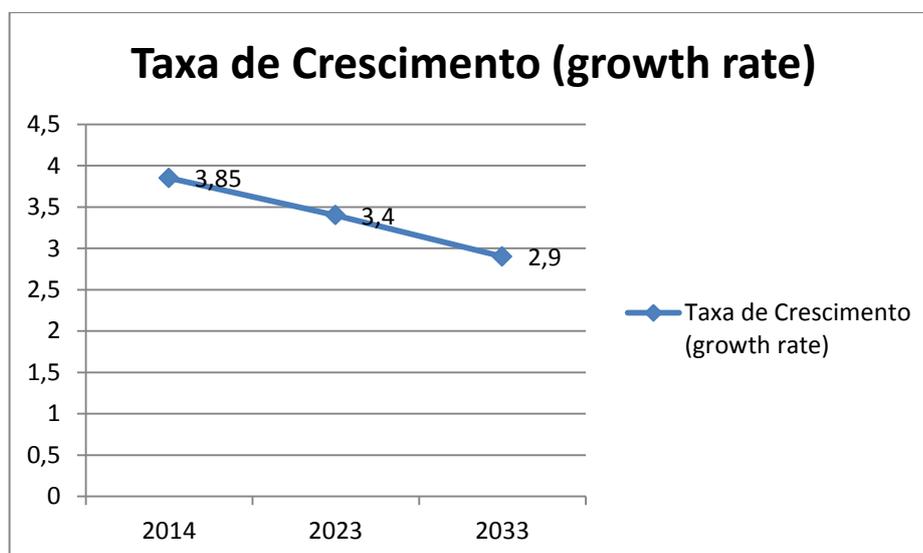


Gráfico 7 – Cenário 2: Taxa de crescimento urbano

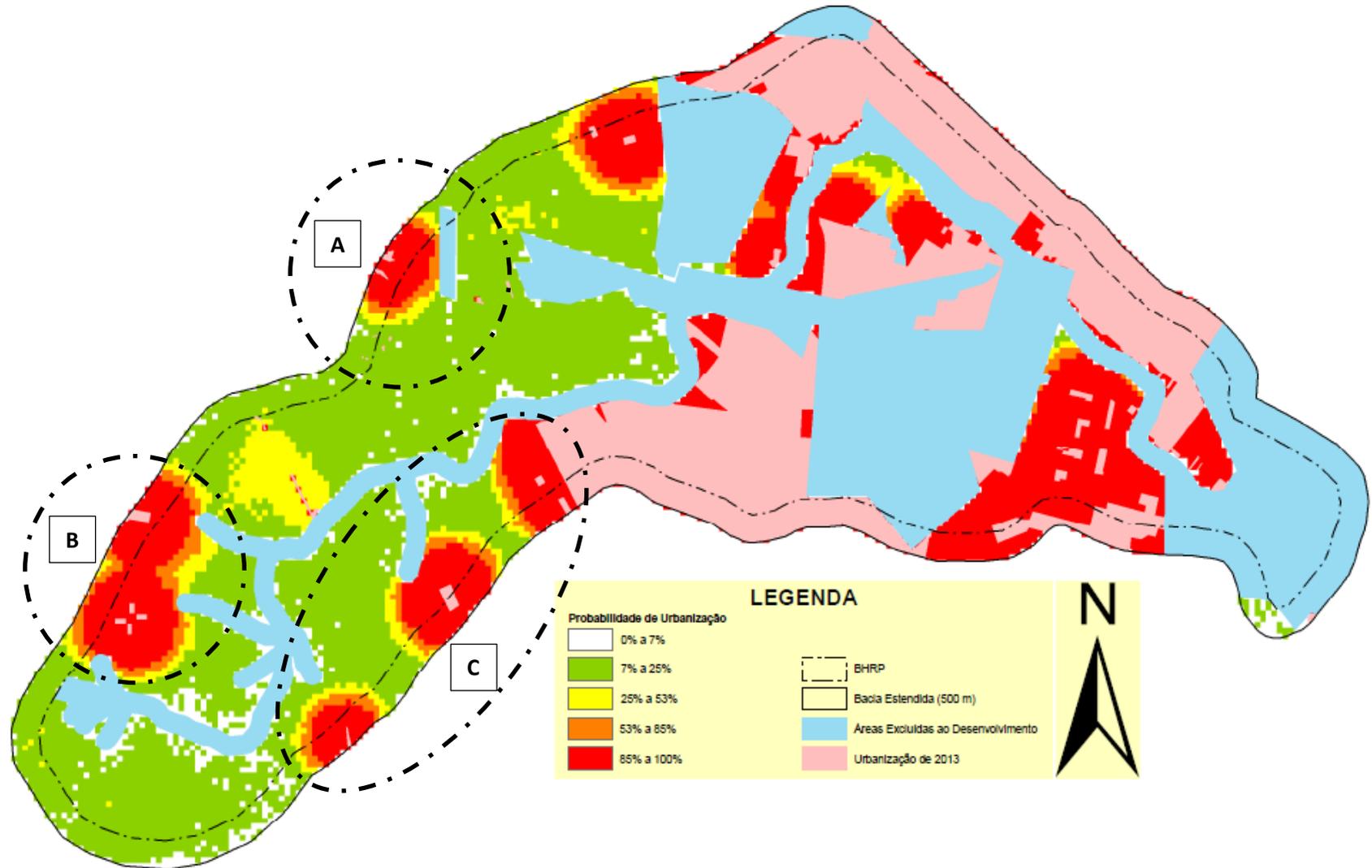


Figura 30 – Cenário 2: Crescimento urbano em 2033

run	year	index	sng	sdg	sdg	og	rt	pop	area	edges	clusters	xmean	ymean
0	2014	0	21	0	0	116	2	3611	3611	841	71	153	55,13
0	2015	0	21	0	0	125	3	3760	3760	905	94	153	55,69
0	2016	0	21	0	0	133	2	3916	3916	964	111	152	56,32
0	2017	0	20	1	0	139	2	4078	4078	1017	127	151	56,98
0	2018	0	19	0	0	143	2	4242	4242	1067	139	151	57,65
0	2019	0	20	0	0	148	2	4412	4412	1112	152	150	58,32
0	2020	0	19	0	0	151	1	4584	4584	1152	165	149	58,98
0	2021	0	20	0	0	152	1	4758	4758	1189	178	148	59,61
0	2022	0	20	0	0	153	1	4932	4932	1222	190	147	60,2
0	2023	0	18	0	0	154	1	5106	5106	1256	200	146	60,74
0	2024	0	19	0	0	156	1	5282	5282	1290	209	144	61,26
0	2025	0	18	0	0	157	1	5457	5457	1325	218	143	61,73
0	2026	0	18	0	0	159	1	5636	5636	1364	226	141	62,19
0	2027	0	17	0	0	164	1	5818	5818	1402	233	140	62,64
0	2028	0	16	0	0	168	1	6003	6003	1441	238	138	63,08
0	2029	0	17	0	0	171	1	6192	6192	1484	242	136	63,52
0	2030	0	16	0	0	176	1	6385	6385	1524	245	135	63,97
0	2031	0	16	0	0	180	1	6581	6581	1562	246	133	64,41
0	2032	0	15	0	0	183	1	6780	6780	1599	247	131	64,84
0	2033	0	15	0	0	187	1	6983	6983	1639	247	129	65,29

**Tabela 18 – Cenário 2: Dados do arquivo “avg.log” gerado na simulação (continua)**

rad	slope	cl_size	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav	%urban	%road	grw_rate	leesalee	grw_pix
33,9	1,73	50,82	67	99	1	13	7	14,04	0	3,85	0	138,93
34,6	1,75	39,8	67,67	99,99	1,01	11,6	7,14	14,52	0	3,97	0	149,36
35,31	1,76	35,05	68,35	100	1,02	10,14	7,29	15,02	0	3,98	0	156,09
36,03	1,77	31,91	69,03	100	1,03	8,64	7,44	15,54	0	3,95	0	161,19
36,75	1,77	30,31	69,72	100	1,04	7,09	7,59	16,06	0	3,88	0	164,56
37,48	1,77	28,63	70,42	100	1,05	5,48	7,75	16,61	0	3,86	0	170,18
38,2	1,77	27,45	71,12	100	1,06	3,82	7,92	17,16	0	3,75	0	172,18
38,92	1,77	26,37	71,83	100	1,07	2,11	8,09	17,71	0	3,65	0	173,49
39,62	1,76	25,6	72,55	100	1,08	0,33	8,27	18,27	0	3,53	0	174,23
40,31	1,75	25,15	73,28	100	1,09	1	8,45	18,83	0	3,4	0	173,64
41	1,75	24,82	74,01	100	1,1	1	8,64	19,39	0	3,33	0	176,11
41,68	1,74	24,6	74,75	100	1,12	1	8,83	19,95	0	3,2	0	174,89
42,35	1,73	24,53	75,5	100	1,13	1	9,03	20,52	0	3,18	0	179,13
43,03	1,72	24,51	76,25	100	1,14	1	9,24	21,11	0	3,13	0	181,95
43,71	1,7	24,87	77,01	100	1,15	1	9,45	21,7	0	3,09	0	185,46
44,39	1,69	25,14	77,78	100	1,16	1	9,66	22,31	0	3,05	0	188,85
45,08	1,68	25,67	78,56	100	1,17	1	9,89	22,92	0	3,01	0	192,49
45,77	1,67	26,38	79,35	100	1,18	1	10,12	23,55	0	2,99	0	196,72
46,45	1,65	27,06	80,14	100	1,2	1	10,35	24,19	0	2,93	0	198,72
47,14	1,64	27,89	80,94	100	1,21	1	10,59	24,84	0	2,9	0	202,9

Tabela 19 – Cenário 2: Dados do arquivo “avg.log” gerado na simulação

MÉTRICA	DESCRIÇÃO
run	a run consists of a single set of coefficient values and is executed MONTE_CARLO_ITERATIONS number of times from start to stop year
year	the representative date for a growth cycle
index	control year number;
sng	the number of new urban pixels generated from spontaneous growth;
sdg	the number of new urban pixels generated from new spreading center growth
sdc	relic data type no longer used;
og	the number of new urban pixels generated from edge growth
rt	the number of new urban pixels generated from road influenced growth
pop	the total number of urban pixels;
area	the total number of urban pixels (same as pop)
edges	the total number of urban/non-urban pixel edges;
clusters	the total number of urban clusters
xmean	the average urban pixel column value
ymean	the average urban pixel column value
rad	the radius of the circle which encloses the urban area: $(\text{pow}((\text{area} / \text{pi}), 0.5))$
slope	average slope of urbanized cells
cl_size	average urban cluster size
diffus	dispersion_coefficient value
spread	spread_coefficient value
breed	breed_coefficient value
slp_res	slope_coefficient value
rd_grav	road_gravity_coefficient value
%urban	Percent of the number of urban pixels divided by the total number of pixels in the study área (nrows*ncols) minus the number of pixels that are completely excluded from urban growth: $((100.0 * \text{urbancount}) / (\text{total\_pixels} - (\text{noncount} + \text{road pixels})))$
%road	Percent of the number of road pixels divided by the total number of pixels in the study área (nrows*ncols) minus the number of pixels that are completely excluded from urban growth: $((100.0 * \text{roadcount}) / (\text{total\_pixels} - \text{noncount}))$
grw_rate	Percent of the new urban pixels in one year divided by the total number of urban pixels: $(100 * \text{num\_growth\_pix} / \text{pop})$
leesalee	a shape index, a measurement of spatial fit between the model's growth and the known urban extent for the control years. In predict mode this value will always be zero (0): $S = (A \cap B) / (A \cup B)$ where A is modeled and B is actual urban area.
grw_pix	total number of new urban pixels

**Tabela 20 – Descrição das métricas encontradas no arquivo “avg.log”**

### 6.3. Possíveis Impactos sobre os recursos hídricos

Os dois cenários apresentaram resultados bastante parecidos. O crescimento orgânico foi o que mais contribuiu para a expansão urbana, depois veio o espontâneo. Os de novos centros e a influência das redes de transportes não obtiveram os mesmos desempenhos.

Em consequência da expansão urbana, a bacia hidrográfica do rio Pitimbu apresentou possíveis pontos críticos. Para essas áreas configuram que a probabilidade de se desenvolver é superior a 70%.

Por isso a bacia do rio Pitimbu carece de alguns cuidados, haja vista ser um rio de grande importância para a região. Abaixo foram feitas algumas conjecturas em relação aos resultados dos cenários.

- a) Observou-se que houve um crescimento considerável próximo à nascente do rio. Como também nas vizinhanças da lagoa do Jiqui formando grandes aglomerados urbanos, sendo, portanto, pontos críticos na bacia;
- b) A ocupação dessas regiões deve ser feita com base em um planejamento, que considere as características e vulnerabilidades das áreas, de modo a garantir uma quantidade suficiente para o abastecimento da população;
- c) Destaca ainda que o uso e a ocupação do solo desordenados acarretarão a intensificação do processo erosivo, carreando sedimentos para a calha do rio. Em consequência disso, as águas superficiais poderão ser contaminadas com partículas poluidoras, comprometendo assim a quantidade e a qualidade da água superficial;
- d) Ademais, verificou-se que com a influência desse adensamento urbano e sem infraestrutura sanitária adequada, poderão haver reflexos negativos na qualidade da água, contaminando o aquífero.

## 7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo demonstrou a validade do uso dos Autômatos Celulares (AC) no planejamento urbano. Deste estudo, pode-se chegar às conclusões apresentadas a seguir.

Em relação ao Autômato Celular:

- É plenamente viável a utilização dos ACs para desenvolver políticas urbanas conscientes;
- Pode-se entender a dinâmica do uso e ocupação do solo e compreender a sua evolução por meio da história urbana passada, para simular cenários futuros.

Em relação ao SLEUTH:

- A modelagem a partir de *softwares*, como o SLEUTH, é um marco na história do desenvolvimento urbano, seja pela importância explicativa na evolução temporal e espacial, seja pelo suporte que representa na tomada de decisão;
- O *software* tem algumas limitações. A primeira é a incapacidade de envolver nos resultados as decisões políticas, como o zoneamento e fatores sócio-econômicos;
- O site do modelo (<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>) é carente de atualizações e aparenta estar abandonado.

Em relação à simulação, foram observados os seguintes pontos:

- O desenvolvimento urbano mais significativo foi o crescimento orgânico, que se expandiu a partir de centros urbanos existentes. O resultado da simulação dos dois cenários convergiu para esse tipo de crescimento;
- O crescimento espontâneo ocorreu ao longo da Bacia, porém a probabilidade efetiva de urbanização não ultrapassa 21%;
- Para o período entre 2014 e 2033, verificou-se um crescimento de 68%, o que corresponde a uma área de expansão urbana em torno de 1.778 hectares;

- Segundo a simulação do cenário 1, em 2033 a área da nascente do rio Pitimbu e nas proximidades da lagoa do Jiqui terão alta probabilidade de crescimento acima dos 78%;
- O cenário 2 simulou a tendência do crescimento exógeno (de fora para dentro) ao longo da Bacia e constatou a existência de interferências externas importantes dentro dessa área.

Diante das exposições apresentadas neste estudo, os dois objetivos propostos foram atingidos: o primeiro, consistente na interpretação da dinâmica do desenvolvimento urbano na BHRP, aplicando os Autômatos Celulares como ferramenta de estudo e, o segundo, associado ao primeiro, referente à simulação de cenários através de um modelo que utilizasse o AC. Neste caso, empregou-se o SLEUTH.

Por ser o primeiro trabalho de desenvolvimento urbano na BHRP, utilizando o Autômato Celular como ferramenta de modelagem, espera-se que este estudo sirva de base para a criação e aprofundamento de novas investigações usando o AC, enriquecendo o acervo de pesquisa da bacia do rio Pitimbu.

Além disso, essa pesquisa representa um potencial a ser utilizado em estudos das águas subterrâneas envolvendo recargas e contaminação do aquífero, como também aspectos ambientais importantes para controlar um desenvolvimento urbano sustentável.

## 8. BIBLIOGRAFIA

AGUIAR, M. S.; COSTA, F. A. DIMURO, G. P.; COSTA, A. C. R. **Modelos matemáticos baseados em autômatos celulares para geoprocessamento**. SBMAC. São Carlos, SP, Brasil, 2012, 66 p.

BARBOSA, A. H.; FREITAS, M. S. R.; NEVES, F. A. **Confiabilidade estrutural utilizando o método de Monte Carlo e redes neurais**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 58, n. 3, Sept. 2005. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672005000300011&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672005000300011&lng=en&nrm=iso)>. access on 20 Nov. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672005000300011>.

BARBOSA, J. K. F. **Conflito de usos da água e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do rio Pitimbu no município de Macaíba, RN**. Natal, 2006.

BARREIRAS, N. M. J. **Contribuição para a caracterização e modelação hidrogeológica do Concelho do Seixal**. Dissertação Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica (Georrecursos), 2009.

BATTY M. **Cellular automata and urban form: A primer**. Journal Of The American Planning Association [serial online]. Spring97 1997; 63(2):266. Available from: Academic Search Premier, Ipswich, MA. Accessed July 6, 2013.

BAUER, W. F. **The Monte Carlo Method**. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 6(4): 438-451, 1958. This is a review paper that provides an interesting perspective from 1958.

BORGES, A. N. **Implicações Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (RN) Decorrente das Diversas Formas de Uso e Ocupação do Solo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2002).

CABRAL, N. M. T.; RIGHETTO, A. M.; QUEIROZ, M. A. **Comportamento do nitrato em poços do aquífero Dunas/Barreiras em Natal/RN**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, Sept. 2009. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522009000300003&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522009000300003&lng=en&nrm=iso)>. access on 29 Apr. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522009000300003>.

CALLAHAN, P. **Conway's game of life**. Math.com – The World of Math Online. Disponível em: <<http://www.math.com/students/wonders/life/life.htm>>. Acesso em 3 de novembro de 2013.

CASTRO, L. A.; CASTRO, R. O. **Autômatos celulares: implementações de von Neumann, Conway e Wolfram**. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia Vol. III, Nº. 3, Ano 2008. Valinhos/SP.

CLARKE, K. C., GAYDOS, L., and HOPPEN, S., **A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area**. Environment and Planning B 24: 247-261, 1997.

CLARKE, K. C., GAZULIS, N, DIETZEL, C. K., GOLDSTEIN, N. C., **A decade of SLEUTHing: Lessons learned from applications of a cellular automaton land use change model**. Chapter 16 in Fisher, P. (ed) Classics from IJGIS. Twenty Years of the International Journal of Geographical Information Systems and Science. Taylor and Francis, CRC. Boca Raton, FL. pp. 413-425, 2007.

CLARKE, K. C.; GAYDOS, L. J. **Loose coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore**. International Journal of Geographical Information Science, 12:7, 699-714, DOI: 10.1080/136588198241617. 1998.

CLARKE, K. C., DIETZEL, C. GOLDSTEIN, N. C. A. **Decade of Cellular Urban Modeling with SLEUTH: Unresolved Issues and Problems**, Ch. 3 in Planning Support Systems for Cities and Regions (Ed. Brail, R. K., Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, MA, pp 47-60, 2008.

COSTA, J. P. O. H. **Criação de cenários de expansão urbana com recurso a autómatos celulares no apoio ao planeamento e gestão territorial: Cabeceiras de Basto (Norte de Portugal)**. Dissertação apresentada à Faculdade de Letras da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território. Departamento de Geografia. Porto, 2010.

COSTA, S. M. D. **Alteração da cobertura vegetal natural da microbacia do rio Pitimbu – RN devido à ocupação antrópica**. 1995. 19f. Relatório final de pesquisa – Conselho Nacional de desenvolvimento científico e tecnológico – Pró-Reitoria de Pesquisa e pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal.

DIETZEL, C., CLARKE, K. C. **Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model**, Transactions in GIS, 11(1): 29–45, 2007.

EGITO, L. C. M. **Análise da presença de agentes mutagênicos nas águas do Rio Pitimbu/RN**. – Natal, RN, 2007.

FURTADO, B. A., DELDEN, H. **Modelagem urbana e regional com autómatos celulares e agentes: panorama teórico, aplicações e política pública**. Brasília: IPEA, 2011. 42 p. (Texto para Discussão / IPEA, n 1576)

GRIGIO, A. M. **Evolução da paisagem do baixo curso do Rio Piranhas-ASSU 1988-2024: uso de autômatos celulares em modelo dinâmico espacial para simulação de cenários futuros**. Natal, RN: 2008. 216 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo Methods**. Chapman and Hall, London & New York, 1964.

JANTZ C. A., GOETZ S. J., e SHELLEY M. K. **Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore/Washington metropolitan area**. Environment and Planning B 31: 251–71, 2003.

JANTZ, C. A., MORLOCK L. **Modeling Urban Land Use Change in the Upper Delaware River Basin**. May 2011. 29 p.

JANTZ, C. A., MROZINSKI M., COAR E. **Forecasting Land Use Change in Pike and Wayne Counties**, Pennsylvania. April 2009. 45 p.

KOBAYASHI, R. T. **Estudo dos aspectos qualitativos e quantitativos da água e do sedimento no baixo curso do Rio Pitimbu RN**. Natal, RN: 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

LEÃO, S., BISHOP, I., EVANS, D. **Assessing the demand of solid waste disposal in urban region by urban dynamics modelling in a GIS environment**. Resources Conservation & Recycling 33:289-313. 2001.

LI. X., YEH. A. **Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS**. International Journal Of Geographical Information Science [serial online]. June 2002;16(4):323-343. Available from: Computers & Applied Sciences Complete, Ipswich, MA. Accessed July 6, 2013.

LIMA, M. A. **Parque Linear Pitimbu: uma intervenção na ZPA-3**. 148 f. Monografia (Bacharelado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Natal/RN. 2010.

LIRA, S. F. de. **Contribuição ao estudo da poluição hídrica do rio Pitimbu – Eduardo Gomes Parnamirim-RN**. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia. Natal/RN. 1983.

LIU, Y. **Modelling Urban Development with GIS and Cellular Automata**, Boca Raton, CRC Press, 2009.

LIU Y.; PHINN, S. R., **Modelling urban development with cellular automata incorporating fuzzy-set approaches**. 2001. Computers, Environment and Urban Systems, Volume 27, Issue 6, November 2003, Pages 637-658, ISSN 0198-9715, [http://dx.doi.org/10.1016/S0198-9715\(02\)00069-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0198-9715(02)00069-8).

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971502000698>)

LUCENA, L. R. F., FILHO, E. F. R. HINDI, E. C. **O fator estrutural atuante na conexão hidráulica subterrânea entre o Sistema Lacustre do Bonfim e a bacia do rio Pirangi, litoral leste do Rio Grande do Norte**. Rev. Águas Subterrâneas nº 16/ Maio 2002.

LUCENA, L. R. F. de; ROSA FILHO, E. F. da & BITTENCOURT, A. V. L. **A Potenciometria do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do rio Pirangi/RN e considerações sobre a relação com mananciais superficiais**. Revista Águas Subterrâneas nº 18/Janeiro 2004. LPH-UFPR, Centro Politécnico. Curitiba/PR.

MELO, J. G.; REBOUÇAS, A. C.; QUEIROZ, M. A.. **Análise dos componentes do sistema hidrogeológico da área de Natal, RN**. 1994. Águas Subterrâneas, São Paulo, Brasil – eISSN 2179-9784.

MELO, J. G. de. **Impacto do desenvolvimento urbano nas águas subterrâneas de Natal/ RN**. 1995. 196f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MIRANDA, E. E. **Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite**, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 27 abril. 2013.

OLIVEIRA, F. G. **Autodepuração e monitoramento do rio Pitimbu/RN**. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN 1994.

PERES, O. M., POLIDORI, M. C. **Modelos Urbanos baseados em Autômatos Celulares: integrando ambiente natural e o crescimento urbano**. Laboratório de Urbanismo – FAUrb – Universidade Federal de Pelotas (UFPel). 2009. Pelotas-RS.

PINTO, N. N. & ANTUNES, A. P. (2007b) **A cellular automata model for the study of small urban areas**. *5 th European Colloquium on Theoretica and Quantitative Geography*. Montreux, Switzerland.

PULIDO, J. E., JACOBS, T. L., PRATES, E. C. **Structural reliability using Monte Carlo simulation with variance reduction techniques on elastic-plastic structures**. Computer and Structures, p. 419-430, 1992.

RIGHETTO, A. M.; ROCHA, M. A. **Exploração Sustentada do Aquífero Dunas/Barreiras na Cidade de Natal/RN**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10, nº 2, 27-38. Abr/Jun 2005.

SANTOS, A. C. V. **Influência da expansão urbana na paisagem da sub-bacia do rio Pitimbu entre Natal e Parnamirim/RN**. Monografia (Especialização em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia. 1999.

SANTOS, A. C. V. **Mudanças geoambientais na sub-bacia hidrográfica do riacho do tabuleiro com a implementação do centro industrial avançado CIA no município de Macaíba/RN**. Natal, RN: 2002. 72 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia.

SARAIVA, J. M. F. **A utilização de redes neurais em conjunto com o Método de Monte Carlo na análise da confiabilidade de estruturas**. Rio de Janeiro: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1997. (Tese de Doutorado).

SENA, D. S. de. **Avaliação da qualidade da água do Rio Pitimbu-RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal. 2008.

SILVA, E. A, CLARKE K.C, **Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto Portugal**. Computers, Environment and Urban Systems, Volume 26, Issue 6, , Pages 525-552, ISSN 0198-9715, [http://dx.doi.org/10.1016/S0198-9715\(01\)00014-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0198-9715(01)00014-X). November 2002.

SILVA, E. A. & CLARKE, K. C. **Complexity, emergence and cellular urban models: Lessons learned from applying SLEUTH to two Portuguese Metropolitan areas**. *European Planning Studies*, 13, 93 – 116. 2005.

SILVA, E. A. **Cenários da expansão urbana na área Metropolitana de Lisboa**. *Revista de Estudos Regionais – Região Lisboa e Vale do Tejo*, 5, 23 – 41. 2002.

SILVA, V. L. **Caracterização climática da microbacia do Rio Pitimbu/RN**, 40f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia. 1996.

SILVA, V. L.; COSTA, A. M. B.; SILVA, F. M. **Dinâmica da paisagem na microbacia do rio Pitimbu por técnicas de sensoriamento remoto**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 4233-4239. CD-ROM,

On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-16531-PRE/11107). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.16.01.51>>. Acesso em: 25 maio 2013.

TURING, A. M. **On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem.** *Proc. London Maths. Soc*, 42, series 2, 230-265. (1936)

ULAM, S. (1962) **On some mathematical problems connected with patterns of growth of figures.** *Proceedings of Symposia in Applied Mathematics.* American Mathematical Society.

VASCONCELOS, M. V. P. **Ocupação e uso do solo no bairro Planalto – Natal/RN.** Natal, RN: 1999. 56 f. Monografia (Especialização em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia. Natal, 1996.

VON NEUMANN, J. (1951) **The general and logical theory of automata.** IN JEFFRESS, L. A. (Ed. *Cerebral mechanisms in behavior-- The Hixon symposium.* Pasadena, John Wiley and Sons, Inc.

VON NEUMANN, J. **The theory of self-reproducing automata.** A. W. Burks (Ed.), Champaign, IL, USA: University of Illinois Press, 1966.

WICKRAMASURIYA, R. C.; BREGT A. K.; DELDEN, H.; HAGEN-ZANKER, A. **The dynamics of shifting cultivation captured in an extended constrained Cellular Automata land use model.** *Ecological Modelling*, v. 220, 2009.

WOLFRAM, S. **Cellular Automata as models of complexity.** Reprinted from *Nature*; Vol. 311, No. 5985, pp. 419-424, 4 October 1984.

YANG X., LO C. P. **Modelling urban growth and landscape change in the Atlanta metropolitan area.** *International Journal of Geographical Information Science* 17: 463–88. 2003.

YEH, A. G.; LI, X. **Error propagation and model uncertainties of cellular automata in urban simulation with GIS.** In: 7th International Conference on GeoComputation, University of Southampton, UK. 2003.

YEH A. G., LI X. **Errors and uncertainties in urban Cellular Automata.** *Computers, Environment and Urban Systems*, Volume 30, Issue 1, January 2006, Pages 10-28, ISSN 0198-9715, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.007>.

## 9. ANEXOS

Anexo A – Arquivos utilizados no processo de calibração (Cenário 1  
– Células 100 x 100 pixels)



Figura 31 - Mancha urbana 1984



Figura 32 - Mancha urbana 1992



Figura 33 - Mancha urbana 2004



Figura 34 - Mancha Urbana - 2013



Figura 35 - Área de exclusão urbana

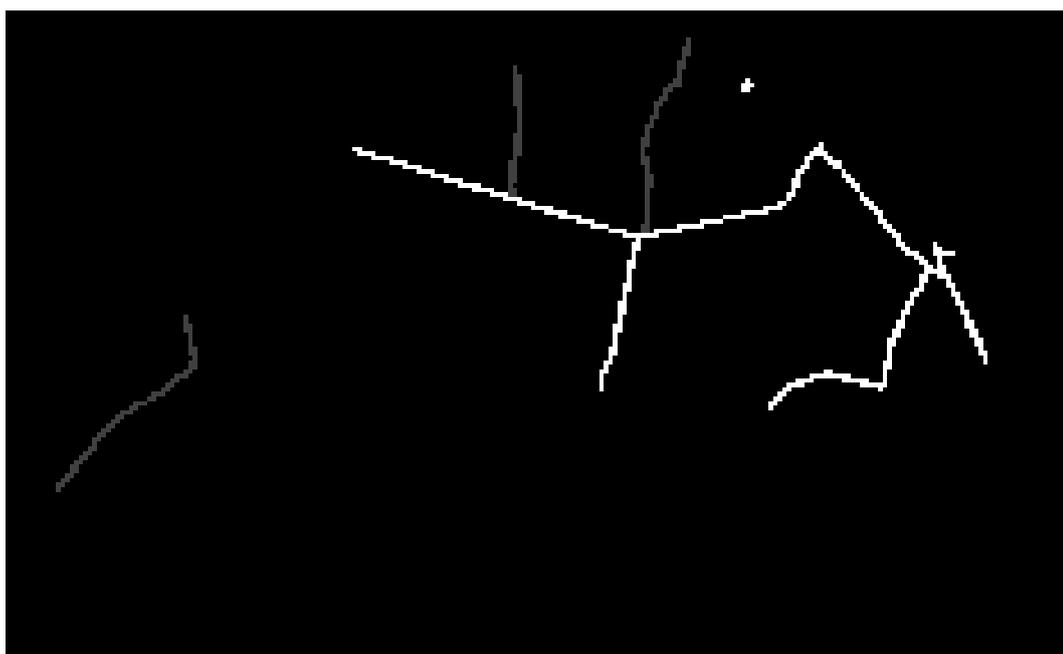


Figura 36 - Road 2004

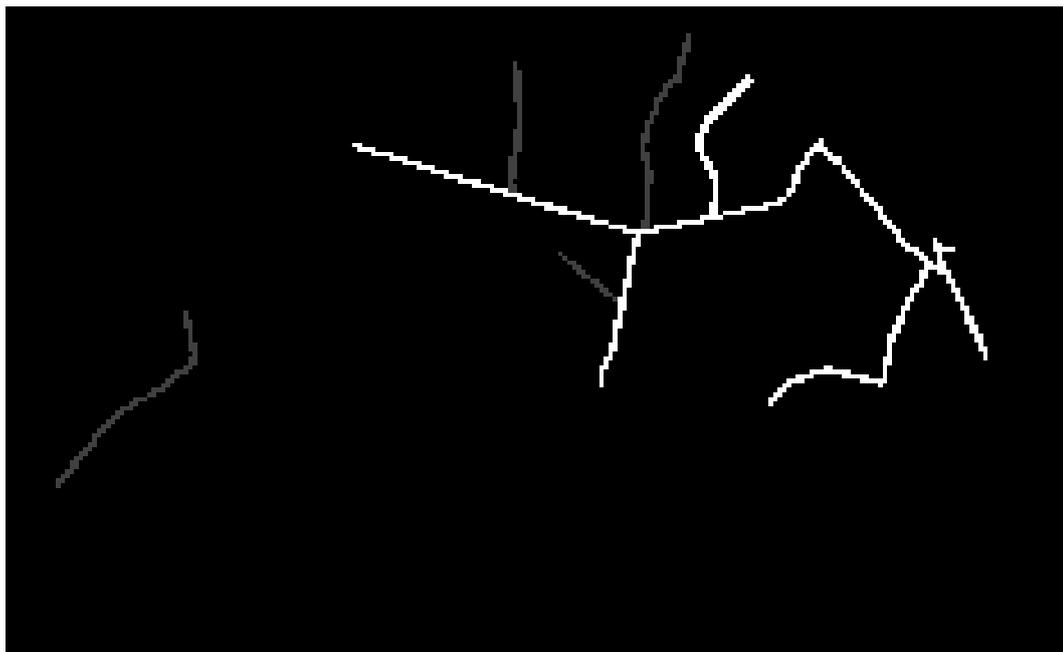


Figura 37 - Road 2013



Figura 38 - Topografia da BHRP

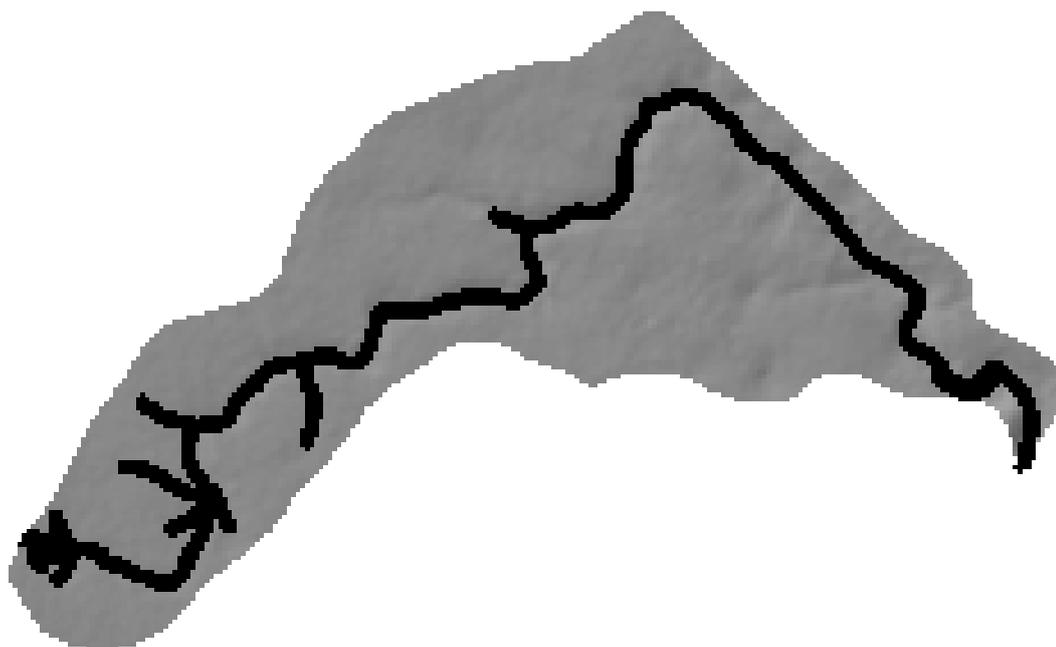


Figura 39 - Relevo sombreado (hillshade)

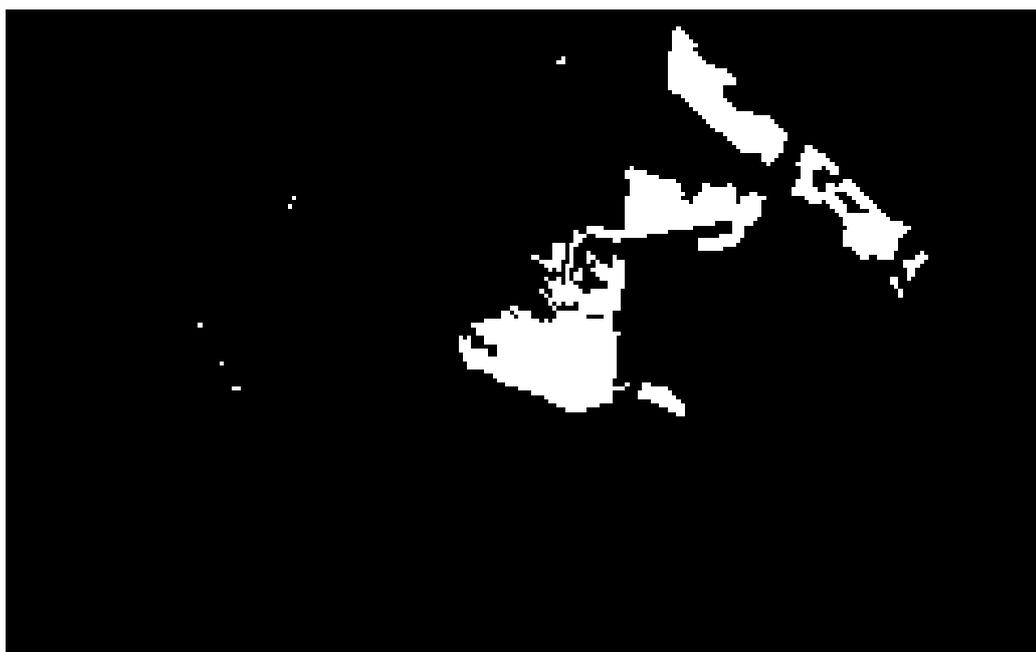
Anexo B – Arquivos utilizados no processo de calibração (Cenário 2  
– Células 100 x 100 pixels)



Figura 40 - Mancha Urbana 1984



**Figura 41 - Mancha Urbana 1992**



**Figura 42 - Mancha Urbana 2004**



Figura 43 - Mancha Urbana 2013



Figura 44 - Área de Exclusão Urbana

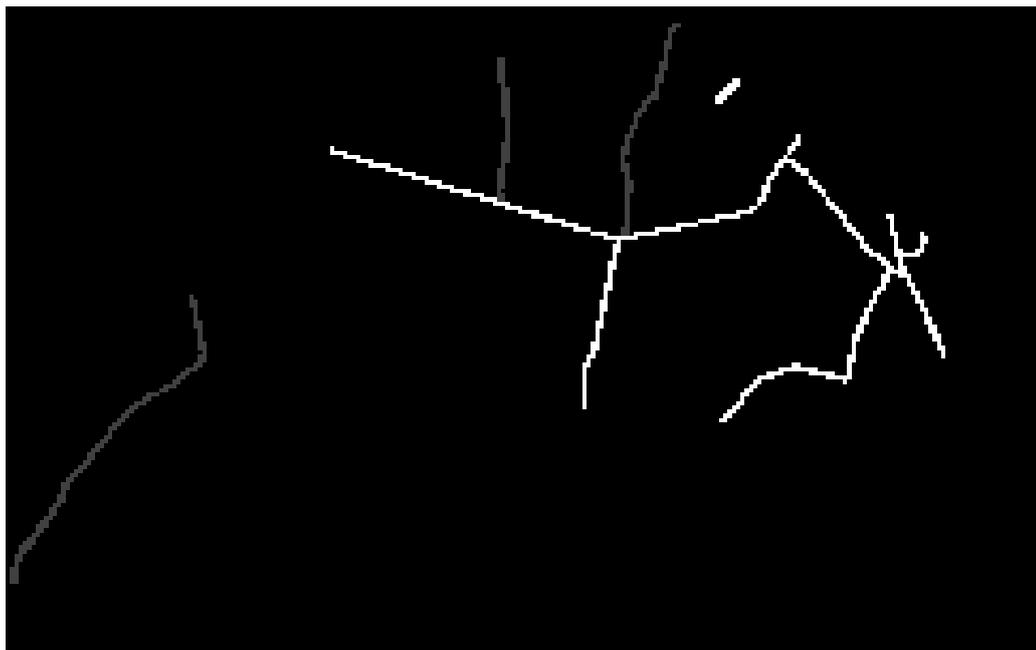


Figura 45 - Road 2004

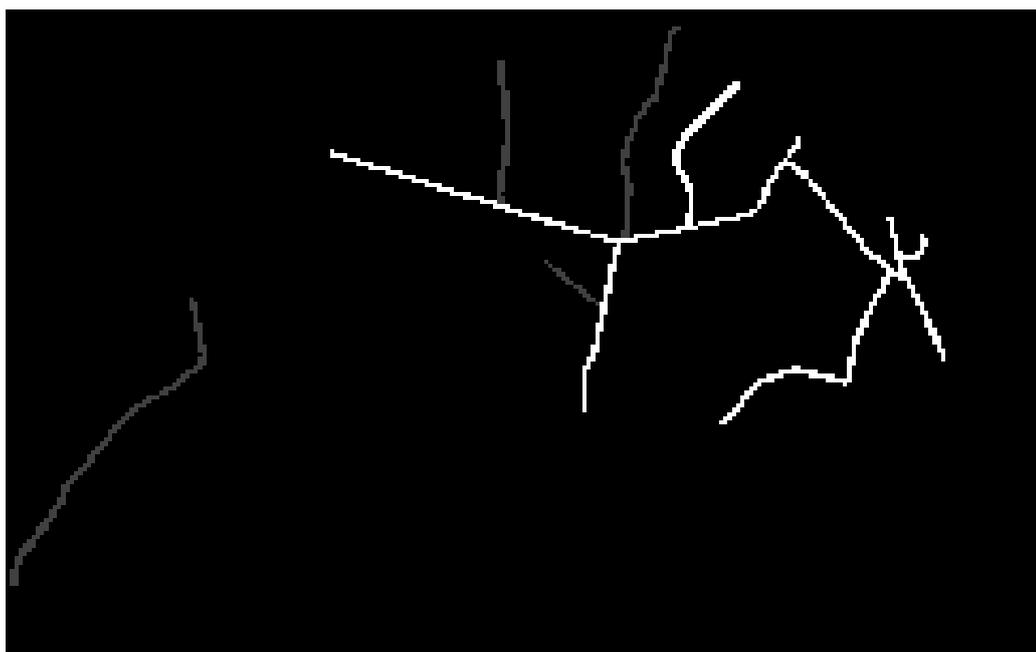
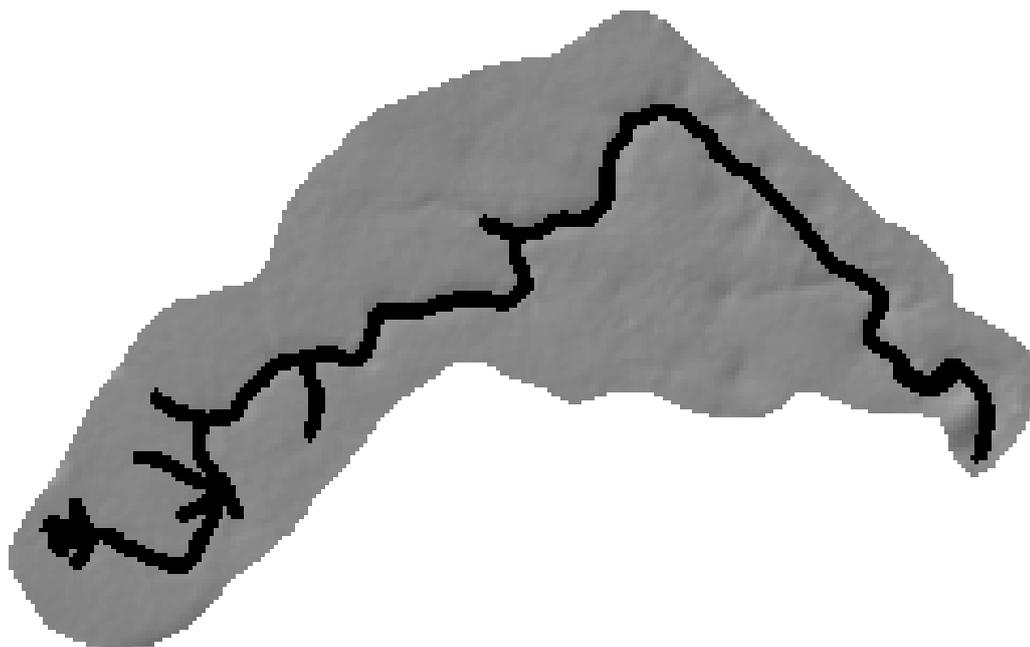


Figura 46 - Road 2013



**Figura 47 – Topografia da região estudada**



**Figura 48 - Relevo sombreado (hillshade)**

## Anexo C – Arquivo (scenario\_pitimbu\_100\_predict) de configuração da simulação para o SLEUTH

```

# FILE: 'scenario file' for SLEUTH land cover transition model
# (UGM v3.0)
# Comments start with #
#
# I. Path Name Variables
# II. Running Status (Echo)
# III. Output ASCII Files
# IV. Log File Preferences
# V. Working Grids
# VI. Random Number Seed
# VII. Monte Carlo Iteration
#VIII. Coefficients
# A. Coefficients and Growth Types
# B. Modes and Coefficient Settings
# IX. Prediction Date Range
# X. Input Images
# XI. Output Images
# XII. Colortable Settings
# A. Date_Color
# B. Non-Landuse Colortable
# C. Land Cover Colortable
# D. Growth Type Images
# E. Deltatron Images
#XIII. Self Modification Parameters

# I.PATH NAME VARIABLES
# INPUT_DIR: relative or absolute path where input image files and
# (if modeling land cover) 'landuse.classes' file are
# located.
# OUTPUT_DIR: relative or absolute path where all output files will
# be located.
# WHIRLGIF_BINARY: relative path to 'whirlgif' gif animation program.
# These must be compiled before execution.
INPUT_DIR=../Input/pitimbu100/
OUTPUT_DIR=../Output/pitimbu100_pre/
WHIRLGIF_BINARY=../Whirlgif/whirlgif

# II. RUNNING STATUS (ECHO)
# Status of model run, monte carlo iteration, and year will be
# printed to the screen during model execution.
ECHO(YES/NO)=yes

# III. Output Files
# INDICATE TYPES OF ASCII DATA FILES TO BE WRITTEN TO OUTPUT_DIRECTORY.
#
# COEFF_FILE: contains coefficient values for every run, monte carlo
# iteration and year.
# AVG_FILE: contains measured values of simulated data averaged over
# monte carlo iterations for every run and control year.
# STD_DEV_FILE: contains standard diviation of averaged values
# in the AVG_FILE.
# MEMORY_MAP: logs memory map to file 'memory.log'
# LOGGING: will create a 'LOG_#' file where # signifies the processor
# number that created the file if running code in parallel.
# Otherwise, # will be 0. Contents of the LOG file may be
# described below.
WRITE_COEFF_FILE(YES/NO)=yes

```

```

WRITE_AVG_FILE (YES/NO)=yes
WRITE_STD_DEV_FILE (YES/NO)=yes
WRITE_MEMORY_MAP (YES/NO)=yes
LOGGING (YES/NO)=YES
#
# NEW OUTPUT LOG FILES, AS OF "VERSION D" of SLEUTH3.0beta_p01:
#
#   RATIO_FILE:  contains the difference, the ratio, and the fractional
#                 change of each modelled value relative to its actual
#                 value.
#
#   SLOPE_FILE:  contains the slope and y-intercept of the regression line
#                 for each statistic, each run, and each control year,
#                 using modelled values as the dependent (fitted) variables.
#
#   XYPOINTS_FILE:  (A TEMPORARY DEBUGGING FILE ONLY!)
#                   contains the actual and fitted values of the population
#                   (cell count) statistic only, preceded by information
#                   pertaining to the overall run. It is designed so that
#                   the results may be plotted easily using a simple MATLAB
#                   program or the equivalent.  It is not yet otherwise
#                   documented!
#
WRITE_RATIO_FILE (YES/NO)=yes
#
WRITE_SLOPE_FILE (YES/NO)=yes
#
WRITE_XYPOINTS_FILE (YES/NO)=no
#
# IV. Log File Preferences
# INDICATE CONTENT OF LOG_# FILE (IF LOGGING == ON).
# LANDCLASS_SUMMARY: (if landuse is being modeled) summary of input
#                   from 'landuse.classes' file
# SLOPE_WEIGHTS (YES/NO): annual slope weight values as effected
#                         by slope_coeff
# READS (YES/NO)= notes if a file is read in
# WRITES (YES/NO)= notes if a file is written
# COLORTABLES (YES/NO)= rgb lookup tables for all colortables generated
# PROCESSING_STATUS (0:off/1:low verbosity/2:high verbosity)=
# TRANSITION_MATRIX (YES/NO)= pixel count and annual probability of
#                             land class transitions
# URBANIZATION_ATTEMPTS (YES/NO)= number of times an attempt to urbanize
#                                 a pixel occurred
# INITIAL_COEFFICIENTS (YES/NO)= initial coefficient values for
#                                 each monte carlo
# BASE_STATISTICS (YES/NO)= measurements of urban control year data
# DEBUG (YES/NO)= data dump of igrd object and grid pointers
# TIMINGS (0:off/1:low verbosity/2:high verbosity)= time spent within
#               each module. If running in parallel, LOG_0 will contain timing for
#               complete job.
LOG_LANDCLASS_SUMMARY (YES/NO)=yes
LOG_SLOPE_WEIGHTS (YES/NO)=no
LOG_READS (YES/NO)=yes
LOG_WRITES (YES/NO)=yes
LOG_COLORTABLES (YES/NO)=no
LOG_PROCESSING_STATUS (0:off/1:low verbosity/2:high verbosity)=1
LOG_TRANSITION_MATRIX (YES/NO)=yes
LOG_URBANIZATION_ATTEMPTS (YES/NO)=no
LOG_INITIAL_COEFFICIENTS (YES/NO)=no
LOG_BASE_STATISTICS (YES/NO)=yes
LOG_DEBUG (YES/NO)= yes

```

```

LOG_TIMINGS(0:off/1:low verbosity/2:high verbosity)=1

# V. WORKING GRIDS
# The number of working grids needed from memory during model execution is
# designated up front. This number may change depending upon modes. If
# NUM_WORKING_GRIDS needs to be increased, the execution will be exited
# and an error message will be written to the screen and to 'ERROR_LOG'
# in the OUTPUT_DIRECTORY. If the number may be decreased an optimal
# number will be written to the end of the LOG_0 file.
NUM_WORKING_GRIDS=6

# VI. RANDOM NUMBER SEED
# This number initializes the random number generator. This seed will be
# used to initialize each model run.
RANDOM_SEED=5

# VII. MONTE CARLO ITERATIONS
# Each model run may be completed in a monte carlo fashion.
# For CALIBRATION or TEST mode measurements of simulated data will be
# taken for years of known data, and averaged over the number of monte
# carlo iterations. These averages are written to the AVG_FILE, and
# the associated standard deviation is written to the STD_DEV_FILE.
# The averaged values are compared to the known data, and a Pearson
# correlation coefficient measure is calculated and written to the
# control_stats.log file. The input per run may be associated across
# files using the 'index' number in the files' first column.
#
MONTE_CARLO_ITERATIONS=100

# VIII. COEFFICIENTS
# The coefficients effect how the growth rules are applied to the data.
# Setting requirements:
#   *_START values >= *_STOP values
#   *_STEP values > 0
#   if no coefficient increment is desired:
#     *_START == *_STOP
#     *_STEP == 1
# For additional information about how these values affect simulated
# land cover change see our publications and PROJECT GIGALOPOLIS
# site: (www.ncgia.ucsb.edu/project/gig/About/abGrowth.htm).
# A. COEFFICIENTS AND GROWTH TYPES
#   DIFFUSION: affects SPONTANEOUS GROWTH and search distance along the
#               road network as part of ROAD INFLUENCED GROWTH.
#   BREED: NEW SPREADING CENTER probability and affects number of ROAD
#           INFLUENCED GROWTH attempts.
#   SPREAD: the probability of ORGANIC GROWTH from established urban
#           pixels occurring.
#   SLOPE_RESISTANCE: affects the influence of slope to urbanization. As
#                       value increases, the ability to urbanize
#                       ever steepening slopes decreases.
#   ROAD_GRAVITY: affects the outward distance from a selected pixel for
#                 which a road pixel will be searched for as part of
#                 ROAD INFLUENCED GROWTH.
#
# B. MODES AND COEFFICIENT SETTINGS
#   TEST: TEST mode will perform a single run through the historical
#         data using the CALIBRATION_*_START values to initialize
#         growth, complete the MONTE_CARLO_ITERATIONS, and then conclude
#         execution. GIF images of the simulated urban growth will be
#         written to the OUTPUT_DIRECTORY.

```

```

# CALIBRATE: CALIBRATE will perform monte carlo runs through the
#             historical data using every combination of the
#             coefficient values indicated. The CALIBRATION_*_START
#             coefficient values will initialize the first run. A
#             coefficient will then be increased by its *_STEP value,
#             and another run performed. This will be repeated for all
#             possible permutations of given ranges and increments.
# PREDICTION: PREDICTION will perform a single run, in monte carlo
#             fashion, using the PREDICTION_*_BEST_FIT values
#             for initialization.

```

```

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 0
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP= 25
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP= 100

```

```

CALIBRATION_BREED_START= 0
CALIBRATION_BREED_STEP= 25
CALIBRATION_BREED_STOP= 100

```

```

CALIBRATION_SPREAD_START= 0
CALIBRATION_SPREAD_STEP= 25
CALIBRATION_SPREAD_STOP= 100

```

```

CALIBRATION_SLOPE_START= 0
CALIBRATION_SLOPE_STEP= 25
CALIBRATION_SLOPE_STOP= 100

```

```

CALIBRATION_ROAD_START= 0
CALIBRATION_ROAD_STEP= 25
CALIBRATION_ROAD_STOP= 100

```

```

PREDICTION_DIFFUSION_BEST_FIT= 67
PREDICTION_BREED_BEST_FIT= 1
PREDICTION_SPREAD_BEST_FIT= 99
PREDICTION_SLOPE_BEST_FIT= 13
PREDICTION_ROAD_BEST_FIT= 7

```

```

#
# NEW AUXILLARY PARAMETERS AFFECTING OVERALL URBANIZATION RATE,
# AND ROAD GROWTH DIFFUSION AND BREEDING
#

```

```

# AUX_DIFFUSION_MULT changes the proportionality constant
#                     between the diffusion_value and the current
#                     diffusion coefficient, thereby altering
#                     the total number of times urbanization
#                     is attempted (default = 0.005).
#

```

```

# AUX_DIFFUSION_COEFF changes the rate of ROAD GROWTH related
#                     diffusion relative to the current normal
#                     diffusion. A positive value REPLACES
#                     the diffusion coefficient; a negative value
#                     SCALES toe diffusion coefficient.
#

```

```

# AUX_BREED_COEFF changes the rate of ROAD GROWTH related
#                 breeding relative to the current normal
#                 rate of greeding. A positive value REPLACES
#                 the breed coefficient; a negative value
#                 SCALES the breed coefficient.
#

```

```

AUX_DIFFUSION_MULT=0.016

```

```

#
AUX_DIFFUSION_COEFF=-1

```

```

#
AUX_BREED_COEFF=-1
#
# IX. PREDICTION DATE RANGE
# The urban and road images used to initialize growth during
# prediction are those with dates equal to, or greater than,
# the PREDICTION_START_DATE. If the PREDICTION_START_DATE is greater
# than any of the urban dates, the last urban file on the list will be
# used. Similarly, if the PREDICTION_START_DATE is greater
# than any of the road dates, the last road file on the list will be
# used. The prediction run will terminate at PREDICTION_STOP_DATE.
#
PREDICTION_START_DATE=2013
PREDICTION_STOP_DATE=2033

# X. INPUT IMAGES
# The model expects grayscale, GIF image files with file name
# format as described below. For more information see our
# PROJECT GIGALOPOLIS web site:
# (www.ncgia.ucsb.edu/project/gig/About/dtInput.htm).
#
# IF LAND COVER IS NOT BEING MODELED: Remove or comment out
# the LANDUSE_DATA data input flags below.
#
#   < > = user selected fields
#   [< >] = optional fields
#
# Urban data GIFs
# format: <location>.urban.<date>.[<user info>].gif
#
#
URBAN_DATA= pitimbu.urban.1984.gif
URBAN_DATA= pitimbu.urban.1992.gif
URBAN_DATA= pitimbu.urban.2004.gif
URBAN_DATA= pitimbu.urban.2013.gif
#
# Road data GIFs
# format: <location>.roads.<date>.[<user info>].gif
#
#ROAD_DATA= howard.roads.1984.gif
#ROAD_DATA= howard.roads.1992.gif
ROAD_DATA= pitimbu.roads.2004.gif
ROAD_DATA= pitimbu.roads.2013.gif
#
# Landuse data GIFs
# format: <location>.landuse.<date>.[<user info>].gif
#
#LANDUSE_DATA= demo200.landuse.1930.gif
#LANDUSE_DATA= demo200.landuse.1990.gif
#
# Excluded data GIF
# format: <location>.excluded.[<user info>].gif
#
#EXCLUDED_DATA= howard.excluded.gif
#EXCLUDED_DATA= howard.excluded_banded.gif
EXCLUDED_DATA= pitimbu.excluded.gif
#
# Slope data GIF
# format: <location>.slope.[<user info>].gif
#
SLOPE_DATA= pitimbu.slope.gif

```

```

#SLOPE_DATA= howard.slope.gif
#
# Background data GIF
# format: <location>.hillshade.[<user info>].gif
#
BACKGROUND_DATA= pitimbu.hillshade.gif
#BACKGROUND_DATA= nyc.hillshade.gif

# XI. OUTPUT IMAGES
# WRITE_COLOR_KEY_IMAGES: Creates image maps of each colortable.
#                           File name format: 'key_[type]_COLORMAP'
#                           where [type] represents the colortable.
# ECHO_IMAGE_FILES: Creates GIF of each input file used in that job.
#                   File names format: 'echo_of_[input_filename]'
#                   where [input_filename] represents the input name.
# ANIMATION: if whirlgif has been compiled, and the WHIRLGIF_BINARY
#             path has been defined, animated gifs beginning with the
#             file name 'animated' will be created in PREDICT mode.
WRITE_COLOR_KEY_IMAGES(YES/NO)=no
ECHO_IMAGE_FILES(YES/NO)=no
ANIMATION(YES/NO)= no

# XII. COLORTABLE SETTINGS
# A. DATE COLOR SETTING
#   The date will automatically be placed in the lower left corner
#   of output images. DATE_COLOR may be designated in with red, green,
#   and blue values (format: <red_value, green_value, blue_value> )
#   or with hexadecimal beginning with '0X' (format: <0X#####> ).
#default DATE_COLOR= 0XFFFFFF white
DATE_COLOR=      0XFFFFFF #white

# B. URBAN (NON-LANDUSE) COLORTABLE SETTINGS
#   1. URBAN MODE OUTPUTS
#       TEST mode: Annual images of simulated urban growth will be
#                 created using SEED_COLOR to indicate urbanized areas.

#       CALIBRATE mode: Images will not be created.
#       PREDICT mode: Annual probability images of simulated urban
#                     growth will be created using the PROBABILITY
#                     _COLORTABLE. The initializing urban data will be
#                     indicated by SEED_COLOR.

#   2. COLORTABLE SETTINGS
#       SEED_COLOR: initializing and extrapolated historic urban extent

#       WATER_COLOR: BACKGROUND_DATA is used as a backdrop for

#                     simulated urban growth. If pixels in this file
#                     contain the value zero (0), they will be filled
#                     with the color value in WATER_COLOR. In this way,
#                     major water bodies in a study area may be included
#                     in output images.
#SEED_COLOR= 0XFFFF00 #yellow
SEED_COLOR=  0, 0, 0 #black
#WATER_COLOR= 0X0000FF # blue
WATER_COLOR= 20, 52, 214 # royal blue

#   3. PROBABILITY COLORTABLE FOR URBAN GROWTH
#       For PREDICTION, annual probability images of urban growth
#       will be created using the monte carlo iterations. In these
#       images, the higher the value the more likely urbanizaion is.

```

```

#       In order to interpret these 'continuous' values more easily
#       they may be color classified by range.
#
#       If 'hex' is not present then the range is transparent.
#       The transparent range must be the first on the list.
#       The max number of entries is 100.
#       PROBABILITY_COLOR: a color value in hexadecimal that indicates
#                           a probability range.
#       low/upper: indicate the boundaries of the range.
#
#           low,  upper,  hex,  (Optional Name)
PROBABILITY_COLOR=  0,    1,      , #transparent
PROBABILITY_COLOR=  1,   10, 0X00ff33, #green
PROBABILITY_COLOR= 10,   20, 0X00cc33, #
PROBABILITY_COLOR= 20,   30, 0X009933, #
PROBABILITY_COLOR= 30,   40, 0X006666, #blue
PROBABILITY_COLOR= 40,   50, 0X003366, #
PROBABILITY_COLOR= 50,   60, 0X000066, #
PROBABILITY_COLOR= 60,   70, 0XFF6A6A, #lt orange
PROBABILITY_COLOR= 70,   80, 0Xff7F00, #dark orange
PROBABILITY_COLOR= 80,   90, 0Xff3E96, #violetred
PROBABILITY_COLOR= 90,  100, 0Xff0033, #dark red

# C. LAND COVER COLORTABLE
# Land cover input images should be in grayscale GIF image format.
# The 'pix' value indicates a land class grayscale pixel value in
# the image. If desired, the model will create color classified
# land cover output. The output colortable is designated by the
# 'hex/rgb' values.
#   pix: input land class pixel value
#   name: text string indicating land class
#   flag: special case land classes
#       URB - urban class (area is included in urban input data
#           and will not be transitioned by deltatron)
#       UNC - unclass (NODATA areas in image)
#       EXC - excluded (land class will be ignored by deltatron)
#   hex/rgb: hexidecimal or rgb (red, green, blue) output colors
#
#           pix, name,      flag,      hex/rgb, #comment
LANDUSE_CLASS=  0,  Unclass ,  UNC    , 0X000000
LANDUSE_CLASS=  1,  Urban   ,  URB   , 0X8b2323 #dark red
LANDUSE_CLASS=  2,  Agric   ,       , 0Xffec8b #pale yellow
LANDUSE_CLASS=  3,  Range   ,       , 0Xee9a49 #tan
LANDUSE_CLASS=  4,  Forest  ,       , 0X006400
LANDUSE_CLASS=  5,  Water   ,  EXC   , 0X104e8b
LANDUSE_CLASS=  6,  Wetland ,       , 0X483d8b
LANDUSE_CLASS=  7,  Barren  ,       , 0Xeec591

# D. GROWTH TYPE IMAGE OUTPUT CONTROL AND COLORTABLE
#
# From here you can control the output of the Z grid
# (urban growth) just after it is returned from the spr_spread()
# function. In this way it is possible to see the different types
# of growth that have occured for a particular growth cycle.
#
# VIEW_GROWTH_TYPES(YES/NO) provides an on/off
# toggle to control whether the images are generated.
#
# GROWTH_TYPE_PRINT_WINDOW provides a print window
# to control the amount of images created.
# format: <start_run>,<end_run>,<start_monte_carlo>,

```

```

#           <end_monte_carlo>,<start_year>,<end_year>
# for example:
# GROWTH_TYPE_PRINT_WINDOW=run1,run2,mc1,mc2,year1,year2
# so images are only created when
# run1<= current run <=run2 AND
# mc1 <= current monte carlo <= mc2 AND
# year1 <= currrent year <= year2
#
# 0 == first
VIEW_GROWTH_TYPES(YES/NO)=NO
GROWTH_TYPE_PRINT_WINDOW=0,0,0,0,1987,2020
PHASE0G_GROWTH_COLOR= 0xff0000 # seed urban area
PHASE1G_GROWTH_COLOR= 0X00ff00 # diffusion growth
PHASE2G_GROWTH_COLOR= 0X0000ff # NOT USED
PHASE3G_GROWTH_COLOR= 0Xffff00 # breed growth
PHASE4G_GROWTH_COLOR= 0Xffffff # spread growth
PHASE5G_GROWTH_COLOR= 0X00ffff # road influenced growth

#*****
#
# E. DELTATRON AGING SECTION
#
# From here you can control the output of the deltatron grid
# just before they are aged
#
# VIEW_DELTATRON_AGING(YES/NO) provides an on/off
# toggle to control whether the images are generated.
#
# DELTATRON_PRINT_WINDOW provides a print window
# to control the amount of images created.
# format: <start_run>,<end_run>,<start_monte_carlo>,<end_monte_carlo>,<start_year>,<end_year>
# for example:
# DELTATRON_PRINT_WINDOW=run1,run2,mc1,mc2,year1,year2
# so images are only created when
# run1<= current run <=run2 AND
# mc1 <= current monte carlo <= mc2 AND
# year1 <= currrent year <= year2
# 0 == first
VIEW_DELTATRON_AGING(YES/NO)=NO
DELTATRON_PRINT_WINDOW=0,0,0,0,1930,2020
DELTATRON_COLOR= 0x000000 # index 0 No or dead deltatron
DELTATRON_COLOR= 0X00FF00 # index 1 age = 1 year
DELTATRON_COLOR= 0X00D200 # index 2 age = 2 year
DELTATRON_COLOR= 0X00AA00 # index 3 age = 3 year
DELTATRON_COLOR= 0X008200 # index 4 age = 4 year
DELTATRON_COLOR= 0X005A00 # index 5 age = 5 year
# XIII. SELF-MODIFICATION PARAMETERS
# SLEUTH is a self-modifying cellular automata. For more
# information see our PROJECT GIGALOPOLIS web site
# (www.ncgia.ucsb.edu/project/gig/About/abGrowth.htm)
# and publications (and/or grep 'self modification' in code).
ROAD_GRAV_SENSITIVITY=0.01
SLOPE_SENSITIVITY=0.1
CRITICAL_LOW=0.97
CRITICAL_HIGH=1.3
#CRITICAL_LOW=0.0
#CRITICAL_HIGH=1000000000000000.0
CRITICAL_SLOPE=15.0
BOOM=1.01
BUST=0.09

```