

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE GEOGRAFIA, DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Antonio José Pereira Almeida

**IMPLICAÇÕES DA URBANIZAÇÃO NO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO
DA BACIA ENDORREICA DO TABULEIRO DO MARTINS, MACEIÓ/AL**

Maceió-AL
2016

ANTONIO JOSÉ PEREIRA ALMEIDA

**IMPLICAÇÕES DA URBANIZAÇÃO NO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO
DA BACIA ENDORREICA DO TABULEIRO DO MARTINS, MACEIÓ/AL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Ferreira Neto

Maceió-AL
2016

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale

A498i Almeida, Antonio José Pereira.
Implicações da urbanização no comportamento hidrológico da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, Maceió/AL / Antonio José Pereira Almeida. – 2016.
145 f. : il.

Orientador: José Vicente Ferreira Neto.
Dissertação (mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente. Curso de Geografia. Maceió, 2016.

Bibliografia: f. 126-133.
Apêndice: f. 134-145.

1. Solo – Impermeabilização. 2. Bacia endorreica – Maceió (AL).
3. Hidrologia – Modelos computacionais. I. Título.

CDU: 911.2:556.51(813.5)

Folha de Aprovação

AUTOR: ANTONIO JOSÉ PEREIRA ALMEIDA

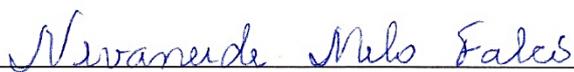
IMPLICAÇÕES DA URBANIZAÇÃO NO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA ENDORREICA DO TABULEIRO DO MARTINS, MACEIÓ/AL / Dissertação de mestrado em Geografia, da Universidade Federal de Alagoas, na forma normalizada e de uso obrigatório.

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 25 de agosto de 2016.


Prof. Dr. José Vicente Ferreira Neto – PPGG/UFAL (Orientador)

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Valmir de Albuquerque Pedrosa – PPGRHS/UFAL (Examinador externo)


Prof.^a Dr.^a Nivaneide Alves de Melo Falcão – PPGG/UFAL (Examinador Interno)

À minha mãe Gilda, com todo amor, carinho e respeito.
À minha amada esposa Tatiana, exemplo de amor e companheirismo.
À minha pequena flor, minha filha Maria Luísa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Ferreira, pela confiança depositada e apoio em todos os momentos, o qual se mostrou um orientador dedicado, não descuidando um só instante na sua tarefa de educador.

À minha esposa Tatiana, que, com sua compreensão, incentivo e dedicação, acompanhou o dia-a-dia deste trabalho, minha cúmplice em mais este momento. Todas as palavras possíveis ainda seriam insuficientes para que eu pudesse expressar o meu enorme carinho e amor por essa pessoa tão especial.

Ao meus pais e toda família que sempre me apoiaram de todas as formas e acompanharam minha jornada.

Aos meus amigos e colegas da Geografia, Walber Gama, Kleyton Tavares, Bruno Timóteo, Klebson da Silva, Mikael Timóteo, Benício Monte, Sherlilton Alves, Clécio Santo, entre outros que sempre me incentivaram e me ajudaram. Aos meus outros importantes amigos como João Paulo, Gustavo Neri pela compreensão e confiança na minha capacidade.

Aos companheiros de turma, Sinval, Targino, Wanubya, Tairan, Antonio Lopes, Ezequias, Rivaldo, pela convivência no dia-a-dia, que compartilharam as dificuldades das disciplinas, trabalhos e provas, tornando-o mais agradável.

A todos os professores e técnicos que fazem parte do Programa de Pós Graduação em Geografia da UFAL, por fazerem parte dessa trajetória, em especial, ao Professor Paulo Rogério e o secretário Washington.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas – FAPEAL, pela concessão da bolsa de estudos durante o desenvolvimento do mestrado.

RESUMO

A crescente expansão urbana que Maceió (AL) passou ao longo de sua história, e vem experimentando de forma mais acelerada nas últimas décadas, não se fez acompanhar de um planejamento racional do uso e ocupação do solo, o que ocasionou diversos problemas como a supressão da cobertura vegetal e sua substituição por superfícies impermeáveis, alterando assim a dinâmica dos processos hidrológicos antes existentes na região. O presente trabalho partiu da hipótese que a expansão e o crescimento das cidades interferem no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas inseridas no meio urbano. A impermeabilização do solo diminui a infiltração, afetando a recarga dos aquíferos, aumenta o escoamento superficial das águas pluviais e, conseqüentemente, acarreta no aumento dos processos de inundação. Nesse contexto, esse trabalho caracteriza a evolução espacial e temporal da urbanização da bacia endorreica do Tabuleiro dos Martins (Maceió/AL) e seus impactos sobre o escoamento superficial e a recarga dos sistemas aquíferos locais. Para tanto, a análise, a integração dos dados, dos parâmetros hidrológicos e o mapeamento são realizados em ambiente de um Sistema Geográfico de Informação (SGI), aplicando-se dois modelos hidrológicos para definição do escoamento superficial (modelo SCS-CN) e do armazenamento d'água no solo (Potencial de recarga de água no solo). A avaliação temporal do processo de urbanização é feita em três cenários: ano 1988; ano 2002; e ano 2013. Dessa forma, a pesquisa teve por objetivo produzir informações que possam subsidiar o planejamento de uso e ocupação do solo de modo a minimizar o impacto hidrológico na bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, importante área de recarga dos sistemas aquíferos, em especial o Barreiras, bastante utilizado tanto para o abastecimento humano da cidade de Maceió como também para o abastecimento d'água das indústrias locais. Os resultados obtidos mostraram uma correlação existente entre o aumento da impermeabilização do solo e as implicações hidrológicas decorrentes. Verificou-se, a partir dos resultados da análise multitemporal da cobertura superficial do solo, que o avanço do processo de urbanização na bacia provocou significativo efeito sobre o sistema hidrológico da região. A aplicação dos modelos hidrológicos comprovou que o processo de ocupação diminuiu o tempo de concentração do escoamento, que conseqüentemente, aumentou a velocidade e o volume escoado, e diminuiu a capacidade de infiltração e recarga dos aquíferos.

Palavras-chave: Impermeabilização do solo. Bacia endorreica. Geoprocessamento. Modelos hidrológicos

ABSTRACT

The increasing urban expansion that Maceió (AL) experienced throughout its history and has been experiencing more accelerated in recent decades, did not follow a rational planning of soil use and occupation, which caused several problems such as the removal of vegetation and its replacement by impermeable surfaces, thereby changing the dynamics of hydrological processes existing in the region before. This work started from the hypothesis that the expansion and the growth of cities interfere in watershed hydrological behavior inserted in the urban environment. Soil sealing reduces infiltration, affecting recharge of aquifers, increases the runoff of rainwater and, consequently, leads to increase of flooding processes. In this context, this work characterizes the spatial and temporal evolution of the urbanization in endorheic basin Tabuleiro do Martins (Maceió/AL) and its impacts on runoff and groundwater recharge of local aquifers systems. To this end, analysis, data integration, hydrological parameters and mapping are performed in an environment of a Geographic Information System (GIS), applying two hydrological models to define of runoff (SCS-CN model) and water storage in soil (Potential ground water recharge). The temporal assessment of the urbanization process is done in three scenarios: year 1988; year 2002; and year 2013. In this way, the research aimed to produce information that could subsidize the planning of soil use and occupation in order to minimize the impact on hydrological endorheic basin Tabuleiro do Martins, important area of recharge of the aquifer systems, in particular the Barreiras System, widely used both for human supply in Maceió city as well as for local industries water supply. The results showed a correlation between increased soil sealing and hydrological implications. It was found from the results of multi-temporal analysis of surface soil cover, the advance of the urbanization process in the basin caused a significant effect on the hydrological system of the region. The hydrological models applications proved that the occupation process decreased time of flow concentration, which consequently increased the speed and volume disposed, and decreased infiltration capacity and recharge aquifers.

Keywords: Soil impermeabilization. Endorheic basin. Geoprocessing. Hydrological models

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Alterações no balanço hídrico em decorrência da urbanização.....	22
Figura 2 – Parte das imagens do ano de 1988 (a), 2002 (b) e 2013 (c) utilizadas no estudo. .	40
Figura 3 - Hidrograma Unitário Sintético Triangular.....	533
Figura 4 – Fluxograma metodológico	56
Figura 5 – Localização da área de estudo, bacia endorreica do Tabuleiro do Martins.	59
Figura 6 – Medias pluviométricas mensais, estação Maceió (1913 a 1985).....	61
Figura 7 - Pluviometria anual, estação Maceió (1913 a 1985).....	61
Figura 8 - Representação dos elementos do ciclo hidrológico em bacia aberta e bacia fechada	64
Figura 9 – Configuração e situação das áreas de drenagem na década de 60.	67
Figura 10 - Perfil Geológico SW – NE, das unidades litoestratigráficas.	69
Figura 11 - Localização das lagoas de retenção e da descarga da Macrodrenagem do Tabuleiro	71
Figura 12 - Evolução da malha urbana da cidade de Maceió-AL.	72
Figura 13 - Evolução da ocupação urbana na área da Bacia Endorreica (1950-1990).....	72
Figura 14 – Evolução populacional na área da bacia nos anos de 1991, 2000 e 2010.....	75
Figura 15 – Uso e cobertura do solo da bacia endorreica no ano de 1988.....	78
Figura 16 – Uso e cobertura do solo da bacia endorreica no ano de 2002	79
Figura 17 – Uso e cobertura do solo da bacia endorreica no ano de 2013.	80
Figura 18 - Áreas impermeabilizadas na bacia endorreica nos ano de 1988.....	84
Figura 19 - Áreas impermeabilizadas na bacia endorreica no ano de 2002.	85
Figura 20 - Áreas impermeabilizadas na bacia endorreica nos ano de 2013.....	86
Figura 21 - Evolução das áreas impermeáveis da bacia Endorreica do Tabuleiro do Martins	87
Figura 22 – Mapas com os valores de CN nos respectivos cenários analisados.	90
Figura 23 – Mapa dos índices de Coeficiente de Infiltração no ano de 1988.	93
Figura 24 – Mapa dos índices de Coeficiente de Infiltração no ano de 2002.	94
Figura 25 – Mapa dos índices de Coeficiente de Infiltração no ano de 2013.	94
Figura 26 – Mapa dos índices de Coeficiente Escoamento Superficial do ano de 1988.....	98
Figura 27 – Mapa dos índices de Coeficiente Escoamento Superficial do ano de 2002.....	98
Figura 28 – Mapa dos índices de Coeficiente Escoamento Superficial do ano de 2013.....	90

Figura 29 - Mapa Potencial de Recarga do solo para o ano de 1988	100
Figura 30 – Mapa Potencial de Recarga do solo para o ano de 2002.....	101
Figura 31 – Mapa Potencial de Recarga do solo para o ano de 2013.....	101
Figura 32 - Hietogramas para os períodos de retorno 5, 10, e 25 anos – Método dos blocos alternados.	104
Figura 33 - hidrograma gerado para cenário de 1988 para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.....	105
Figura 34 - hidrograma gerado para cenário de 2002 para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.....	105
Figura 35 - hidrograma gerado para cenário de 2013 para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.....	105
Figura 36 - hidrogramas gerados para tempo de retorno de 5 anos para os cenários de 1988, 2002 e 2013.	106
Figura 37 - hidrogramas gerados para tempo de retorno de 10 anos para os cenários de 1988, 2002 e 2013.	106
Figura 38 - hidrogramas gerados para tempo de retorno de 25 anos para os cenários de 1988, 2002 e 2013.	107
Figura 39 - Valores das lâminas d’água para os cenários de 1988, 2002 e 2013 e os respectivos tempos de retorno	109
Figura 40 - Localização (em laranja) da porção de menor cota altimétrica da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins.....	110
Figura 41 - Valores das lâminas d’água para o cenário de 2013 e os respectivos tempos de retorno da área de baixa cota altimétrica da bacia (inferior a 70m).	111
Figura 42 - Mapas de concentração do escoamento superficial nos respectivos cenários analisados.....	112
Figura 43 – Mapa do estado atual de recarga dos aquíferos da bacia.	115
Figura 44 – Mapa potenciométrico para ano de referência de 1988.	116
Figura 45 - Mapa potenciométrico para ano de referência de 2002.	116
Figura 46 - Mapa potenciométrico para ano de referência de 2013.	117
Figura 47 – Mapa hipotético de uso e cobertura do solo para o ano de 2025.	120
Figura 48 - Alterações identificadas na área da bacia no ano de 2016.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da equação IDF para a cidade de Maceió.....	52
Tabela 2 – Uso e cobertura do solo na área da bacia endorreica nos anos de 1988,2002 e 2013	76
Tabela 3 - Expansão e retração das classes de usos e cobertura do solo nos períodos: 1988- 2002 e 2002-2013.	81
Tabela 4 – valores de CN em relação ao uso e cobertura do solo.	89
Tabela 5 – Valores de S em relação aos valores CN	92
Tabela 6 – Valores I_a dados em função da uso e cobertura superficial.	95
Tabela 7 – Valores de C em relação ao uso e cobertura superficial da bacia.....	96
Tabela 8 – Classes definidas e seus percentuais de áreas ocupadas.	97
Tabela 9 – Potencial de recarga do solo na área da bacia nos anos de 1988, 2002 e 2013 ...	100
Tabela 10 - Valores do tempo de concentração da bacia endorreica do Tabuleiro nos anos de 1988, 2002 e 2013	103
Tabela 11 - Resultado dos hidrogramas para os cenários analisados para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.	104
Tabela 12 – Resultados obtidos das simulações dos modelos e parâmetros aplicados.	121

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estágios do desenvolvimento urbano e seus diversos impactos hidrológicos	21
Quadro 2 – Lista de imagens (fotografias áreas e imagens de satélite) utilizadas	39
Quadro 3 - Classes de uso e cobertura superficial do terreno.	41
Quadro 4 – Descrição dos grupos hidrológicos dos solos.....	48
Quadro 5 – Parâmetros morfológicos definidos para bacias endorreicas	65
Quadro 6 – Parâmetros morfológicos da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
CN	Curva Número
CODEAL	Companhia de Desenvolvimento do Estado de Alagoas
DH	Disponibilidade Hídrica Potencial
DILC	Distrito Industrial Luiz Cavalcante
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FISRWG	Federal Interagency Stream Corridor Restoration Working Group
HU	Hidrograma Unitário
HUS	Hidrograma Unitário Sintético
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade -Duração-Frequência
IDW	Inverse Distance Weighted
IGDEMA	Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente
IMA	Instituto do Meio Ambiente do Estado de Alagoas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LGA	Laboratório de Geoprocessamento Aplicado
MDT	Modelo Digital do Terreno
PDI	Processamento Digital de Imagem
PI	Plano de informação
PR	Potencial de Recarga
SCS	Soil Conservation Service
SEMPLA	Secretaria Municipal de Planejamento
SIG	Sistema Geográfico de Informação
TC	Tempo de Concentração
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
USDA	United States Department of Agriculture
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos da pesquisa	17
1.2 Justificativa da pesquisa	18
1.3 Estrutura do trabalho	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Urbanização e os impactos hidrológicos	20
2.2 Planejamento urbano e manejo das águas pluviais	24
2.3 Sistema geográfico de informação e modelos hidrológicos	27
2.4 Sensoriamento remoto aplicado na hidrologia urbana	31
3 METODOLOGIA E MATERIAIS UTILIZADOS	34
3.1 Estrutura metodológica da pesquisa	34
3.2 Levantamento dos dados e informações	34
3.2.1 Dados cartográficos	35
3.2.2 Dados tabulares	36
3.2.3 Dados de sensoriamento remoto	36
3.3 Geração e tratamento de dados e informações	37
3.3.1 Processamento digital das imagens	37
3.3.1.1 Registro das imagens	37
3.3.1.2 Correção atmosférica	38
3.3.1.3 Realce das imagens	38
3.3.2 Classificação das imagens	39
3.3.2.1 Imagens Utilizadas	39
3.3.2.2 Preparação dos dados	40
3.3.2.3 Definição das classes	40
3.3.2.4 Processo de classificação visual	41
3.3.2.5 Classificação orientada a objetos (segmentação)	42
3.3.2.6 Definição das áreas impermeáveis	42
3.3.2.7 Análise de acurácia das classificações	43
3.3.3 Geração dos mapas e planos de informação (PI)	43
3.3.3.1 Mapa pluviométrico	44
3.3.3.2 Mapa de declividade	45

3.3.3.3 Mapas potenciométricos	45
3.4 Geoprocessamento e aplicação dos modelos hidrológicos.....	46
3.4.1 Modelo do Soil Conservation Service (SCS-CN)	46
3.4.1.1 Definição dos parâmetros utilizados.....	49
3.4.1.2 Determinação dos valores <i>CN</i>	49
3.4.1.3 Obtenção dos valores do coeficiente de armazenamento (<i>S</i>)	50
3.4.1.4 Determinação da perda inicial da precipitação (<i>I_a</i>)	50
3.4.1.5 Obtenção dos valores do coeficiente de escoamento superficial (<i>Q</i>)	50
3.4.2 Processos hidrológicos	50
3.4.2.1 Tempo de concentração (<i>T_c</i>).....	51
3.4.2.2 Intensidade pluviométrica (<i>I</i>)	52
3.4.2.3 Vazões máximas (<i>Q_p</i>)	53
3.4.3 Modelo Potencial de Recarga do Solo.....	54
4 A BACIA ENDORREICA DO TABULEIRO DO MARTINS	58
4.1 Descrição e localização da bacia.....	59
4.2 Aspectos Físicos da Paisagem	60
4.2.1 Caracterização Climática.....	60
4.2.2 Caracterização geomorfológica	61
4.2.3 Caracterização geológica.....	62
4.2.4 Caracterização pedológica.....	63
4.3 Dados fisiográficos e hidrológicos da bacia.....	63
4.3.1 A bacia endorreica.....	63
4.3.2 Caracterização morfométrica.....	64
4.3.3 Hidrologia superficial	67
4.3.4 Características hidrogeológicas	68
4.3.5 Macrodrenagem do Tabuleiro do Martins	69
4.4 Expansão urbana e adensamento populacional na bacia	71
4.5 Uso e ocupação do solo	75
4.6 Áreas Impermeáveis	82
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
5.1 Análise hidrológica dos diferentes cenários de ocupação	88
5.1.1 Escoamento superficial da bacia.....	89
5.1.1.1 Curva Número (<i>CN</i>)	89

5.1.1.2 Coeficiente de infiltração (<i>S</i>).....	92
5.1.1.3 Perda inicial da precipitação.....	95
5.1.1.4 Coeficiente de escoamento superficial (<i>C</i>).....	96
5.1.2 Potencial de Recarga do Solo (<i>PR</i>)	99
5.1.3 Comportamento dos processos hidrológicos	103
5.1.3.1 Tempo de concentração (<i>T_c</i>)	103
5.1.3.2 Chuvas intensas e vazões de pico	103
5.2 Análise dos impactos hidrológicos	111
5.2.1 Impactos no escoamento superficial da bacia.....	111
5.2.2 Impactos na recarga dos aquíferos.....	113
5.2.3 Impactos nos cenários futuros	118
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
REFERÊNCIAS	126
APÊNDICES	134

1 INTRODUÇÃO

O rápido processo de urbanização pelo qual as cidades passaram e que se intensificaram nas últimas décadas do século XX fez com que ocorressem modificações rápidas e intensas no meio físico como, por exemplo, o aumento da taxa de impermeabilização do solo. Com o aumento da população nos centros urbanos, as cidades têm passado por um grande desafio que é conciliar o processo de urbanização e a utilização dos recursos naturais.

O crescimento populacional e as aglomerações em torno dos centros urbanos acarretam entre outras modificações a transformação na cobertura do solo que, por sua vez, causam marcas permanentes nas respostas hidrológicas das áreas urbanizadas, apresentando os efeitos mais notáveis no aumento do escoamento superficial e na diminuição da infiltração. Geralmente, o desenvolvimento das cidades tem se dado sem considerar as condições naturais do meio físico, resultando assim em alterações prejudiciais ao ambiente e ao próprio homem.

Estudos mostram que a modificação da cobertura do solo através de sua impermeabilização é capaz de alterar os componentes do ciclo hidrológico, provocando, por exemplo, a redução da infiltração no solo e o aumento no volume escoado superficialmente. Quando se discute os problemas relacionados às questões hidrológicas advindos dos processos de urbanização, as bacias hidrográficas se apresentam como unidades relevantes para tal discussão, o que as torna uma unidade geográfica ideal para o planejamento integrado dos recursos naturais frente às pressões da ocupação. Neste sentido, o estudo de bacias hidrográficas tem muito contribuído para o ordenamento e planejamento ambiental.

Uma das abordagens mais utilizadas na hidrologia para o entendimento destas mudanças e seus respectivos impactos, consiste na aplicação de modelos hidrológicos, que levam em consideração o percentual de áreas impermeabilizadas pelo processo de urbanização. Muitas técnicas foram aplicadas para caracterizar e quantificar superfícies impermeáveis, sejam através de medições por meio de mapas impressos ou mapeamento por meio de imagens de sensoriamento remoto. Mas foi a partir da década de 1970 para 1980, que a utilização da técnica de sensoriamento remoto ganhou popularidade nos estudos ambientais, sobretudo na hidrologia, com a interpretação de imagens de satélites, análises espectrais, e aplicações de modelação que consideram como parâmetro a quantificação de superfícies impermeáveis.

A necessidade da estimativa das áreas impermeáveis para os estudos que procuram relacionar a urbanização com os impactos no sistema hidrológico vem trazendo um uso cada vez mais intenso do geoprocessamento, principalmente na aplicação do sensoriamento remoto. O emprego do geoprocessamento e as técnicas de sensoriamento remoto têm a capacidade de

fornecer informação espacial e temporal da superfície terrestre, o que é necessário para aplicação de modelos hidrológicos.

Os avanços no uso de técnicas de análise geoespacial, com emprego do Sistema Geográfico de Informação - SGI e com a aplicação de modelos hidrológicos, aumentaram a capacidade de analisar o desenvolvimento urbano frente aos impactos no comportamento hidrológico, compreendendo e buscando respostas para diferentes aplicações que busquem explicar a variabilidade espacial e temporal dos processos hidrológicos, principalmente da capacidade de recarga, infiltração e escoamento superficial em bacias hidrográficas.

1.1 Objetivos da pesquisa

Assim como na maioria das capitais brasileiras, nas últimas quatro décadas, Maceió passou por um rápido processo de urbanização associado a problemas nos sistemas de infraestrutura e ocupação urbana. Maceió, segundo o censo de 2010 possui uma população total de 932.608 habitantes e uma população urbana de 931.984 habitantes, ou seja, 99,93%. A crescente expansão urbana que Maceió experimentou e vem experimentando nas últimas décadas não se fez acompanhar de um planejamento racional do uso e ocupação do solo.

Partindo da hipótese que a expansão e o crescimento das cidades, por meio da impermeabilização, interferem no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas inseridas no meio urbano, esse trabalho tem como objetivo geral caracterizar e analisar a evolução espacial e temporal da urbanização na bacia endorreica do Tabuleiro dos Martins (Maceió/AL) e seus impactos sobre o escoamento superficial e a recarga dos sistemas aquíferos locais.

Para alcançar este objetivo, foram determinados alguns objetivos específicos, tais como:

- Determinar as características fisiográficas da bacia;
- Caracterizar o uso e ocupação do solo da bacia em três cenários diferentes, definidos em função da disponibilidade de imagens de satélite e de fotografias aéreas: ano de 1988, 2002 e 2013;
- Identificar e caracterizar os elementos da bacia que interferem na diminuição da infiltração, armazenamento e escoamento superficial;
- Aplicar técnicas de geoprocessamento para incorporar a variabilidade espacial e temporal no estudo do escoamento superficial e dos volumes de recarga dos aquíferos da bacia em três cenários diferentes: ano de 1988, 2002 e 2013;

- Estimar a área impermeável e caracterizar a evolução temporal da urbanização da bacia e seus impactos sobre o escoamento superficial e a recarga dos aquíferos;
- Aplicação de modelos hidrológicos para determinação do escoamento superficial e da capacidade potencial de recarga de água.

1.2 Justificativa da pesquisa

É essencial compreender a forma urbana e seu crescimento como subsídios às políticas de planejamento. O rápido processo de urbanização que Maceió passou, tem sido a causa de diversos problemas ambientais urbanos ocasionados em função das alterações nesses ambientes e da deficiência de planejamento e infraestrutura adequados. Dentre outros, os impactos nos recursos hídricos são os mais comumente observados, em consequência da supressão da cobertura vegetal e de sua substituição por superfícies impermeáveis.

Considerada a principal área de expansão de Maceió, a região do Tabuleiro, em especial a bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, tem sido palco, nesses últimos anos, de uma expansão urbana, o que vem afetando significativamente a drenagem e a recarga dos aquíferos locais. Com relação à drenagem urbana, a região do tabuleiro apresenta sérios problemas, tanto devido às características do meio físico, como também pelo sistema de micro e macrodrenagem. Os problemas de alagamentos na região da bacia endorreica são decorrentes principalmente de fatores antrópicos, tais como ocupação urbana, realizadas em décadas passadas, com edificações e ruas construídas no fundo da bacia, afetando o ciclo natural por dificultar a infiltração das águas pluviais, comprometendo, dessa forma, o sistema de drenagem, provocando alagamentos em diversos pontos, acarretando prejuízos significativos à comunidade local.

Assim, justifica-se o desenvolvimento desse trabalho pela necessidade de auxiliar o planejamento urbano através de indicadores da impermeabilização do solo que melhor representem o processo de urbanização, descrevendo a relação entre esse processo com os impactos hidrológicos devido aos diversos tipos de uso e cobertura do solo, contribuindo assim para a definição de medidas não estruturais de controle da drenagem e recarga dos aquíferos locais.

Nesse contexto, o SGI integrado aos modelos hidrológicos por meio de seus parâmetros, se tornam poderosas ferramentas de apoio para produzir informações que possam subsidiar o

planejamento de uso e ocupação do solo de modo a minimizar os impactos hidrológicos futuros na área da bacia endorreica.

1.3 Estrutura do trabalho

Partindo deste capítulo introdutório, a dissertação estrutura-se através de mais cinco capítulos, cujo conteúdo e finalidade estão descritos a seguir.

No Capítulo 2 expõe-se a fundamentação teórica dessa pesquisa, apresentando uma breve discussão de tópicos relacionados a urbanização e aos impactos hidrológicos; a relação do planejamento urbano e o manejo das águas pluviais; sobre o Sistema Geográfico de Informação e sua integração com modelos hidrológicos; e o sensoriamento remoto aplicado na hidrologia urbana.

O Capítulo 3 discute a proposta metodológica desse trabalho, descrevendo os dados e informações utilizados e seus tratamentos para aplicação de modelos hidrológicos. Apresenta as técnicas de processamento de dados e confecção de cartas temáticas, como também a definição de parâmetros de entrada para a simulação dos modelos que procuram estimar o escoamento superficial e a capacidade potencial de recarga de água na bacia.

Já o Capítulo 4 aborda a descrição e caracterização da área de estudo, apresentando os seus aspectos físicos da paisagem, descrição dos dados hidrológicos e morfométricos. Apresenta informações quanto a expansão urbana e adensamento populacional e analisa o processo de uso e ocupação e as áreas impermeáveis da bacia.

Em seguida, no Capítulo 5, são apresentados os resultados e as análises das informações obtidas pela aplicação da metodologia para os cenários adotados, quanto ao processo de urbanização e sua implicação no comportamento hidrológico da bacia.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais a partir das etapas desenvolvidas deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica nessa pesquisa procura mostrar os impactos ambientais no ciclo hidrológico, em especial, causados pela urbanização. Apresenta também as técnicas e os métodos utilizados para identificação e compreensão dos parâmetros empregados nos modelos que procuram explicar o comportamento hidrológico na bacia por meio de aplicações digitais em sistemas geográficos de informação, e, por fim, as técnicas de sensoriamento remoto aplicado na hidrologia urbana.

2.1 Urbanização e os impactos hidrológicos

O século XX foi um período marcado pelo crescimento desordenado e acelerado das cidades brasileiras, principalmente dos grandes centros urbanos nas últimas quatro décadas, impulsionado, principalmente, pelo êxodo rural.

O aumento das atividades econômicas no meio urbano gerou aglomerações humanas, por sua vez, provocou tanto mudanças na intensidade de uso/ocupação do espaço, como na expansão física das cidades. Tal situação tem delineado e provocado desajustes estruturais que definem diretamente a qualidade de vida da sociedade, além de agravar os problemas ambientais causados pelo uso e ocupação de novas áreas.

A urbanização brasileira é um fenômeno recente. Santos (2005) registra que a aceleração da urbanização brasileira se dá a partir da década de 1940 a 1950, promovida pelo advento da industrialização e pelo esforço para integrar o território brasileiro num mercado nacional. Esses fatores provocaram o aumento do consumo e impulsionaram a expansão urbana nas décadas seguintes.

Santos (2008) salienta que na década de 1970, conforme censo realizado pelo IBGE, a população brasileira tornou-se mais urbana e, desde então, não houve regressão nas taxas de urbanização, chegando à expressiva taxa de 84% no ano 2010, como demonstram os resultados obtidos pelo IBGE através do censo do mesmo ano.

O desenvolvimento urbano, entrelaçado ao crescimento populacional, produziu grande competição aos recursos naturais, em particular à água. Dessa forma, Tucci (2008) afirma que o meio formado pelo ambiente natural e pela população (socioeconômico urbano) é um ser vivo e dinâmico que gera um conjunto de efeitos interligados. Tais efeitos podem ser facilmente identificados pelos problemas ambientais gerados, sobretudo, no que diz respeito à urbanização na hidrologia natural.

Um resumo desses problemas utilizando um modelo histórico de urbanização foi apresentado por Savini e Kammerer (1961) apud Araujo et al (2007) e é apresentado no quadro a seguir.

Quadro 1 – Estágios do desenvolvimento urbano e seus diversos impactos hidrológicos

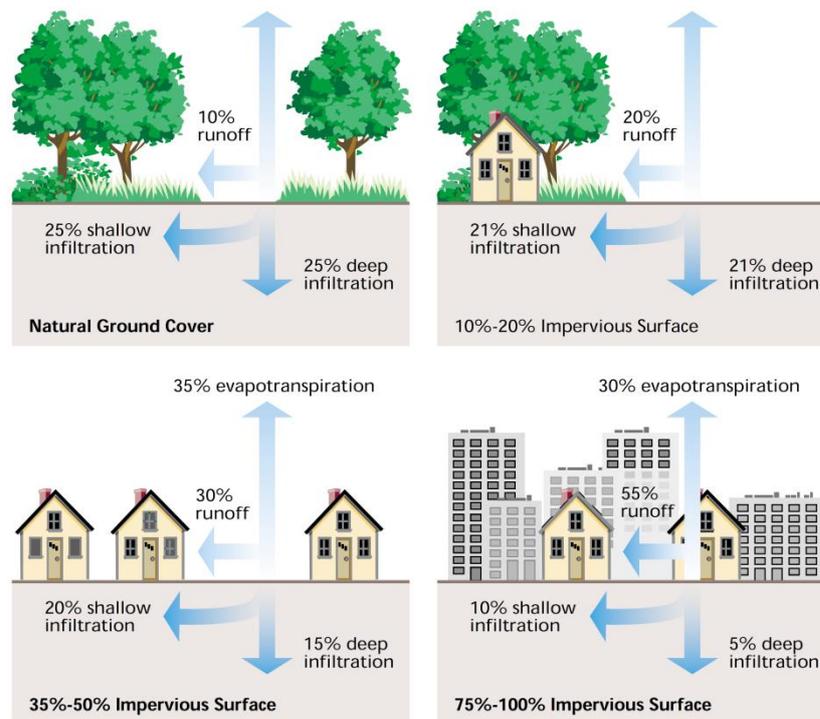
Estágio	Impactos
1. Transição do estágio pré-urbano para o urbano inicial	
(a) Remoção de árvores ou vegetação (b) Perfuração de poços (c) Construção de fossas sépticas etc.	Redução na transpiração e aumento no fluxo de chuvas Rebaixamento do lençol freático Aumento na umidade do solo e possível contaminação
2. Transição do urbano inicial para o urbano médio	
(a) Retirada total da vegetação (b) Construção maciça de casas etc. (c) Uso descontínuo e abandono de alguns poços rasos (d) Desvio de rios próximos para fornecimento ao público (e) Esgoto sanitário não tratado ou tratado inadequadamente em rios e poços	Erosão acelerada do solo Redução na infiltração Elevação do lençol freático Redução no <i>runoff</i> entre os pontos de desvio Poluição de rios e poços
3. Transição do urbano médio para completamente urbano	
(a) Urbanização da área completada pela adição de mais prédios (b) Quantidades maiores de resíduos não tratados em cursos d'água locais (c) Abandono dos poços rasos remanescentes (d) Aumento da população necessitando do abastecimento de novos sistemas de distribuição de água (e) Canais e rios restritos, pelo menos em parte, por canais e túneis artificiais (f) Construção de sistema de drenagem sanitária e estação de tratamento de esgoto (g) Melhoramento do sistema de drenagem pluvial (h) Perfuração de poços industriais mais profundos e com maior capacidade	Redução na infiltração e rebaixamento do lençol freático, picos mais altos de alagamento e fluxos d'água mais baixos Aumento da poluição Elevação do lençol freático Aumento no fluxo dos cursos d'água locais se o suprimento é proveniente de uma bacia externa Estágio mais alto para um dado fluxo d'água (portanto, um aumento dos danos por alagamento) Retirada de mais água do local Impactos positivos Pressão d'água mais baixa, subsidência, salinização da água

Fonte: Araujo et al (2007)

Quando a urbanização chega a um certo grau de desenvolvimento, mudanças no ambiente natural tornam-se inevitáveis. As mudanças impostas afetam o ciclo hidrológico além do limites da área urbana. Da mesma forma, Baptista et al. (2005) apresentam alguns impactos causados pela urbanização, como a alteração do balanço hídrico e do meio ambiente; a redução da interceptação; o armazenamento superficial; a infiltração; e um aumento dos volumes de escoamento superficial, visto que há um acréscimo de áreas impermeabilizadas e a água que antes infiltraria agora acaba escoando.

Para exemplificar de forma sucinta esses impactos, a figura 1 apresenta o efeito da urbanização sobre as variáveis do ciclo hidrológico.

Figura 1- Alterações no balanço hídrico em decorrência da urbanização



Fonte: FISRWG (2001)

À medida que a urbanização aumenta, haverá também o aumento do volume de água de chuva escoado e a possibilidade de inundação. A crescente pavimentação pode reduzir a infiltração das águas subterrâneas, que por sua vez pode diminuir a disponibilidade de aquíferos, rios e córregos.

Dentro desse contexto, Bollman (2003) expõe que aparentemente todos os aspectos do ambiente são alterados pela urbanização (relevo, uso da terra, vegetação, fauna, hidrologia e clima), onde a intensidade dessa mudança está ligada à densidade populacional da área e à

extensão da ocupação. Do ponto de vista da drenagem urbana, esses problemas podem ser causados de forma direta (impermeabilização do solo causando aumento do escoamento superficial, por exemplo) ou indireta (mudanças no microclima da região que resultam em variações no ciclo hidrológico local).

Nas áreas urbanas, os fatores antrópicos assumem grande importância, principalmente ao fato da ocupação intensa e desordenada e a inadequação do sistema de drenagem urbana. Dentre as modificações geradas pela ocupação do espaço urbano, destaca-se a impermeabilização (BOTELHO, 2011).

A impermeabilização gera um grande impacto sobre a hidrologia local, afetando o ambiente de muitas maneiras, que incluem alterações na hidrologia, morfologia, e na qualidade da água. Santos (2006) enfatiza que em alguns casos, o processo de urbanização progride até um ponto em que se atingem altas taxas de impermeabilização e de densidade demográfica, inclusive de áreas naturalmente sujeitas a enchentes.

No Brasil, a maioria das grandes cidades foi crescendo sem o devido planejamento e a execução da infraestrutura necessária. Diante disso, muitas vezes a urbanização não considerou o relevo que determina o sistema natural de drenagem e foram executados construções e aterros em locais inadequados como linhas preferenciais de escoamento e depressões (SNSA, 2008).

No decorrer do tempo, nas bacias urbanas o sistema natural de drenagem tornou-se insuficiente para escoar toda a água precipitada. Nesse sentido, novos elementos foram adicionados pelo homem, como edificações, pavimentação, canalização, entre outros, que acabam por reduzir drasticamente a infiltração e favorecem o escoamento das águas pluviais, o que gera o aumento da magnitude e da frequência das inundações nessas áreas. (BOTELHO, 2011).

O sistema, antes natural, passou a ser definido por ruas e redes de condutos que direcionam o escoamento das águas da chuva. Diante disso, intensas intervenções antrópicas no sistema hidrográfico em ambiente urbano se fez adotar de novos conceitos e medidas que garantissem o melhor funcionamento da drenagem urbana, de modo a combater e prevenir problemas ambientais, notadamente como as inundações.

Dentro desse contexto, Spin (1995) afirma que o modo como são construídos os padrões de assentamentos urbanos e suas relações com a rede de drenagem natural, no que diz respeito a projeto dos sistemas de drenagem, produzem um regime hídrico urbano característico. Conforme a urbanização acontece as mudanças na hidrologia natural de uma área são inevitáveis (GUERRA et al, 2005).

2.2 Planejamento urbano e manejo das águas pluviais

Durante muitos anos, tanto no Brasil como em outros países, a drenagem urbana das grandes metrópoles foi abordada de maneira acessória, dentro do contexto do parcelamento do solo para usos urbanos (CANHOLI, 2005). Na maior parte dessas metrópoles, o crescimento das áreas urbanizadas se processou de forma acelerada e, somente em algumas, a drenagem urbana foi considerada fator preponderante no planejamento da sua expansão (NUNES, 2011).

De acordo com Souza et al (2012), a evolução do manejo das águas urbanas passou por três fases:

- a) no início do século XX, com a política de saneamento básico que consistia na evacuação de efluentes urbanos o mais rápido possível para jusante na tentativa de minimizar a proliferação de doenças.
- b) no final da década de 1960, tornaram-se evidentes os impactos negativos dessa estratégia antes abordada, em particular no que dizia respeito a degradação dos corpos d'água receptores e aos danos sociais (econômicos e culturais) provenientes das inundações. A partir dessas observações, alguns países alteraram suas políticas de manejo de águas por meio de investimentos significativos no tratamento de esgoto e no controle de águas pluviais, aplicando, principalmente, estruturas de armazenamento.
- c) só foi a partir do final dos anos 1990, que a ciência passou a reconhecer o papel dos sistemas naturais de drenagem (solo e vegetação) no controle da qualidade e quantidade de águas pluviais, ao promover a infiltração, a evapotranspiração e o contato da água com bactérias e plantas.

Nesse sentido, a gestão, ou manejo, de águas pluviais nas áreas urbanas, segundo o novo paradigma instaurado internacionalmente, visou adequar os fenômenos de precipitação e escoamento ao novo meio físico criado pela ocupação urbana, incluindo entre seus objetivos a prevenção ou minimização de danos causados por inundações, bem como a manutenção de condições adequadas aos ecossistemas aquáticos e outros a eles associados (GONÇALVES, 2006).

Viola (2005) considera fundamental esse manejo no planejamento de uma cidade, pois além de estudar a drenagem, busca a redução das redes de drenagem através de diferentes técnicas e soluções, como também assegura a melhor qualidade das águas superficiais, pois ao se evitar inundações teremos uma menor quantidade de lixo carregado e esgoto misturado.

Abalizado nesses paradigmas é que as discussões técnicas e científicas começaram a abordar o problema de cheias urbanas sob nova ótica. Os problemas de drenagem urbana devem

ser solucionados levando em consideração sua origem, trabalhando de forma sistêmica, com atuações distribuídas sobre a paisagem urbana, para reduzir e retardar picos de cheia, permitindo também a recarga do lençol freático, buscando restaurar as condições aproximadas do escoamento natural (SANTOS, 2006).

Os sistemas tradicionais de drenagem pluvial foram planejados baseados no rápido escoamento da água precipitada transferindo o problema para jusante. Este fato, aliado ao rápido crescimento da população urbana no país, trouxe um cenário caótico para as grandes e médias cidades. Tucci (2005) destaca que o controle atual do escoamento na drenagem urbana tem sido realizado de forma equivocada com sensíveis prejuízos para a população. A origem dos impactos assenta-se sobre dois tipos de erros:

Princípio dos projetos de drenagem: A drenagem urbana tem sido desenvolvida com base no seguinte princípio errado: “A melhor drenagem é a que retira a água pluvial excedente o mais rápido possível do seu local de origem”.

Avaliação e controle por trechos: Na microdrenagem os projetos aumentam a vazão e transfere todo o seu volume para jusante. Na macrodrenagem são construídos canais para evitar a inundação em cada trecho crítico. Este tipo de solução segue a visão particular de um trecho da bacia, sem que as consequências sejam previstas para o restante da mesma ou dentro de diferentes horizontes de ocupação urbana. A canalização dos pontos críticos acaba apenas transferindo a inundação de um lugar para outro na bacia.

Segundo o autor, a combinação destes dois tipos de gestão tem os seguintes impactos na macrodrenagem das cidades que podem ocorrer na seguinte sequência:

Estágio 1: A bacia começa a ser urbanizada de forma distribuída, com maior densificação a jusante. Com a impermeabilização, ocorrem inundações nos locais de mudança de declividade. Nesse momento a bacia está parcialmente urbanizada (geralmente ocorre de montante para jusante);

Estágio 2: As primeiras canalizações são executadas a jusante, com base na urbanização atual. Com isso, o hidrograma à jusante do trecho canalizado aumenta;

Estágio 3: Com a urbanização se expandindo para montante juntamente com a canalização, o aumento das vazões máximas e dos volumes é significativo, retornando as inundações nos trechos anteriormente canalizados.

É sabido que os procedimentos de impermeabilização e canalização, acabam acelerando a velocidade das águas de escoamento e aumenta o risco de inundações que impedem a infiltração e comprometem o abastecimento dos lençóis de água subterrâneos e a recarga de

aquíferos (BOTELHO, 2011). Esses estágios dão maior dimensão aos impactos no ambiente urbanos, com aumento e aceleração do escoamento superficial e o impedimento da infiltração.

Morelli e Barbassa (2009) observam que esse tipo de urbanização dá maior magnitude aos impactos e altera o ambiente de forma inadequada e que o sistema de drenagem é então implantado após o desenvolvimento do espaço urbano, como uma forma de correção dos problemas advindos da ocupação desordenada e sem controle.

Martins (2004) apud Nunes (2011) ressalta que diversos estudos vêm sendo realizados hoje no Brasil com vistas a analisar a eficiência e aplicabilidade dessas estruturas, mas em sua maior parte, com o enfoque somente ainda no amortecimento das cheias. Segundo Nunes (2011) nos países desenvolvidos já se observa a preocupação não somente com o aspecto quantitativo, mas com o tratamento e qualidade das águas urbanas, no âmbito da poluição difusa e suas diversas aplicações práticas.

No entanto, nota-se em âmbito mundial uma tendência à adoção de práticas sustentáveis que busquem a urbanização integrada a um planejamento de gestão das águas, fundamentada em conceitos modernos. Os sistemas que mais se desenvolveram neste sentido foram: a abordagem americana de *Low Impact Development* (LID, denominado no Brasil por Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto), a abordagem australiana de *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) e a abordagem britânica de *Sustainable Drainage Systems* (SuDS). (SANTOS, 2006; SOUZA et al, 2012).

Esses conceitos, tentam criar ambientes construídos, com pequenas alterações hidrológicas que buscam preservar ou recuperar as condições de escoamento naturais, anteriores à urbanização. A ideia básica é reduzir os impactos da urbanização nos sistemas de drenagem, priorizando a infiltração e o armazenamento das águas da chuva, para evitar inundações na região. De modo geral, a adoção dessas alternativas favorece o armazenamento e a infiltração das águas pluviais, o que implica em estratégias de planejamento e de gestão do sistema urbano em maior consonância com os princípios de sustentabilidade de desenvolvimento urbano de baixo impacto.

Quando a cidade já está ocupada, não há muito mais o que se possa fazer, além de controlar os impactos já existentes, mas numa área em expansão é necessário integrar os indicadores de planejamento urbano com os de drenagem, para que o planejamento do espaço considere o efeito sobre a drenagem (TUCCI, 2008).

2.3 Sistema geográfico de informação e modelos hidrológicos

Um Sistema Geográfico de Informação (SGI) é um sistema geográfico baseado na entrada, gestão, análise e produção de dados geográficos e informações. São ferramentas importantes para a gestão de recursos naturais. Embora SGI tenha seu início desde a década de 1960, só nas últimas décadas suas aplicações se expandiram. Muitos sistemas de software agora têm sido desenvolvidos para cobrir uma vasta gama de domínios, tais como ciências ambientais, gestão de recursos hídricos, modelação de terrenos, na agricultura, uso do solo, distribuição da população, nos transportes, na educação e no planeamento.

Segundo Fitz (2008) o termo SIG e suas derivações vêm sendo motivo de discussão já há algum tempo. O autor expõe que diversos autores utilizam tradução do inglês Geographical Information Systems (GIS) ou Geographic Information Systems de forma diferenciada para o português, ora no singular, Sistemas de Informação Geográfica, ora no plural, Sistemas de Informações Geográficas. Moura (2014), explica que essas traduções podem levar a pensar que as informações são geográficas, o que não é, pois nem todas informações trabalhadas são geográficas, mas o sistema sim, pois os dados são espacializáveis. Com isso, a autora propõe adotar a denominação “Sistema Geográfico de Informação”.

A partir destas informações, para este referencial, será balizado o termo “Sistema Geográfico de Informação” e sua sigla SGI para tratar desse sistema. Porém, não deixando de partir da conceituação da sigla SIG, como inúmeros autores utilizam.

Não obstante, Fitz define o SIG como:

“... um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, o qual integra dados, equipamentos e pessoas com o objetivo de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados ao sistema de coordenadas conhecido” (FITZ, 2008, p. 23).

Matias (2001) defende que o SIG, uma das integrantes que compõem Geoprocessamento, ao lado da Cartografia Digital, do Sensoriamento Remoto e do Sistema de Posicionamento Global (GPS), tornou-se um dos principais instrumentos à serviço do trabalho geográfico. Outro emprego do SIG, mais especificamente vinculado ao geoprocessamento, diz respeito à realização de análise espacial por meio de mapas temáticos diversos, (FITZ, 2008).

O termo Geoprocessamento, como conceito, evolui com o crescimento da utilização de seus métodos e técnicas. É evidente que a classificação de ambientes, segundo suas múltiplas características, o planeamento e a gestão de ambientes são campos técnico-científicos beneficiados pelo uso do Geoprocessamento (XAVIER DA SILVA, 2001).

Outra definição para Geoprocessamento, conforme Xavier da Silva (2001), é um conjunto de conceitos, métodos e técnicas que, atuando sobre bases de dados georreferenciados, por computação eletrônica, propicia a geração de análises e sínteses que consideram, conjuntamente, as propriedades intrínsecas e geotopológicas dos eventos e entidades identificados, criando informação relevante para apoio à decisão quanto aos recursos ambientais.

Conforme Ferreira (2014), uma pesquisa que utiliza o método geográfico e tem a parte de seu desenvolvimento realizado em um sistema de informação geográfica, parte do pressuposto de que o espaço geográfico real foi transformado em um modelo de espaço geográfico digital. Nesse sentido, ao serem reconstruídas digitalmente em um SIG, as informações espaciais são transformadas por meio de dois modelos sequenciais: modelo gráfico de um modelo digital.

Nesse sentido, o SGI vem sendo amplamente usado na associação de informação da hidrologia de uma região, constituindo um conjunto interativo e organizacional de um modelo de informação espacial de apoio à tomada de decisões. Conforme Davis e Davis Jr (1997), o desenvolvimento de sistemas de bancos de dados geográficos em hidrologia tem se tornado cada vez mais viável, com o recente desenvolvimento e popularização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

O SGI está cada vez mais integrado com a modelagem hidrológica. Modelos Digitais do Terreno (MDT), bem como poderosas ferramentas têm aberto novas possibilidades para pesquisa hidrológica que conduzem a uma modelagem com mais dados orientados e compreensão dos processos físicos fundamentais que determinam o ciclo hidrológico.

Muitos modelos hidrológicos podem ser encontrados na literatura. Em geral, estes modelos descrevem a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, o movimento da água no solo causado pela infiltração, percolação, entrada e saída de água subterrânea, e o escoamento superficial, subsuperficial e nos canais de escoamento (RENNÓ e SOARES, 2003).

Segundo Machado (2002) a integração do SIG com os modelos hidrológicos e sua aplicação em bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de ações, como o projeto, calibração, simulação e comparação entre os modelos.

Na modelação dos processos hidrológicos, é preciso conhecer alguns parâmetros da bacia tais como: área, declividade, cobertura do solo, porcentagem de áreas impermeáveis, canais de drenagem e relevo da bacia. O conhecimento da impermeabilidade de uma bacia

hidrográfica é muito importante para a realização de estudos hidrológicos. Ragan e Jackson (1975) consideram a porcentagem impermeável como talvez o mais importante desses parâmetros hidrológicos.

Com relação à determinação de parâmetros para o modelo, existem alguns estimados com base nas características físicas e outros que devem ser ajustados com base em dados observados das variáveis de entrada e saída. Uma das ferramentas que oferece credibilidade a algumas estimativas é a utilização de processamento de imagens de satélites (PEPLAU, 2005).

Conforme Peplau (2005), o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto têm sido importantes ferramentas na aquisição de dados físicos, estimando com base nos *layers (camadas)* as classes de solo, cobertura (uso e ocupação do solo) e outras características físicas e alguns parâmetros da modelagem. Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) ajustam os pontos altimétricos da bacia, permitindo a determinação de áreas de drenagem, comprimento de talvegues e declividades.

Neste sentido, modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos para realizar estudos voltados à análise dos principais efeitos da urbanização nos recursos hídricos. Entre eles, destaca-se o procedimento *Soil Conservation Service (SCS)*, que permite, a partir do método *Curva Numero (CN)*, identificar características referentes ao potencial de escoamento superficial nas diferentes superfícies do terreno (NUNES, 2012).

O método curva número (CN) desenvolvido pela USDA (United States Department of Agriculture) é o método mais comum integrado com a modelagem hidrológica. A partir do enquadramento dos solos das bacias urbanas nos grupos hidrológicos do SCS, é usado para prever, com base no escoamento, a quantidade de área impermeável, o grupo de solo, tipo de cobertura do solo, situação hidrológica, e antecedente de escoamento (USDA NRCS, 1986). Outros exemplos de modelos hidrológicos que utilizam este método incluem o TR-55, HydroCAD, SWAT e SWMM. O escoamento pode também ser modelado usando o método racional, que utiliza a relação entre a descarga, intensidade da chuva e área de influência (BEVEN, 2001).

A modelagem hidrológica serve de subsídio para tomada de decisões envolvendo questões ambientais, principalmente no sistema aberto da bacia hidrográfica. Modelos são semelhantes à proposição de tabelas, gráficos e mapas que são utilizados como uma linguagem específica e padronizada com o objetivo de representar a realidade descrevendo e caracterizando entidades ou fenômenos, (SILVA, AMORIM e SANTOS FILHO, 2010).

Segundo Christofolletti (1999), outra implantação da modelagem junto com SGI no modelo hidrológico vem sendo desenvolvida e aplicada pelas Forças Armadas dos Estados Unidos. A abordagem procura desenvolver uma série de aplicações que abrangem o campo todo da hidráulica ambiental. As aplicações consistem de três componentes que focalizam diferentes aspectos hidrológicos, incluindo o Sistema de Modelagem de Bacia de Drenagem (Watershed Modelling System, WMS), o Sistema de Modelagem das Águas Superficiais (Surface Water Modeling System, SWMS) e o Sistema de Modelagem das Águas Subterrâneas (Groundwater Modelling System, GWMS).

Todavia, modelos que permitem a inclusão de vários processos hidrológicos em estudos permitem verificar as relações entre mudanças antrópicas e as mudanças nas condições hidrológicas. Modelos que trabalham com escoamento fornecem ferramentas potencialmente poderosas para informar decisões de gestão sobre como ocorrem as mudanças em bacias, principalmente nas urbanas.

Muitos diferentes modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos por diferentes organizações, e a escolha de um modelo não é simples. A generalização dos dados para áreas heterogêneas, devido à resolução escalar insuficiente, incoerência de dados e a confiabilidade das fontes, e à falta de dados de qualidade em resoluções adequadas para aplicações específicas, restringem e limitam as aplicações no SIG (ONDIEKI e MURIMI, 2009).

Nesse sentido, Christofolletti (1999), explica que em muitos projetos os pesquisadores e planejadores encontram dificuldades para o desenvolvimento das pesquisas, do planejamento e das tomadas de decisão técnicas em virtude da carência ou mesmo inexistência de registro de dados. No entanto, a deficiência de dados de campos experimentais, prática, são obstáculos à formulação de modelos plenamente distribuídos, ocorrendo apresentação de modelos que englobam características genéricas sobre componentes com informações sobre a variabilidade espacial de outros aspectos (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Pode-se argumentar, dessa forma, que os modelos, nesse caso os hidrológicos, são construídos num contexto intelectual mais amplo para análise espacial, não apenas desenvolvimento nas máquinas, software, mas também na mente do pesquisador (FERREIRA, 2014).

2.4 Sensoriamento remoto aplicado na hidrologia urbana

A utilização de dados remotamente detectados no mapeamento dos recursos naturais e como fonte de dados de entrada para modelagem hidrológica tem sido muito popular nos últimos anos. Com a disponibilidade de dados de sensoriamento remoto de diferentes sensores e de várias plataformas com uma ampla gama radiométrica e resoluções espectrais, fez do sensoriamento remoto, talvez, a melhor fonte de dados para aplicações de estudos ambientais.

Nesta revisão, resumimos algumas aplicações mais utilizadas por meio do sensoriamento remoto na modelagem hidrológica, em particular na hidrologia urbana. A intensa utilização dos dados no mapeamento de usos do solo, na estimativa de fluxos de água, cobertura vegetal e áreas de superfícies impermeáveis são algumas das aplicações derivadas de dados de sensoriamento remoto.

Novo (1998) define que o “sensoriamento remoto é a técnica de coleta de informação a distância, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes da terra em suas mais diversas manifestações, utilizando de sensores, equipamento para processamento e transmissão de dados, aeronaves, etc.”

No início, o sensoriamento remoto esteve vinculado ao surgimento da fotografia aérea. A este fato, sua história pode ser dividida em dois períodos: um de 1860 a 1960, baseado no uso de fotografias aéreas e, outro, de 1960 aos dias de hoje, caracterizado por uma variedade de tipos de fotografias e imagens de satélite, (FLORENZANO, 2002).

É importante o papel do sensoriamento remoto em compreender processos hidrológicos nas diferentes escalas espaciais e temporais, ao fato da gama de diversas imagens de diferentes satélites, e conseqüentemente, com diferentes resoluções espaciais disponíveis. Com a disponibilidade de grandes volumes de dados, sistema geográfico de informação (SGI), ferramentas para manipular, processar, armazenar e recuperar esses dados e sistema de computação eficiente, a aplicação do sensoriamento remoto para recursos hídricos tem aumentado nos últimos anos, principalmente no mapeamento de bacias hidrográficas e na estimativa e geração de parâmetros e variáveis hidrológicas.

Segundo Góes et al (2003), a utilização de imagens de satélite tem trazido benefícios significativos para o estudo dos recursos hídricos, no qual o uso de imagens multiespectrais e hiperespectrais registradas por satélites, tem-se mostrado como uma valiosa técnica para a extração dos dados destinados às várias aplicações de pesquisa de recursos naturais.

Muitos estudos feitos por autores como Carlson (2004), Bauer et al., (2004), Sawaya et al. (2003), Stuckens et al. (2000), mostram que a maior parte das informações derivadas de satélites pode ser empregada para estimar elementos como escoamento superficial, área de superfície impermeável, mudanças no uso e ocupação do solo, entre outros fatores causados pela urbanização. Esses estudos preocupam-se basicamente com a evolução da urbanização e suas implicações hidrológicas na qualidade ambiental das cidades.

Ragan e Jackson (1975) consideraram as áreas impermeabilizadas como sendo o mais importante parâmetro hidrológico em ambientes urbanos. Nesse sentido, muitos dos trabalhos de estimativa de áreas impermeáveis a partir de dados espectrais de sensores orbitais são baseados na classificação do uso e cobertura do solo utilizando técnicas de classificação supervisionada e técnicas de análise de agrupamento estatístico (WILLIAMS e NORTON, 2000).

Devido ao seu custo relativamente baixo e aptidão para mapeamento de grande área, as imagens de satélite são amplamente aplicadas para estimar superfícies impermeáveis (BAUER et al., 2004). A utilização de imagens multiespectrais e o desenvolvimento de classificadores sofisticados, como por exemplo, redes neurais, métodos fuzzy, melhoria na classificação de sub-pixels e segmentação, proporcionam ao usuário de dados provenientes de satélites uma melhor acurácia na classificação temática de imagens (STUCKENS et al., 2000).

A utilização de processos automáticos de classificação de imagens de satélite tornou-se uma opção interessante para obter um mapa da cobertura do solo e, a partir dele, estimar a extensão de áreas permeáveis. Num trabalho pioneiro, Ragan e Thomas (1980) propuseram uma metodologia para estimar a permeabilidade do solo numa bacia a partir de imagens de satélite de média resolução, adaptando para isto os coeficientes do método do Soil Conservation Service (SCS).

Diferente de outros tipos de coberturas ou alvos, as áreas urbanas não podem ser caracterizadas por um comportamento espectral padrão. A vegetação, os corpos aquáticos e os solos, são superfícies relativamente homogêneas em termos de cobertura, enquanto nas áreas urbanas, o que prevalece é a heterogeneidade das coberturas (SOUZA, 2010).

Muitas técnicas foram aplicadas para caracterizar e quantificar superfícies impermeáveis, seja através de medições por meio de mapas impressos ou mapeamento por meio de imagens de sensoriamento remoto (especialmente fotografias aéreas). Mas foi a partir da década de 1970 para 1980, que as imagens de satélite começaram a ganhar popularidade nos

estudos de recursos naturais e estudos ambientais, e nas aplicações de interpretação, aplicações espectrais, e aplicações de modelação de superfícies impermeáveis (SLONECKER et al., 2001).

A necessidade da estimativa das áreas impermeáveis para os estudos que procuram relacionar a urbanização com os impactos no sistema hidrológico vem trazendo um uso cada vez mais intenso do geoprocessamento, principalmente na aplicação do sensoriamento remoto (RIBEIRO, 2006). Segundo Chormanski et al (2008) as técnicas de sensoriamento remoto têm a capacidade de fornecer informação espacial e temporal da superfície terrestre, o que é necessário para aplicação de modelos hidrológicos.

Conforme Bedient et al. (2003), com o advento do SGI, imagens de satélite de sensoriamento remoto de alta resolução e modelo digital do terreno (MDT), a aplicação da modelagem hidrológica tem melhorado muito nos últimos anos. Não obstante, Martins (2012), acrescenta que a associação de novas ferramentas e instrumentos técnicos ao uso de modelos hidrológicos é cada vez mais frequente, e nesse contexto, o sensoriamento remoto surgiu como poderosa ferramenta de apoio a estudos hidrológicos e à obtenção de dados sobre as bacias hidrográficas.

Muitas áreas urbanas estão crescendo a um ritmo recorde, afetando todo os componentes do ciclo hidrológico. As áreas urbanas são fisicamente formadas por uma grande diversidade de materiais (superfícies de concreto, asfalto, telhados de vários materiais, solo, vegetação arbórea, grama, água, entre outros), com formas, alturas e arranjos, também variados (SOUZA, 2012). Nesse sentido, o sensoriamento remoto por meio de satélite tem o potencial de fornecer cobertura extensiva das diversas variáveis, tais como precipitação e umidade do solo, bem como os parâmetros de cobertura de vegetação, mudanças na vegetação e impermeabilidade que são dados importantes para a modelagem hidrológica (DE FRIES e ESHELMAN, 2004).

Assim, o sensoriamento remoto exerce um papel fundamental no entendimento e na aplicação de tecnologia de informação, pois busca, uma melhor forma de, compreender e avaliar os impactos da urbanização nos recursos hídricos do ambiente urbano.

3 METODOLOGIA E MATERIAIS UTILIZADOS

A metodologia adotada no trabalho constituiu-se na aplicação de modelos hidrológicos baseados na utilização de técnicas de processamento de dados e confecção de cartas temáticas em ambiente SGI, visando espacializar e analisar cartograficamente o comportamento hidrológico, quanto à capacidade de recarga e ao escoamento superficial na bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, em Maceió/AL.

3.1 Estrutura metodológica da pesquisa

A metodologia utilizada na pesquisa envolveu as seguintes etapas:

**Delimitação do universo da pesquisa*, o universo da pesquisa abrange a bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, área escolhida tomando por base um conhecimento prévio dos problemas hidrológicos relacionados à drenagem da área;

**Revisão bibliográfica*, esta etapa incluiu a abordagem do tema envolvendo as implicações da urbanização na drenagem urbana e aplicação de SGI e modelos hidrológicos, constituindo-se na fundamentação teórica do trabalho, apresentada no Capítulo 2;

**Levantamento das informações existentes*, etapa correspondente ao levantamento detalhado das informações disponíveis sobre a área em estudo a serem utilizadas segundo a metodologia definida;

**Delimitação e caracterização da área*, etapa em que a área de estudo foi caracterizada em elementos definidos a partir do modelo utilizado, efetivada com base nas características hidrológicas, morfológicas, topográficas e de impermeabilização e uso e ocupação da bacia, subsidiadas por observações in loco;

**Geoprocessamento e aplicação dos modelos hidrológicos*, etapa que correspondeu à determinação, através de técnicas de geoprocessamento, dos parâmetros necessários à aplicação dos modelos Curva Número do SCS e do modelo Potencial de Recarga do Solo;

**Análise dos resultados*, finalizando o trabalho, foi efetuada a verificação e validação dos resultados obtidos.

3.2 Levantamento dos dados e informações

Esta etapa correspondeu à obtenção de dados e informações complementares e auxiliares para o apoio e compreensão do processo de urbanização da área em estudo, e consequentemente, as análises hidrológicas por meios dos modelos propostos.

Para tanto, a pesquisa consistiu na consulta e revisão bibliográficas (artigos, periódicos, trabalhos anteriores, dados estatísticos, aspectos de localização, do ambiente físico-natural e antrópico da área de estudo), de fontes primárias e secundárias; levantamento cartográficos (cartas topográficas, geológicas, mapas temáticos, mapas digitais geoprocessados e bases cartográficas digitais), que serviram para esclarecer espacialmente o processo e os efeitos da urbanização; levantamento de dados tabulares (dados populacionais e hidrológicos), onde serão sistematizados em informações e parâmetros para os modelos hidrológicos; levantamento de sensoriamento remoto (imagens de satélites e fotografias aéreas), como forma de complementar os dados obtidos pelas bases cartográficas; e, por fim, as visitas de campo, para aferição e obtenção de dados não fornecidos pela fontes e informações anteriores.

3.2.1 Dados cartográficos

Em relação aos instrumentos de pesquisa utilizados no levantamento de dados, quanto aos dados cartográficas, foram utilizados para a obtenção das informações as seguintes bases:

- Cartas topográficas de Maceió e área do entorno da lagoa Mundaú na escala 1:10.000 (1977), meio digital - Companhia de Desenvolvimento do Estado de Alagoas - CODEAL, executado pela TerraFoto - atividades Aerolevantamentos (acervo: LGA-IGDEMA);
- Base cartográfica planialtimétrica digital da área urbana e de expansão urbana de Maceió na escala 1:2.000 (1998), formato DWG - Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento de Maceió (SEMPLA), elaboradas pelo consórcio ESTEIO S. A.;
- Carta geológica da Bacia Sedimentar Sergipe – Alagoas, Folha Maceió SC.25-V-C-IV-2, na escala 1:50.000 (1975), meio digital - Governo da República Federativa do Brasil, Ministério das Minas e Energia, Petróleo Brasileiro S. A., Departamento Nacional de Produção Mineral;
- Planta dos setores censitário de 1991 dos municípios de Maceió e Rio Largo na escala de 1:50.000 - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, recenseamento geral do Brasil, tido como referência a planta cadastral da área urbana de Maceió na escala 1:5.000 (1984) - Prefeitura Municipal de Maceió.
- Mapa digital temático de solos (mapa pedológico) de Maceió na escala de 1:25.000 (2000) - Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos - Escritório Regional de Pesquisa e Desenvolvimento Nordeste.
- Base cartográfica digital da malha dos Setores Censitários de 2000 na escala de 1:100.000 (2000), formato shapefile – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Centro de Documentação e Disseminação de Informações;

- Base cartográfica digital da malha dos Setores Censitários de 2010 na escala de 1:100.000 (2010), formato shapefile – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Centro de Documentação e Disseminação de Informações;

3.2.2 Dados tabulares

Para averiguar o processo de ocupação bacia e os dados dos parâmetros hidrológicos, quanto a pluviosidade, foram considerados as seguintes informações listadas abaixo:

- Dados correspondentes aos resultados dos universos das contagens populacionais (censo) dos anos de 1991, 2000 e 2010, formato de planilha - arquivo Básico. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Centro de Documentação e Disseminação de Informações;
- Dados de Séries históricas de pluviometria dos postos: 935004 (Estação Maceió – Tabuleiro, 1961-2016), 935014 (Estação Pilar, 1963-1991), 935021 (Estação Rio Largo, 1963-2000), e 935024 (Estação Saúde, 1963-1994). Esses dados foram obtidos no banco de dados da Agência Nacional das Águas – ANA, Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas.

3.2.3 Dados de sensoriamento remoto

Um dos objetivos dessa pesquisa é analisar a evolução temporal da urbanização na bacia endorreica e o conhecimento do uso e cobertura do solo, por meio de classificação, para servir de base para os modelos hidrológicos. Para isso, foram utilizadas imagens aerofotográficas e imagens de satélite de alta resolução, totalizando quatro resoluções espaciais diferentes. As imagens selecionadas foram:

- Fotografias aéreas verticais pancromáticas da Bacia Sedimentar Sergipe Alagoas na escala aproximada 1:60.000 (1965) – Petrobrás S. A., cobertura aerofotogramétrica executada pela Cruzeiro do Sul S. A. Engenharia de Aerolevantamentos (acervo: LGA-IGDEMA-UFAL);
- Fotografias aéreas verticais pancromáticas na escala aproximada 1:17.500 (1988) - Instituto de Terras do Estado de Alagoas (ITERAL), cobertura aerofotogramétrica levantada pela Aerodata S. A. Engenharia de Aerolevantamentos (acervo: IMA);
- Imagens orbitais digitais do satélite Quickbird – imagem fusionada, resolução espacial de 0,62 metros, projeção UTM Sad-69 fuso 25L, ano de 2002 (15/09/2002), formato Geotiff. Prefeitura municipal de Maceió.

- Imagens orbitais digitais do satélite Quickbird – imagem fusionada, resolução espacial de 0,62 metros, projeção UTM SIRGAS-2000 fuso 25L, ano de 2013 (16/09/2013), formato Geotiff. Governo estadual de Alagoas.

3.3 Geração e tratamento de dados e informações

3.3.1 Processamento digital das imagens

O Processamento Digital de Imagens (PDI) entende-se como a manipulação de uma imagem por meio digital (computador), no qual fornece ferramentas para facilitar a identificação e a extração das informações contidas nas imagens para posterior interpretação. De modo que o resultado desse processo é a produção de outras imagens, estas já contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens de entrada. Câmara et al. (1996) ressaltam ainda que o objetivo de se usar o processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano.

Assim, são utilizados softwares específicos para atividades interativas de análise e manipulação das imagens. Nesse sentido, esta pesquisa, utilizou para o processamento digital das imagens o software SPRING 5.2 (Câmara et al., 1996), que é um SGI integrado com PDI, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Para tanto, no decorrer de todo o processo e manipulação das imagens, tomou como referência o sistema de projeção UTM e como superfície de referência o Datum SIRGAS2000 fuso 25L.

Para o mapeamento temporal da área urbanizada nas datas propostas (1988, 2002 e 2013) e dos dados apresentados no item 3.2.3, tornou-se necessário pré-processar as imagens em algumas etapas, no sentido de melhorar a qualidade de visualização dos alvos e precisão das imagens. Desta forma as etapas são descritas a seguir:

3.3.1.1 Registro das imagens

O georreferenciamento de uma imagem compreende uma transformação geométrica que relaciona coordenadas de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência, em última instância, o sistema de coordenadas de uma certa projeção cartográfica (PDASR, 2014). Ou seja, georreferenciar uma imagem é tornar suas coordenadas conhecidas num dado sistema de referência.

Nesse sentido, se fez necessário georreferenciar e corrigir ortogonalmente as imagens não registradas, as fotografias aéreas do ano de 1965 e 1988, tomando como referência a imagem de satélite georreferenciada e ortorretificada do ano de 2013 e do Modelo Numérico do Terreno - MNT¹, por meio de pontos de controles com a inserção das informações de altitude do relevo, a fim de acabar com as distorções introduzidas pela altitude do sensor durante a formação da imagem sem os deslocamentos devido ao terreno. A imagem de satélite do ano de 2002, apenas alterou o seu sistema de referência, o Datum Sad-69 fuso 25L para o Datum SIRGAS2000 fuso 25L.

No entanto, para correção geométrica e ortorretificação das imagens, foi utilizado, respectivamente, as ferramentas Registro (*Arquivo > Registro*) e Ortorretificação de Imagens² (*Arquivo > Ortorretificação de Imagens*), disponível no SPRING 5.2.

3.3.1.2 Correção atmosférica

Esse procedimento foi aplicado para mitigar os efeitos atmosféricos sobre as imagens de satélite, proporcionando uma melhoria na qualidade nas imagens, possibilitando que os alvos invariáveis, temporalmente, sejam interpretados da mesma forma.

Nessa etapa, para correção atmosférica, foram realizadas nas imagens de satélite dos anos de 2002 e 2013, a fim de eliminar as condições atmosféricas no momento da aquisição da imagem. Para tanto, foram realizados por meio de programas escritos na linguagem de programação LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico) do SPRING, o método de correção atmosférica pelo pixel escuro proposto por Chavez (1988), no qual os valores subtraídos de cada banda foram obtidos observando-se os respectivos histogramas.

3.3.1.3 Realce das imagens

As técnicas de realce têm o objetivo de melhorar a qualidade visual das imagens e facilitar sua interpretação visual. Para este projeto, foi utilizada a composição RGB, este apenas

¹ O MDT foi gerado a partir das informações altimétricas dos pontos cotados da Base cartográfica planialtimétrica digital de Maceió (SEMPLA, 1998) e das Cartas topográficas de Maceió (CODEAL, 1977) por meio da ferramenta no SPRING 5.2 (*MNT > Geração de Grade Retangular*).

² A ferramenta de ortorretificação disponível no SPRING 5.2 é baseada no Modelo de Funções Racionais e utiliza informações contidas em arquivos RPC (Rational Polynomial Coefficients) e em um Modelo Numérico de Terreno, para remover erros sistemáticos causados pela plataforma, terreno e sensor.

para as imagens orbitais digitais, e a ampliação de contraste linear para as fotografias aéreas. Assim, melhorando a qualidade das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano.

Dessa forma, as imagens passaram por uma manipulação do contraste, por meio da ferramenta *Contraste (Imagem > Contraste)* do SPRING, que consistiu numa transferência radiométrica em cada "pixel", com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem.

3.3.2 Classificação das imagens

3.3.2.1 Imagens Utilizadas

Para classificação, caracterização do uso e cobertura e identificação das áreas impermeáveis, e posteriormente o mapeamento temático dos resultados, foram utilizadas para esta etapa algumas imagens de sensoriamento remoto apresentadas na item 3.2.3. As imagens escolhidas correspondem aos cenários propostos para esta pesquisa, os anos de 1988 (fotografias aérea), 2002 (imagens de satélite) e 2013 (imagens de satélite). No total foram utilizadas 16 imagens, entre fotografias aéreas e imagens de satélite, que após o processamento digital apresentando no item 3.3.1, foram sobrepostas a fim de formar um mosaico, correspondente a cada ano analisado, por meio da ferramenta mosaico (*Imagem > Mosaico*) disponível no software SPRING 5.2. O quadro 2 mostra a sequência das imagens utilizadas no trabalho. A fim de expor as imagens utilizadas, a figura 2 apresenta parte da área total, mosaico, das imagens de cada ano.

Quadro 2 – Lista de imagens (fotografias áreas e imagens de satélite) utilizadas.

Ano (tipo de imagem)	Faixa	Número
1988 (Fotografias Aéreas)	83	4866, 4868, 4870, 4874
	84	4944, 4846
	85	0026, 0028
2002 (imagem de satélite)	--	11, 12, 16, 17
2013 (Imagem de satélite)	--	01, 02, 03, 04

Figura 2 – Parte das imagens do ano de 1988 (a), 2002 (b) e 2013 (c) utilizadas no estudo.



3.3.2.2 Preparação dos dados

Após a construção de cada mosaico das imagens para cada cenário proposto, conforme descrito no item anterior, foi necessário definir a área conforme a unidade de mapeamento, neste caso, o limite da bacia endorreica. Para tanto, foi preciso recortar cada cenário por meio da ferramenta Recorte de Plano de Informação (*Ferramenta > Recortar plano de Informação*) utilizando como máscara de corte a delimitação da área de estudo no formato *shapefile*. Em seguida, com os mosaicos recortados, deu-se início ao processo de classificação e caracterização das feições do uso e cobertura do solo, descritas nas seções a seguir.

3.3.2.3 Definição das classes

Após a escolha das imagens a serem utilizadas quanto ao trabalho de interpretação e categorização, foi definido o critério para definição das classes que se baseou principalmente nas características comportamentais das formas de uso do solo em relação ao ciclo hidrológico. Para tanto, foi determinada para classes temáticas de uso e cobertura, as propostas de cobertura superficial de Nunes (2007) que se baseou nas propostas de classes adotadas por Wilken (1978) e Tucci et al. (1995), quanto ao Método SCS, a respeito das condições hidrológicas do uso e ocupação do solo para bacias hidrográficas; e as descrições do uso e cobertura proposta por Tucci (2007).

Contudo, foram definidas 11 classes de uso e cobertura divididas em 4 temáticas, que serviram de forma sintética para melhor entender e compreender o processo de ocupação da bacia. Desta forma, as classes definidas para cobertura superficial, com seus diferentes padrões de ocupação, serviram para determinar as áreas permeáveis e impermeáveis da bacia. Identificado através do adensamento das edificações, observando sempre o percentual da impermeabilização e dos espaços livres existentes entre as construções.

As classes de uso e cobertura superficial do terreno e a porcentagem de impermeabilização associada a cada classe são apresentadas no quadro 3.

Quadro 3 - Classes de uso e cobertura superficial do terreno.

Classes	Descrição	Temática
Zonas florestais e vegetação densa ¹	Área com vegetação de porte arbóreo natural ou reflorestadas em boas condições.	Área verde
Campo e áreas verdes ¹	Parques, praças, campos de esportes, áreas cultivadas, áreas com gramados e terrenos desnudos.	
Edificações muito densas ¹	Zonas residenciais uma cidade, com cerca de 85% de taxa de impermeabilização dos solos.	Área edificada
Edificações não muito densas ¹	Zonas residenciais, com cerca de 65% de taxa de impermeabilização dos solos.	
Edificações com superfícies livres ¹	Zonas residenciais, com cerca de 38% de taxa de impermeabilização dos solos.	
Edificações com muitas superfícies livres ¹	Zonas residenciais com construções esparsas, com cerca de 30% de taxa de impermeabilização dos solos.	
Zonas industriais e comerciais ¹	Áreas industriais e barracões de comércios, com cerca de 72% de taxa de impermeabilização dos solos.	
Corpos d'água ¹	Lagos artificiais ou naturais.	Água
Ruas e vias asfaltadas ²	–	Ruas e vias
Ruas e vias em paralelepípedos ²	–	
Rua e vias de Terra ²	–	

Fonte: Adaptado de ¹ Nunes (2007) e ² Tucci (2007).

3.3.2.4 Processo de classificação visual

Determinadas as classes temáticas de uso e cobertura superficial do terreno (Item anterior), partiu-se para identificação e mapeamento de cada classe. Esta etapa ocorreu a partir da interpretação visual das imagens de satélites (2002, 2013) e fotografias aéreas (1988). A delimitação dos polígonos foi realizada em tela, onde foram digitalizados sobre as imagens os polígonos que contornam cada classe, utilizando para esta fase o software QGIS³ versão 2.12 (Pisa).

³ O QGIS é um sistema geográfico de informação (SGI), aplicativo que fornece dados de visualização, edição e recursos de análise. Software de código aberto disponível segundo os termos da Licença Geral Pública GNU.

3.3.2.5 Classificação orientada a objetos (segmentação)

Para estimar a área impermeável e caracterizar a evolução temporal da urbanização quanto aos cenários propostos, foi utilizado para esta etapa o processo de classificação orientada a objetos, ou segmentação. Segundo Benz et al (2004), segmentação é o método automático que consiste em subdividir a imagem em regiões homogêneas significativas baseadas não somente em propriedades espectrais, mas também na forma, textura, tamanho e outras características topológicas.

Para aplicação da técnica de segmentação foi utilizado o SPRING versão 5.2 e sua ferramenta de Segmentação (*Imagem > Segmentação*).

Na etapa de segmentação foi definido um limiar de área, que é o tamanho mínimo que cada segmento deve possuir na operação de segmentação. Foi considerado também um limiar de similaridade, que corresponde ao valor da distância euclidiana mínima entre as médias das regiões, abaixo da qual duas regiões são consideradas similares e, então, agrupadas. Na literatura consultada, não foi encontrado um padrão único para escolha dos limiares de segmentação, porém, em cada trabalho, os padrões são definidos através de testes de similaridades obtidos por ajustes no próprio software. Nesse trabalho, foi verificado que os limiares se ajustam aos diferentes tipos de imagens e finalidades, definindo-se através do procedimento de segmentação do programa SPRING, como melhor par de limiares 35/1200 (similaridade/área) para a imagem aérea (1988) e o par 20/2000 (similaridade/área) para as imagens de satélites (2002 e 2013).

3.3.2.6 Definição das áreas impermeáveis

Após a etapa de segmentação e classificação das imagens, foram realizados os trabalhos de interpretação e categorização das classes de uso e ocupação do solo, direcionando-as para identificação das áreas impermeabilizadas. Estas classes foram separadas em dois grupos que buscassem estabelecer regiões que se correspondessem:

- Áreas permeáveis: caracterizadas por áreas de vegetação, tais como: jardins, gramados, árvores e plantações e solo exposto.
- Áreas impermeáveis: telhados, pátios pavimentados, vias com pavimentação asfáltica e calçamento.

Ao final dos trabalhos de interpretação e classificação foi possível obter os mapas e estimar as áreas impermeáveis dos anos de 1988, 2002 e 2013, permitindo, dessa forma, caracterizar e correlacionar a impermeabilização com a evolução da urbanização nas datas definidas.

3.3.2.7 Análise de acurácia das classificações

Os resultados obtidos por meio da classificação orientada ao objeto (item 3.3.2.6) quanto a estimativa das áreas impermeáveis passou por uma validação, onde foram selecionadas amostras aleatórias com o tamanho equivalente a valor de pixel de cada imagem (1988, 2002 e 2013) avaliada, a fim de minimizar os erros devido às distorções geométricas entre as imagens fração e as imagens de alta resolução espacial e à influência dos alvos vizinhos na resposta espectral de determinado pixel (POWELL et al, 2007).

A acurácia de cada cenário e das classes definidas foi avaliada utilizando-se todo o conjunto de amostras, separadamente para cada data, através da matriz de confusão por meio do cálculo do índice Kappa (κ). Segundo Cohen (1960), κ varia de 0 a 1, significando total concordância entre os dados quando se obtém o valor máximo. O índice Kappa é dado pela seguinte equação:

$$\kappa = \frac{(P_o - P_e)}{(1 - P_e)} \quad (1)$$

Onde, P_o representa a proporção global de concordância observada e P_e , a proporção global de concordâncias esperadas pelo acaso.

O desempenho do índice Kappa foi avaliado de acordo com a tabela de desempenho proposta por Fonseca (2000), em que índices entre 0,21 e 0,4 são considerados razoáveis; entre 0,41 e 0,6, bons; entre 0,61 e 0,8, muito bons; e entre 0,81 e 1, excelentes.

3.3.3 Geração dos mapas e planos de informação (PI)

Para geração dos mapas foi tomado como unidade de mapeamento a delimitação da bacia endorreica do Tabuleiros do Martins, e adotado como escala numérica final o valor de 1:50.000. Os mapas digitais foram gerados com base nos resultados obtidos por meio das metodologias aplicadas para geração dos resultados quanto ao uso e cobertura superficial e das

áreas impermeáveis, e posteriormente os resultados obtidos por meios da aplicação dos modelos hidrológicos. A geração levou também em conta, a coleta de dados espaciais convencionais, digitais, levantamentos de campo, leitura de documentos cartográficos, interpretações de fotografias aéreas e imagens de satélite.

Para produção dos planos de informações ou mapas digitais, foi utilizada técnicas de cartografia digital e mapeamento temático por meio do software QGIS 2.12. Esse mesmo software foi utilizado na obtenção das informações quantitativas das classes ou feições definidas. Os procedimentos adotados na produção dos mapas digitais seguiram as normas e os critérios do Sistema Cartográfico Nacional (SCN).

3.3.3.1 Mapa pluviométrico

Dentre as informações climatológicas, os dados de precipitação (altura pluviométrica, distribuição espacial e temporal) são os mais importantes para a gestão de recursos hídricos e podem ser utilizados para inferir as tendências pluviométricas de determinada região e calcular o balanço hídrico (GONÇALVES, 2007).

Para geração do mapa pluviométrico, foram utilizadas as médias plurianuais das chuvas de quatro estações: estação 935004 (média 1897,8 mm), estação 935014 (média 1705,8 mm), estação 935021 (média 1355,7 mm) e a estação 935024 (média 1992,0 mm), que apresentam dados referentes ao período de 1961 a 2015. Embora existam muitas estações catalogadas nas proximidades da bacia, apenas essas quatro puderam ser usadas como fonte de informações pluviométricas, pois muitas estações apresentavam séries históricas com períodos curtos de observação. A distribuição espacial das alturas das médias pluviométricas da bacia pode ser verificada no apêndice deste estudo.

Para representação cartográfica do mapa pluviométrico, espacialização das médias plurianuais das chuvas, empregou-se o método geoestatístico de interpolação denominado IDW – Inverse Distance Weighted (inverso do peso da distância). O IDW é interpolador determinístico univariado de médias ponderadas. A interpolação pelo IDW supõe explicitamente que as feições mais próximas são mais semelhantes do que as mais separadas. Esta suposição é coerente com a modelagem de dados geográficos e está embutida na base de vários processos de modelagem natural e ambiental (BURROUCH e McDONNELL, 1998). Para interpolação das médias plurianuais das estações foi utilizado o software QGIS versão 2.12.

3.3.3.2 Mapa de declividade

Para estudos hidrogeológicos, a configuração do relevo é de grande importância no que se refere a influência de cada aspecto fisiográfico nas condições de infiltração e armazenamento da água subterrânea. Pois a inclinação do terreno é determinante na taxa de infiltração, ou seja, quanto maior a declividade, menor a infiltração de água e vice-versa (GONÇALVES, 2007).

O mapa de declividade foi gerado a partir das informações altimétricas da base cartográfica planialtimétrica digital de Maceió (SEMPLA, 1998) e das cartas topográficas de Maceió (CODEAL, 1977), por meio do software SPRING 5.2.

Posteriormente, quatro intervalos (0-8%; 8-15%; 15-30%; >30%) de declividade foram definidos e reclassificados, subjetivamente, com base no funcionamento do fluxo superficial. A distribuição das classes de declividade definidas pode ser verificado no apêndice deste estudo.

3.3.3.3 Mapas potenciométricos

Os mapas potenciométricos são isolinhas de contorno das cargas hidráulicas de um aquífero, ou seja, representa o modelo de circulação das águas subterrâneas, com a definição das direções preferenciais de fluxo d'água, do gradiente hidráulico, da localização de áreas de descarga/recarga (CLEARLY, 2007 apud CARVALHO et al, 2014).

Para confecção dos mapas potenciométricos dos cenários propostos nesse estudo, primeiramente, foi organizado um banco de dados dos poços cadastrados no município de Maceió, dados adquiridos na Companhia de Saneamento de Maceió – CASAL e na ANA (2011).

A partir disso, foram selecionados poços representativos da melhor distribuição espacial na área de estudo e em cada cenário analisado (1988, 2002 e 2013). Desta forma, foram utilizados poços com informações da data de perfuração ou campanhas de medições próximas dos anos estudados. Foram utilizadas informações referentes a 124 poços que, em função dos períodos analisados, ficaram assim distribuídos: 1988 – 43 poços; 2002 – 45 poços; e 2013 – 36 poços.

Para construção dos mapas, foram consideradas as informações referentes a relação entre a cota altimétrica na superfície do poço em relação ao nível de água registrado na sua perfuração ou campanhas realizadas, ou seja, o nível estático (NE). Após selecionados os registros

necessários para cada cenário proposto, foi realizado o processo de interpolação dos dados com o auxílio do software Surfer versão 8, utilizando-se o método de interpolação de krigagem ordinária⁴, escolhido em função da natureza regionalizada da variável “nível potenciométrico” e da ausência de tendência ou deriva nos dados.

Com os dados já especializados, foram confeccionados os mapas temáticos com as linhas equipotenciais da superfície potenciométrica (mapa de contornos), com espaçamento de 2m, e tendência de direção de fluxo subterrâneo (mapa de vetores).

3.4 Geoprocessamento e aplicação dos modelos hidrológicos

Os modelos aplicados buscam entender o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica por meio de parâmetros de ordem física e antrópica, e como estes se relacionam com o sistema hidrológico. Os dois modelos propostos (SCS-CN e Potencial de Recarga do Solo) têm por finalidade o estudo dos impactos da urbanização através da representação das características superficiais do terreno para quantificar o escoamento superficial, infiltração e armazenamento em uma bacia hidrográfica urbana a parcialmente urbanizada. Para tanto, utilizando-se para aplicação e efetivação dos modelos hidrológicos o emprego das técnicas de Geoprocessamento.

3.4.1 Modelo do Soil Conservation Service (SCS-CN)

Para se determinar o escoamento superficial utilizou-se o método Curva Número - CN, o método mais utilizado para as estimativas do escoamento superficial em bacias hidrográficas. Desenvolvido pelo Soil Conservation Service - SCS, atual National Resource Conservation Service - NRCS, é sobretudo utilizado em áreas que não dispõem de variada gama de dados hidrológicos e representa os efeitos da combinação entre grupos hidrológicos, uso e ocupação do solo, características do solo e umidade antecedente (BASTOS, 2009).

O modelo hidrológico Curva Número é bastante conhecido e difundido na conservação do solo e da água, sendo usado para estimar o escoamento superficial direto gerado por um

⁴ Krigagem é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Trata-se, em último caso, de um método de estimativa por médias móveis (LANDIM et al, 2006). Um tipo característico de interpolação por krigagem é a chamada krigagem ordinária, a qual trabalha com variáveis regionalizadas que tenham um comportamento estacionário.

determinado evento de precipitação pluviométrica. O modelo é fundamentado em um parâmetro que busca descrever o tipo de uso do solo e a condição da superfície do terreno, em relação ao potencial de gerar escoamento superficial (NUNES, 2012).

O método SCS-CN tem como base a equação do balanço hídrico. A determinação do escoamento superficial direto (Q) no método se dá através da equação (2). Na referida equação Q é função de um único parâmetro, o CN, que se encontra tabulado na maioria dos manuais e livros de drenagem hidrológica (TASSI; ALLASIA; MELLER, 2006)

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

onde: Q = escoamento superficial direto em mm; P = precipitação em mm; S = armazenamento potencial máximo do solo em mm; I_a = perdas iniciais em mm, incluindo perdas por armazenamento na superfície, interceptação, infiltração inicial e outros fatores.

O método considera uma perda inicial de água, representada por I_a na equação anterior, correspondente a quantidade de precipitação que não produz escoamento no início da chuva, geralmente relacionada com o tipo de solo e a cobertura vegetal, representando, em média, 20% da capacidade de armazenamento do solo. A relação, apresentada na equação (3), remove a necessidade da estimativa de I_a para locais sem a disponibilidade de dados.

$$I_a = 0,2.S \quad (3)$$

Dessa forma, introduzindo a equação 3 em 2, obtém-se:

$$Q = \frac{(P - 0,2.S)^2}{P + 0,8.S} \quad (4)$$

Para determinar a capacidade de armazenamento do solo, valor de S (tipo de uso e cobertura superficial), o método relaciona esse parâmetro com um fator CN , através da equação 5.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

O CN é um parâmetro adimensional, que reflete o potencial de escoamento superficial de um determinado local, estabelecido numa escala de 1 a 100 em função da cobertura e características de permeabilidade do solo. Esta variação tenta retratar as condições do solo,

variando de uma cobertura muito impermeável (limite inferior) até uma cobertura completamente permeável (limite superior); e pode ser obtido por meio da classificação, de acordo com quatro grupos hidrológicos de solo (quadro 4) e três condições de umidade antecedente, apresentadas a seguir:

Quadro 4 – Descrição dos grupos hidrológicos dos solos

Grupo Hidrológico do Solo	Descrição do solo
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial. Solos arenosos profundos com pouco teor de argila (até 10%), e alta capacidade de infiltração entre 1,20 - 0,80 (cm/h).
B	Solos arenosos menos profundos e menos permeáveis do que o anterior (tipo A), e com permeabilidade superior à média com teor de argila de 10 -20%, e capacidade de infiltração entre 0,80 - 0,40 (cm/h).
C	Solos pouco profundo com porcentagem elevada de argila (20-30%) que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média entre 0,40 - 0,15 (cm/h).
D	Solos compostos principalmente por argila (acima de 30%), pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração (0,15 - 0,00 cm/h), com camada argilosa próxima a superfície, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Fonte: Adaptação de Canholi (2005), Tucci (2007) e Bastos (2009)

Esse fator *CN* é tabelado, tratando diferentes coberturas e uso do solo e nas condições de umidade antecedente da bacia. Desta forma, o método do SCS estabelece as seguintes condições de umidade antecedente (Tucci, 2007):

- Condição I: situação em que os solos são secos. Na estação de crescimento a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 36 mm e em outro período, menor que 13 mm;
- Condição II: situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo;
- Condição III: situação em que ocorrem precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. No período de crescimento, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores, são maiores que 53 mm e no outro maior que 28 mm.

3.4.1.1 Definição dos parâmetros utilizados

Definido o modelo, quanto as descrições das fórmulas, a importância da cobertura superficial, informação quanto aos grupos hidrológicos dos solos e quanto à sua umidade antecedente, foi necessário definir os parâmetros que serão utilizados para o modelo proposto. Dessa forma, foi necessário realizar o levantamento e o mapeamento de dados referentes aos tipos de solos e cobertura superficial do terreno, uma vez que o método SCS-CN utiliza-se da técnica de quantificação de áreas impermeáveis e da representação das características superficiais do terreno para avaliar os impactos da urbanização sobre o sistema hídrico, em bacias hidrográficas urbanas a suburbanas (NUNES; FIORI; FIRPO, 2011).

Para tanto, foi utilizado como parâmetro da cobertura superficial da bacia as classes de uso e cobertura definidas no item 3.3.2.3, que serviram para determinar as áreas permeáveis e impermeáveis da bacia endorreica. Os dados referentes às características físicas do solo foram extraídos do mapa pedológico de Maceió confeccionado pela EMBRAPA (2000), onde a partir do mapa, buscou-se uma correlação entre a pedologia encontrada e a classificação hidrológica dos solos proposta pelo Soil Conservation Service (SCS), apresentando os solos do tipo Latossolos Amarelos (ver item 4.2.4) como a classe predominante. Ao procurar enquadrar o tipo de solo nos padrões apresentados pelo SCS-CN, buscou-se na literatura, em particular no trabalho de Nunes (2007), a classificação hidrológica correspondente. Dessa forma, através da comparação, foi definido o Grupo C como grupo hidrológico dos Latossolos Amarelos.

Na aplicação do modelo foi utilizada a condição de umidade antecedente do solo descrita como Condição II. Foi escolhida esta condição considerando representar uma situação intermediária para a umidade do solo.

Para a aplicação do método foi necessário também o levantamento de dados pluviométricos, que foram utilizados na calibragem do modelo hidrológico. Como dados de entrada, selecionou-se a precipitação máxima diária (maior índice pluviométrico) verificada em uma série histórica que se estende entre o período de 1961 a 2015 (item 3.2.2). Como principal precipitação máxima, tem-se a de chuva de 5 de junho de 2010, com 187,8mm.

3.4.1.2 Determinação dos valores *CN*

A determinação dos valores de *CN* baseou-se na proposta e estimativa de Tucci (2007) e, principalmente, de Nunes (2007), no qual partiu da utilização do módulo cálculo do *CN* para bacias urbanas do modelo hidrológico-hidrodinâmico IPHS1 versão 2.1, elaborado pelo

Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, definindo-se os valores de CN para as determinadas classes temáticas de uso e cobertura (cobertura superficial).

3.4.1.3 Obtenção dos valores do coeficiente de armazenamento (S)

Esse parâmetro é calculado por meio da equação 5 que estipula a capacidade máxima de infiltração da camada superficial do solo. Foram calculados os valores do parâmetro S para cada uso e cobertura do solo, grupo hidrológico de solos e condição de umidade antecedente, obtidos nos valores de CN .

3.4.1.4 Determinação da perda inicial da precipitação (I_a)

A determinação do valor da perda inicial da precipitação, equivalente a 20% da precipitação total, foi efetuada de acordo com o método SCS, calculada através da eq. 02.

3.4.1.5 Obtenção dos valores do coeficiente de escoamento superficial (Q)

Os valores do coeficiente de escoamento superficial foram determinados com base na relação $Q = 0$ para $P < I_a$ e na eq. 04 para $P > I_a$. Como resultado da aplicação dessas equações, se apresenta o coeficiente de escoamento superficial calculado para a precipitação máxima diária analisada.

3.4.2 Processos hidrológicos

Os modelos matemáticos empregados para a simulação do escoamento superficial e o entendimento dos processos hidrológicos da Bacia Endorreica do Tabuleiro foram abalizados em metodologias preconizadas e aplicadas a bacias urbanas com características semelhantes à desse estudo (SANTOS, 2006; BASTOS, 2009; COLET, 2012; MARTINS, 2012; NUNES, 2007; PEDROSA, 1996; PEPLAU, 2005). Com base nas informações até então obtidas, foram determinados: o tempo de concentração da bacia, os hietogramas correspondentes às chuvas intensas e, por fim, os hidrogramas característicos das vazões máximas na bacia.

3.4.2.1 Tempo de concentração (T_c)

O tempo de concentração é definido como o tempo que a água leva para percorrer desde o ponto mais distante da bacia hidrográfica até a seção de interesse. Desta forma, toda a área da bacia estará contribuindo para o escoamento, desde que a duração da chuva excedente seja no mínimo igual ao tempo de concentração (SUDERHSA, 2002).

Existe uma grande quantidade de fórmulas que fornecem o valor do tempo de concentração em função das características físicas das bacias. Essas fórmulas são originárias de estudos de campo ou laboratório, e apresentam bons resultados quando aplicadas para condições semelhantes às aquelas para as quais foram determinadas.

Para pequenas bacias, onde as condições naturais ainda não foram significativamente alteradas, a fórmula de Kirpich conduz a resultados aceitáveis. Contudo, para bacias urbanas ou em processo de urbanização esse tipo de fórmula não representa adequadamente os escoamentos em superfícies alteradas e/ou impermeabilizadas (SUDERHSA, 2002).

Outra fórmula recomendada para bacias urbanas onde predomina os escoamentos em sistemas de macrodrenagem é o método cinemático, que consiste em dividir a bacia em trechos e calcular a velocidade do escoamento de cada um. Entretanto, em bacias urbanas onde o escoamento ocorre em canais não bem definidos, torna-se um problema definir um percurso principal e as velocidades do escoamento.

Nesses casos é imprescindível a utilização de fórmulas que considerem as alterações provocadas pela urbanização. Assim, para o cálculo do tempo de concentração na bacia endorreica do Tabuleiro do Martins foi utilizada a equação de Germano et al (1998):

$$T_c = 18,628 \frac{L^{0,882}}{IMP^{0,272}} \quad (6)$$

onde, T_c é tempo de concentração em minutos, L é o comprimento do talvegue em Km, e IMP é a porcentagem da parcela da bacia com área impermeável em Km².

O estudo realizado por esses autores para formulação do tempo de concentração em bacias urbanas empregou dados hidrológicos (131 eventos com observações simultâneas de chuva e vazão) de 28 bacias urbanas localizadas em 6 cidades brasileiras (Porto Alegre-RS, Joinville-SC, Curitiba-PR, São Carlos-SP, São Paulo-SP e Rio de Janeiro-RJ), cujas áreas de drenagem variam entre 1,9 e 137,4 km².

Segundo Nunes (2007), apesar da fórmula elaborada por Germano et al. (1998) envolver poucos parâmetros em relação à maioria das fórmulas de cálculo de tempo de concentração, a sua escolha é indicada, pois é adaptada a bacias urbanas, além de ser a única que leva em conta o percentual de áreas impermeáveis.

3.4.2.2 Intensidade pluviométrica (*I*)

Para quantificação da intensidade da precipitação e sua variabilidade temporal, optou-se pela equação de chuvas intensas proposta por Pfafstetter (1982). O autor elabora a equação através da relação de intensidade-duração-frequência (Curva IDF), nesse estudo, baseada na análise dos registros pluviométricos observados na Estação Pluviométrica de Maceió.

$$I = \frac{a.Tr^b}{(t+c)^d} \quad (7)$$

onde, *I* é a intensidade da precipitação em mm/h; *Tr* é o tempo de retorno em anos; *t* é a duração em minutos; *a*, *b*, *c* e *d* são parâmetros ajustados para o local.

Para aplicação da equação foram utilizados os parâmetros propostos por Fragoso (2004), para a cidade de Maceió, apresentados na tabela a seguir:

Tabela 1 - Parâmetros da equação IDF para a cidade de Maceió

Parâmetros	Valores
a	1012,415
b	0,181
c	30
d	0,75
R ²	0,99773

Fonte: Fragoso (2004)

Para a geração do escoamento superficial em cada cenário proposto, foram escolhidos os períodos de retorno de 5, 10 e 25 anos, pois, de acordo com Tucci (2003) ao descrever os intervalos usuais para a escolha dos tempos de retorno de precipitação em projetos de drenagem urbana, definiu que os dois primeiros (5 e 10 anos) são usualmente utilizados para concepções de microdrenagem urbana e o último (25 anos) é recomendado para dimensionamento em obras de macrodrenagem.

Com base na intensidade pluviométrica e sua duração, foi obtida a altura total precipitada. Para tanto, optou-se pelo método dos blocos alternados (TUCCI, 1997). A

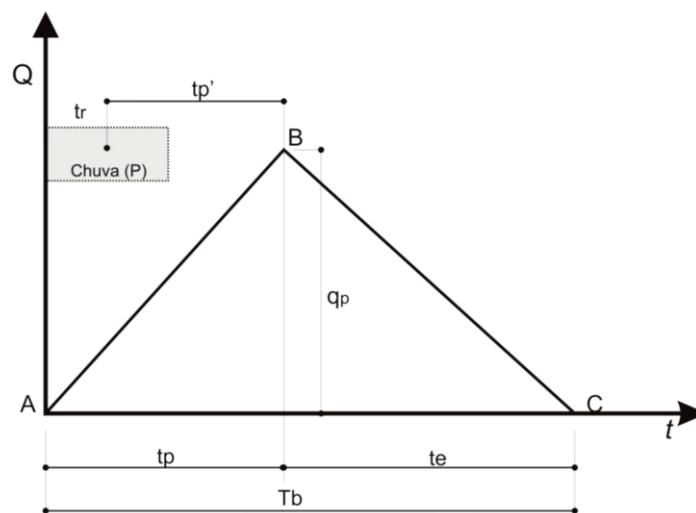
distribuição temporal das alturas pluviométricas calculadas através da curva IDF resultou nos hietogramas.

Para se obter os hietogramas correspondentes aos períodos de retorno estabelecidos, foi utilizado o método do Soil Conservation Service (SCS, 1972), o qual considera a relação entre o armazenamento máximo, S (mm); a precipitação máxima acumulada, P (mm); a precipitação efetiva acumulada, P_e (mm); a quantidade armazenada no instante ($P - P_e$); as abstrações iniciais, I_a , ($0,2 \times S$) e o parâmetro curva número, CN .

3.4.2.3 Vazões máximas (Q_p)

Para determinar as vazões máximas foi utilizado o Método do Hidrograma Unitário (HUS) proposto pelo Departamento dos Estados Unidos Soil Conservation Service (SCS), método desenvolvido a partir de um estudo com um grande número de bacias. Ao usar o Método do HUS do SCS, determina-se um hidrograma sintético, com formato triangular, onde sua área é igual ao volume precipitado Q , sendo determinado pela vazão de pico q_p , tempo de pico t_p e tempo de base T_b , conforme Figura 3.

Figura 3 - Hidrograma Unitário Sintético Triangular



Fonte: Colet (2012).

A vazão de pico do hidrograma unitário triangular é estimada pela equação 8:

$$q_p = \frac{2,08.A}{t_p} \quad (8)$$

Onde, q_p é a vazão de pico (m^3/s), A é a área da bacia em km^2 e t_p é o tempo de ascensão do hidrograma unitário medido em horas.

Quanto as variáveis da equação, foram obtidas da seguinte forma:

O tempo de ascensão do hidrograma unitário pelo uso da equação 9.

$$t_p = t_r + \frac{D}{2} \quad (9)$$

Onde, t_p é o tempo de ascensão, t_r a duração da precipitação em horas, e D a duração da chuva unitária em horas, dada pela equação:

$$D = 0,133t_c \quad (10)$$

$$t_r = 0,6t_c \quad (11)$$

Onde, t_c o tempo de concentração.

O HUS é decorrente de uma precipitação unitária de 1 mm. Portanto, uma vez conhecido o HUS de uma bacia hidrográfica, é possível obter o hidrograma de projeto para a mesma bacia hidrográfica para diferentes precipitações efetivas. Para tal fim, se faz uso do princípio da superposição e proporcionalidade do HU (chamado de convolução) até se obter o hidrograma de projeto final, (TASSI et al, 2005).

A partir dos valores obtidos de t_p e q_p , obtiveram-se as ordenadas do Hidrograma Unitário da Área, através do Hidrograma Unitário Curvilíneo Adimensional (SCS, 1972). Para a estimativa do hidrograma de escoamento superficial foram utilizadas as ordenadas do hidrograma unitário e os valores de precipitação excedente obtidos a partir dos hietogramas efetivos, estimados pelas relações obtidas da equação IDF.

3.4.3 Modelo Potencial de Recarga do Solo

O modelo potencial de recarga hídrica do solo é um método empírico abalizado na análise de dados espaciais. Este modelo foi desenvolvido e aplicado por Gonçalves (2007) como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal. É estruturado de maneira lógica, e a integração dos dados e informações são feitas em ambiente de Sistema Geográfico de Informação.

De acordo com Hiscock et al, (1995), é dentro do ambiente do Sistema Geográfico de Informações que a manipulação dos dados toma a forma de um conjunto de operações algébricas, que resultam em mapa numérico configurando a estrutura da estatística espacial e da modelagem cartográfica, permitindo a análise simultânea de várias camadas ou layers de mapas.

Partindo destes entendimentos, foi definido para composição do modelo da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, as categorias de informações necessárias ao estabelecimento de critérios para o processo do modelo. Levou-se em consideração o acervo de dados disponíveis e obtidos através de modelo anteriormente aplicado, do Soil Conservation Service (SCS-CN). Como o presente modelo é de caráter físico e envolve diversas variáveis, faz-se necessário o uso de técnicas e procedimentos referentes à caracterização da potencialidade hídrica. Para um melhor entendimento das fases da metodologia foi elaborado o fluxograma apresentado na figura 4.

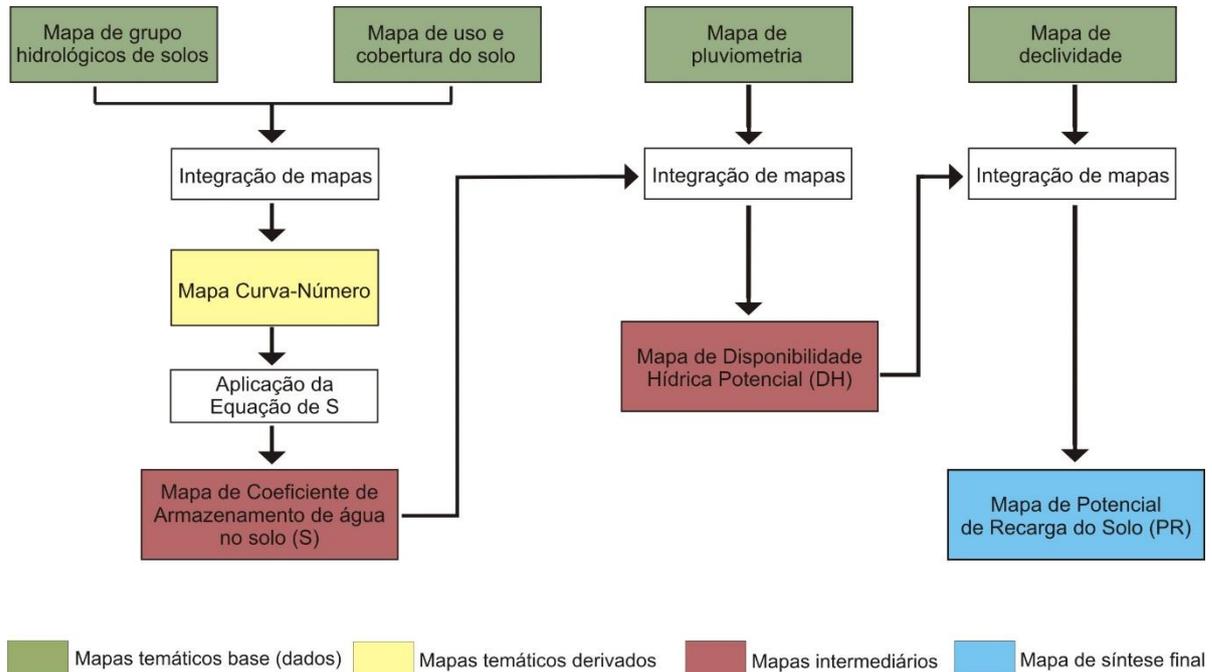
Os planos de informação (PI) obtidos anteriormente, foram integrados de modo a produzir novas informações fundamentais ao entendimento dos processos hidrodinâmicos e das influências do uso e da cobertura do solo da bacia em estudo. A cada mapa analítico gerado, procedeu-se a reclassificação dos atributos, de modo a permitir análises de acordo com as necessidades e objetivos do trabalho.

Para gerar o resultado deste modelo, foi necessário antes fazer a integração dos dados por meio dos processos que resultam na modelagem, originados por meio de três entradas: constituição do banco de dados, processamento dos dados e modelagem da integração. Porém, para alcançar o modelo pretendido, foi imprescindível a realização de três etapas: os planos de informações da capacidade de retenção de água no solo (Coeficiente de Armazenamento), o de disponibilidade hídrica potencial, e por fim, o de potencial de recarga do solo.

A primeira etapa do modelo foi obtida pela integração dos dados de uso de cobertura do solo e dos grupos hidrológicos de solos, que foram combinados objetivando produzir o mapa de coeficiente de armazenamento (S).

A segunda etapa, mapa de Disponibilidade Hídrica Potencial (DH), foi obtida por meio integração da etapa anterior, o mapa de coeficiente de armazenamento (S), integrado ao mapa de pluviometria da bacia (item 3.3.3.1). Esta etapa representa uma estimativa do percentual das chuvas que potencialmente pode infiltrar em cada ponto em um longo período de tempo, de forma que se possa considerar as médias das alturas pluviométricas como fator controlador dos processos de disponibilização de água para os aquíferos (GONÇALVES, 2007).

Figura 4 – Fluxograma metodológico



Na operação de cruzamento desses dados, os valores de S foram divididos pelos valores correspondentes no mapa de isoietas não classificado (valor real contínuo). Dessa forma, obteve-se um índice que varia de 0 a 50%. Isso significa que, em condições ideais de chuva e capacidade de saturação dos solos, no máximo, 50% da precipitação naquele ponto pode ser a disponibilidade hídrica potencial. Por outro lado, em casos extremos, certos locais representam condições de recarga nula (GONÇALVES, 2007).

A terceira e última etapa, resultado final, o mapa Potencial de Recarga do Solo (PR), é gerado a partir da integração da etapa anterior (mapa de Disponibilidade Hídrica Potencial - DH) integrado com a taxa de infiltração em função da declividade (T_{decl}) (item 3.3.3.2), por meio da seguinte operação matemática:

$$PR = \frac{(DH \times T_{decl})}{100} \quad (12)$$

onde, PR = potencial de recarga; DH = disponibilidade hídrica; T_{decl} = taxa de infiltração em função da declividade.

Segundo Gonçalves (2007), a declividade funciona como um controlador da disponibilidade hídrica, na medida em que o potencial de recarga diminui com o aumento do grau de dissecação do relevo. Sendo assim, torna-se possível afirmar que as melhores zonas de

recarga encontram-se em áreas com baixo grau de inclinação das superfícies. Porém, na medida em que as superfícies são impermeabilizadas, regiões potencialmente favoráveis à recarga deixam de exercer adequadamente esta função.

Conforme Gonçalves (2007), como ainda não foi definido na literatura uma relação entre a declividade, como fator redutor da capacidade de retenção de água dos solos, e a taxa de infiltração, a autora estabeleceu para aplicabilidade deste modelo as seguintes relações:

- declividade 0 a 8% - taxa de infiltração 95% da capacidade de retenção dos solos;
- declividade 8 a 15% - taxa de infiltração 70% da capacidade de retenção dos solos;
- declividade 15 a 30% - taxa de infiltração 45% da capacidade de retenção dos solos;
- declividade > 30% - taxa de infiltração 5% da capacidade de retenção dos solos.

4 A BACIA ENDORREICA DO TABULEIRO DO MARTINS

Tendo em vista a necessidade de se compreender as implicações do processo de urbanização no comportamento hidrológico, tais como o escoamento e a recarga dos aquíferos, como também a definição de áreas complexas dentro da bacia, é necessário entender as suas características presentes (físicas e antrópicas), para geração de resultados que visem proporcionar o ordenamento territorial da área. Nos parágrafos seguintes estão reunidas as revisões que deram embasamento para caracterização do objeto de estudo, a bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, no presente capítulo.

A região do tabuleiro costeiro, a noroeste de Maceió e local da bacia endorreica, vem sendo estudada desde a década de 70 por vários pesquisadores, destacando-se: Cavalcante (1978), Cavalcante e Wanderley (1982), Cavalcante et al (1992), Ferreira Neto et al. (2000), Santos et al. (2000) e Ferreira Neto et al. (2004). Os estudos destes pesquisadores foram voltados, sobretudo, para caracterização hidrológica dos recursos hídricos, sobretudo os subterrâneos dos aquíferos locais.

Outros estudos procuraram dá um enfoque principalmente quanto a drenagem, sobretudo no sistema de macrodrenagem instalado na região, como Pedrosa (1996), que avaliou as potencialidades das bacias de retenção na macrodrenagem urbana, como alternativa para o controle do impacto da urbanização no escoamento; Pedrosa (2006), que fez uma avaliação dos impactos do lançamento das águas excedentes do sistema de macrodrenagem no escoamento do rio Jacarecica; e a pesquisa de Sá Filho (2010) que procurou avaliar a qualidade das águas da lagoas de retenção do sistema da macrodrenagem.

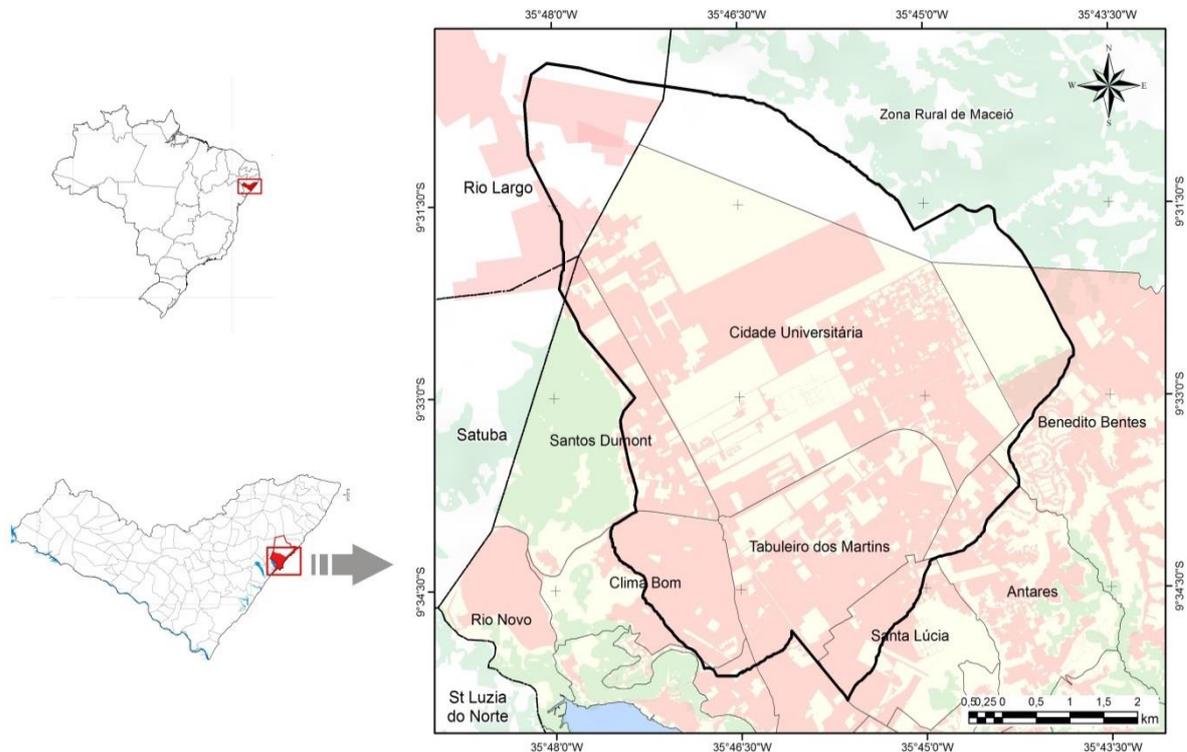
Outra pesquisa desenvolvida por Santos et al. (2004) que, em sua contribuição, procurou mostrar o resultado de uma análise feita de vários poços e relacionou com dados de superfície para caracterizar a geomorfologia local. Alguns trabalhos como Souza e Conceição (2006) e Cavalcante et al. (2013), procuram utilizar o Sistema Geográfico de Informação para distinção física, caracterização da ocupação e do uso e cobertura do solo voltadas, ambas as pesquisas, para a geração de dados visando o planejamento.

E, por fim, alguns estudos realizados por pesquisadores da área da arquitetura, deram uma contribuição quanto ao conhecimento dos padrões de ocupação, através de como ocorreu esse processo por meio dos conjuntos habitacionais em relação à influência dos processos naturais da bacia. Entre esses estudos estão Carvalho et al (2010), Carvalho (2012) e Santos (2014).

4.1 Descrição e localização da bacia

A bacia endorreica do Tabuleiro do Martins está situada no domínio dos tabuleiros costeiros, mais especificamente na região noroeste da cidade de Maceió e sudeste da cidade de Rio Largo, entre as coordenadas 9°31'42" e 9°34'57" de latitude sul e 35°44'15" e 35°35'04" de longitude oeste. A figura 5 ilustra esquematicamente a posição geográfica da bacia em estudo.

Figura 5 – Localização da área de estudo, bacia endorreica do Tabuleiro do Martins.



Fonte: Autor (2016)

A bacia estudada possui uma área de 45,76 km² e está inserida num interflúvio tabuliforme limitado pelas bacias do rio Carrapatinho/Catolé (Oeste), rio Pratagy (Nordeste), rio Jacarecica (Sudeste), riacho do Reginaldo (Sul) e o riacho do Silva (Sudoeste). Ela é classificada do tipo “Bacia Fechada”, termo usado para designar grandes depressões naturais, formando bacias sem exutório, com retenção do escoamento superficial nas áreas mais baixas.

4.2 Aspectos Físicos da Paisagem

De forma geral, a bacia é caracterizada por uma topografia ondulada, constituída por sedimentos argilo-arenosos da Formação Barreiras que dão origem aos solos do tipo Latossolos Amarelos. O relevo da bacia tem grande influência sobre os fatores meteorológicos, hidrológicos e sobre características importantes que ocorrem na mesma. Em virtude disso, a determinação das características morfométricas da área é de grande importância para determinação dos parâmetros e análises hidrológicas.

4.2.1 Caracterização Climática

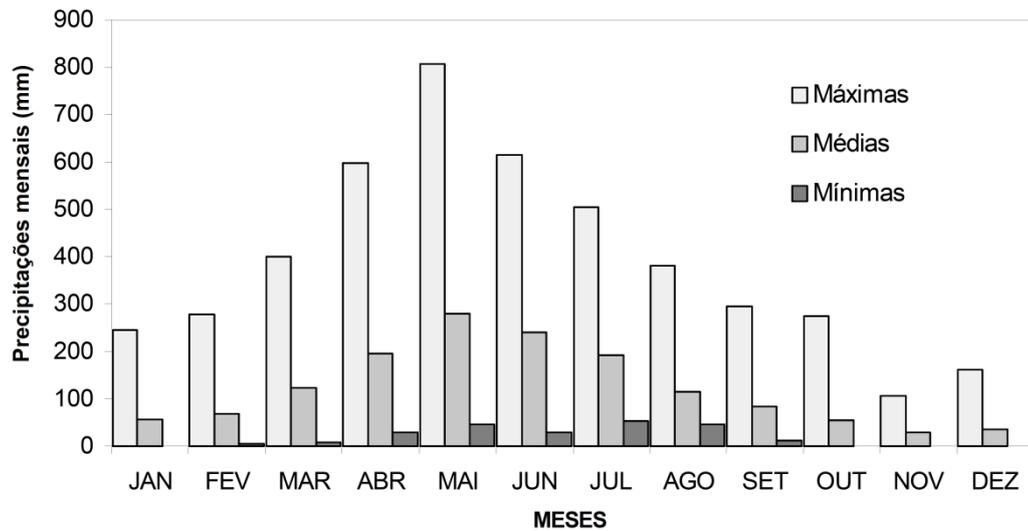
O clima da região em que se localiza a bacia, de acordo com a classificação de Köppen é do tipo *As'*, isto é: o clima é tropical chuvoso, com temperaturas elevadas durante todo ano. Apresenta duas estações bem definidas: a chuvosa, de março a agosto e a estação seca, de setembro a fevereiro, com precipitação média anual de aproximadamente 1480 mm, (SANTOS et al, 2004).

De acordo com a classificação climática de Thornthwaite-Mather (1955), a área apresenta clima sub-úmido seco, com deficiência d'água moderada, megatérmico. A evapotranspiração potencial anual média é de 1193 mm e se concentra no quadrimestre outubro-janeiro, correspondente aos meses mais quentes do verão (SANTOS et al, 2000).

A região está associada a temperaturas elevadas o ano todo, com baixa amplitude térmica anual, médias em torno de 6°C. Entretanto, a relativa homogeneidade térmica contrasta-se com a grande variabilidade espacial e temporal das chuvas. Caracteriza-se também por apresentar baixos índices de nebulosidade (FERREIRA NETO et al, 2004). A umidade relativa do ar atinge o máximo de 82,9% no mês de maio e a mínima de 75,7% no mês de novembro (FERREIRA NETO et al, 2000).

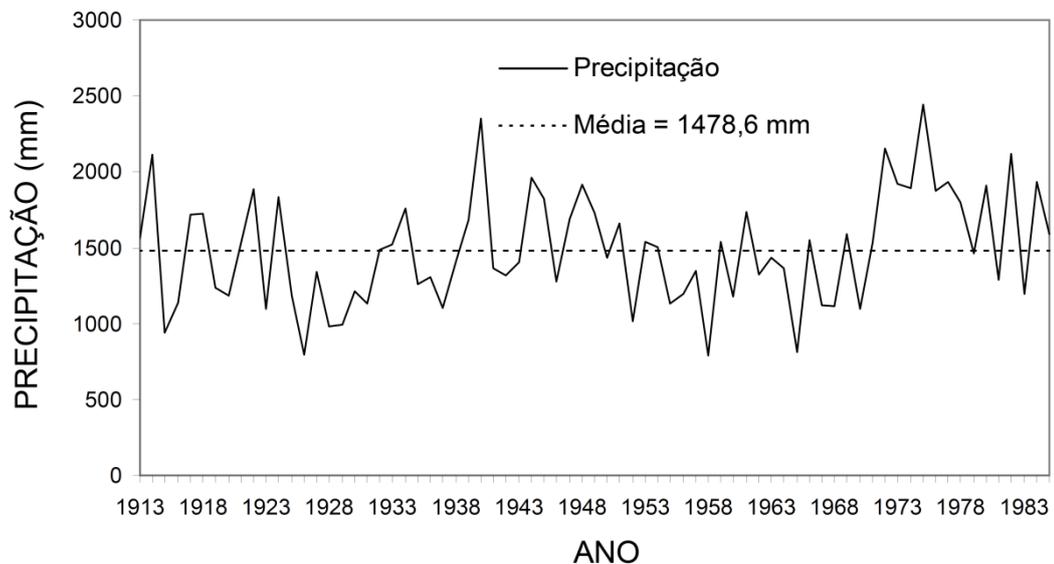
A série histórica da pluviometria para a área, estação Maceió, período de 1913 a 1985 (SUDENE, 1990) representada na figura 6, mostra os meses de abril, maio e junho com os índices pluviométricos mais altos, enquanto os meses de outubro a janeiro são considerados os mais secos. Segundo Santos et al (2000) a elevada concentração de chuva em dois ou três meses do ano e a irregularidade de sua distribuição temporal e espacial é uma das características da precipitação de Maceió. A pluviometria anual referente à estação Maceió, apresentou uma média de 1478,6 mm, figura 7.

Figura 6 – Medias pluviométricas mensais, estação Maceió (1913 a 1985).



Fonte: Santos et al (2000)

Figura 7 – Pluviometria anual, estação Maceió (1913 a 1985).



Fonte: Ferreira Neto et al (2000)

4.2.2 Caracterização geomorfológica

A área da bacia está geomorfológicamente inserida no domínio dos Tabuleiros Costeiros, unidade de extensão regional que acompanha toda a costa do Estado de Alagoas, formada por um pacote de sedimentos semipleno, depositados em uma faixa paralela a linha de costa (SANTOS et al, 2004). A morfologia da área é tabuliforme elaborada desde o Terciário Superior a partir dos depósitos da Formação Barreiras.

A região apresenta uma condição de relevo plano a suave ondulado, com uma conformação de bacia endorreica, com as menores cotas (65m) formando uma depressão. Ferreira Neto et al (2004) ressaltam que essa configuração é de grande importância para os aquíferos subjacentes, tornando-a uma área preferencialmente de zona de recarga, por favorecer a infiltração direta a partir das precipitações.

Santos et al (2004) mostram que a geomorfologia da área foi controlada por fatores estruturais, por ação tectônica a partir do Terciário Superior, fenômeno conhecido por Neotectônica. Quanto variação altimétrica, a cota máxima observada na bacia é de 120m, na porção noroeste, enquanto a cota mínima, como descrita acima, na parte central da bacia, localizada no distrito industrial, mais precisamente na lagoa do Distrito Industrial, com uma altitude de 65m. A relação da variação altimétrica da bacia pode ser verificada no apêndice desse estudo.

4.2.3 Caracterização geológica

A área da bacia está inserida na unidade geológica da Formação Barreiras. Segundo Santos et al (2004) a litologia da área em estudo é monótona, aflorando apenas sedimentos clásticos de origem continental, de idade Plio-pleistocênica (Terciário-Quaternário), inconsolidados, de cor amarela avermelhada e constituídos com alternância de areias, silte e argila que formam, no conjunto, um pacote de espessura aproximada de 130 metros. De acordo com Feijó (1994) apud Santos et al (2004) a Formação Barreiras recobre discordantemente as formações mais antigas da bacia de Alagoas.

Santos et al (op. Cit.) ressaltam que, na maior parte da área estudada, ocorre em sub-superfície, as areias grossas de cor cinza e sub-arredondadas da Formação Marituba com profundidade variável de 60 a 126 metros. No norte da área, a Formação Barreiras está sobreposta aos sedimentos conglomerativos da formação Poção.

Por sua vez, ANA (2011) esclarece que em escala de afloramento, esses sedimentos se distribuem em estratos cujos acamamentos são praticamente horizontais. Com espessura média de 62,5 metros, está sobreposta ao Embasamento Cristalino e sedimentos da Bacia de Alagoas, principalmente sobre as formações Poção e Marituba. Mudanças bruscas na litologia e coloração foram verificadas sugerindo em alguns casos, falhas de gravidade.

4.2.4 Caracterização pedológica

Na bacia endorreica a pedologia, em geral, se caracteriza pela presença de um único tipo de solo, o Latossolo Amarelo, solos desenvolvidos, principalmente, sobre os sedimentos da Formação Barreiras.

Segundo a EMBRAPA (2000), a área apresenta solos profundos, bem drenados, argilosos e com baixo gradiente textural. Possui boas propriedades físicas e ótimas condições de manejo e tratos culturais. Apresenta uma cor amarelada e uniforme em profundidade, com o mesmo ocorrendo com o teor de argila. A textura é argilosa e apresenta elevada coesão dos agregados estruturais. São solos altamente intemperizados e caracterizados pelo horizonte diagnóstico B latossólico.

4.3 Dados fisiográficos e hidrológicos da bacia

4.3.1 A bacia endorreica

Primeiramente, antes de iniciar a caracterização fisiográfica e hidrológica da bacia, é necessário conhecer o significado do termo, bacia endorreica, e o comportamento dos componentes do seu ciclo hidrológico.

De acordo com Tucci (1997) a bacia hidrográfica, ou de drenagem, pode ser entendida como uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, denominado exutório. De acordo com o tipo de escoamento, Christofolletti (1980) classifica as bacias de drenagem em quatro tipos: exorreicas, endorreicas, arreicas e criptorreicas.

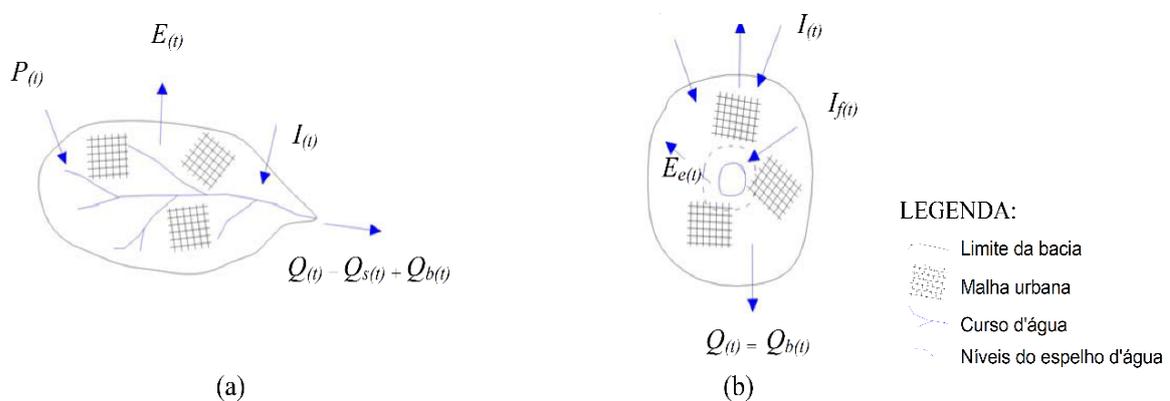
Santos (2006) expõe que as bacias fechadas (endorreicas) são aquelas nas quais o escoamento superficial se acumula em lagos que não se comunicam por uma rede superficial com outros cursos d'água da bacia. A autora esclarece que essas bacias são elementos especiais na abordagem da gestão do meio urbano uma vez que constituem áreas normalmente propensas à ocorrência de cheias, por não apresentarem uma saída natural para o escoamento das águas pluviais.

Santos (op. cit.) verifica que essas bacias, por serem áreas especiais, precisam de um tratamento hidrológico diferenciado, uma vez que constituem uma massa de água sem saídas vertedouras. E esclarece que os processos naturais do ciclo hidrológico, tais como a

precipitação, infiltração, evaporação e o escoamento de base ocorrem naturalmente nos dois tipos de bacia hidrográfica (exorreica e endorreica).

Contudo, pode-se inferir que o escoamento superficial, na bacia endorreica, na seção de saída não ocorre, já que não há exutório, propiciando a formação de um volume d'água quase estático onde se destacam a infiltração no fundo da massa d'água (lago) e a evaporação do espelho d'água, (figuras 8).

Figura 8 – Representação dos elementos do ciclo hidrológico em bacia aberta (a) e bacia fechada (b).



Fonte: Adaptação Santos (2006)

Onde, $P(t)$ – Precipitação; $I(t)$ – infiltração; $E(t)$ – evaporação; $Qs(t)$ – escoamento superficial; $Qb(t)$ – escoamento de base.

4.3.2 Caracterização morfométrica

A caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas, e tem como objetivo elucidar as várias questões relacionadas com o entendimento da dinâmica ambiental local e regional.

Para Santos (2006) a determinação dos parâmetros morfológicos, de fácil implementação na grande maioria dos casos, merece atenção especial quando da caracterização de áreas de drenagem fechada. Nesses casos, toda precipitação contribuinte, transformada em escoamento superficial, converge para uma pequena área que não apresenta saídas.

Para determinação dos parâmetros relativos as características morfométricas da bacia quanto à forma, à rede de drenagem e ao relevo, foram assentados segundo os conceitos já definidos e conhecidos da hidrologia, mostrada no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros morfológicos definidos para bacias endorreicas

Parâmetros Morfológicos	Definição	Fórmula
Características da Forma		
Coefficiente de compacidade (K_c) ¹	É a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo igual à área da bacia	$K_c = \frac{0,28P}{\sqrt{A}} \quad (13)$
Fator de Forma (K_f) ¹	É a relação entre a largura média e o comprimento mais longo da bacia	$K_f = \frac{\bar{L}}{L_f} \quad (14)$
Índice de Circularidade (I_c) ²	É a relação entre a área total da bacia e a área de um círculo de perímetro igual ao da área total da bacia	$I_c = \frac{12,57.A}{P^2} \quad (15)$
Características da rede de drenagem		
Ordem dos cursos d'água ¹	É a classificação que reflete o grau de ramificação dentro de uma bacia	
Índice de bifurcação (R_b) ³	É a média geométrica das relações entre números de talvegues de duas classes consecutivas	$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad (16)$
Densidade de drenagem (D_d) ¹	É o quociente entre o comprimento total da rede de drenagem e a área da bacia hidrográfica	$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (17)$
Extensão média do escoamento superficial (L_e) ¹	É a distância média em que a água da chuva teria que escoar sobre a superfície da bacia, caso o curso de água principal fosse uma linha reta.	$L_e = \frac{A}{4L} \quad (18)$
Características do relevo		
Retângulo equivalente (L, l) ¹	O retângulo equivalente tem área e perímetro equivalentes à bacia, resguardando entre si as mesmas áreas que determinam na bacia.	$L, l = \left(\frac{k_c}{1,12} \sqrt{A} \times \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right] \right) \quad (19)$
Amplitude altimétrica ⁴	É a diferença altimétrica entre a altitude do ponto mais alto encontrado em qualquer ponto da divisória topográfica e a altitude da desembocadura	$H_m = H_{\max} - H_{\min} \quad (20)$
Índice de rugosidade (I_r) ⁴	É o produto entre amplitude altimétrica e a densidade de drenagem	$I_r = H.D_d \quad (21)$

Fontes: 1 Villela e Mattos (1975), 2 Muller (1953), 3 Horton (1932), 4 Christofolletti (1980)

Os parâmetros morfométricos servem de base para uma melhor relação entre as características físicas e o regime hidrológico da bacia. Dessa forma, o quadro 6 apresenta os

resultados das características da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, consolidado nos parâmetros acima apresentados.

Quadro 6 – Parâmetros morfológicos da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins

Parâmetros Morfológicos	Unidade	Valor
Características da área e das medidas lineares		
Área da bacia (A)	km ²	45,76
Perímetro da bacia (P)	km	29,91
Comprimento da drenagem principal ⁵	km	9,8
Comprimento da rede de drenagem (L _d)	km	37,58
Largura média (L)	km	5,98
Características da forma		
Coefficiente de compacidade (K _c)	adimensional	1,24
Fator de Forma (K _f)	adimensional	0,78
Índice de Circularidade (I _c)	adimensional	0,64
Características da rede de drenagem		
Ordem dos cursos d'água	adimensional	3
Índice de bifurcação (R _b)	adimensional	2,17
Densidade de drenagem (D _d)	km/km ²	0,19
Extensão média do escoamento superficial (L _e)	km	1,49
Características do relevo		
Retângulo equivalente (L,l)	km	L=10,66; l=4,29
Declividade média (I _m)	%	1,06
Altitude máxima	m	120
Altitude mínima	m	65
Altitude média (H _m)	m	92,5
Amplitude altimétrica	m	55
Índice de rugosidade (L _r)	adimensional	10,46

A caracterização morfométrica da bacia aponta para uma bacia de forma circular, sendo comprovado pelo índice de circularidade, coeficiente de compacidade e fator de forma. O que denota que toda a água escoada tende a alcançar a saída da bacia ao mesmo tempo, propiciando o acúmulo de água e, conseqüentemente, alagamentos.

Com base nos resultados, quanto ao relevo, os dados mostraram que a amplitude altimétrica da bacia corresponde a 55 metros, com altitudes muito próximas ao nível do mar, e

⁵ Por se tratar de uma bacia altamente urbanizada, os dados referentes as características da rede de drenagem (comprimento da rede de drenagem, ordem dos cursos d'água, densidade de drenagem, índice de bifurcação e extensão média do escoamento superficial), foram extraídas por meio de uma ortofoto da década de 60, quando a bacia encontrava-se mais próxima das características naturais. Na qual foi possível extrair as informações da rede de drenagem por meio de um mapeamento digital.

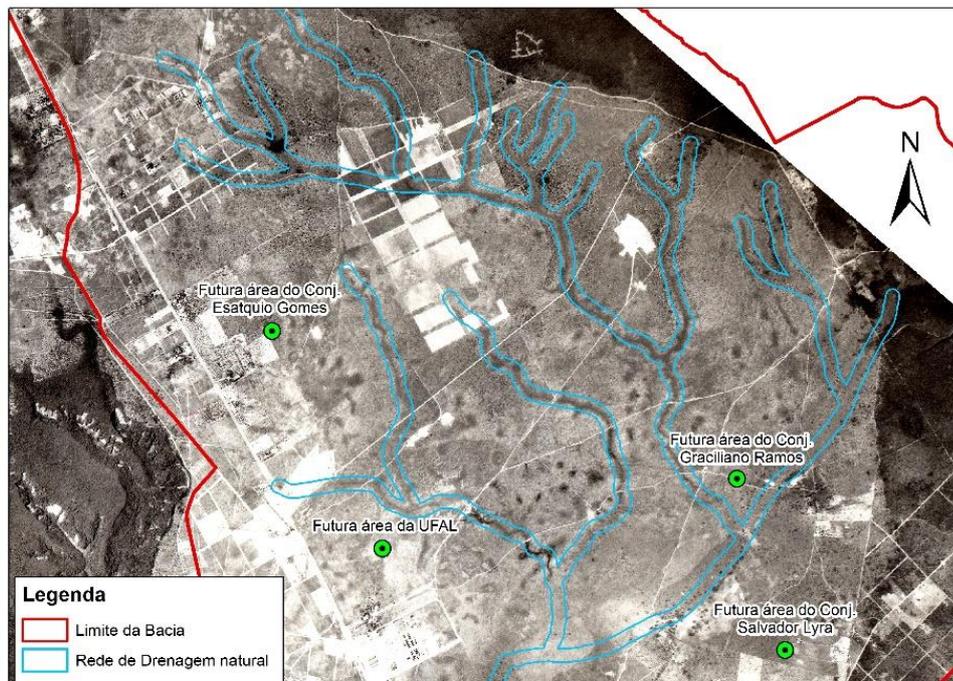
terrenos de declividade média de 1,06%, o que nos remete a uma área bastante plana. Quanto ao índice de rugosidade foi encontrado o valor de 10,46, permitindo concluir que a área da bacia apresenta um índice de rugosidade pequeno, refletindo vertentes de baixa declividade e de pouca extensão.

4.3.3 Hidrologia superficial

De acordo com Santos (2000), na área estudada praticamente toda a água superficial provém das chuvas e esco, geralmente, para essas depressões naturais ou para as lagoas de acumulação escavadas com a finalidade de atenuar as cheias, muito comuns na região. A área da bacia apresenta várias áreas de interceptação de águas pluviais (depressões naturais e lagoas artificiais), de onde evaporam ou infiltram no solo, contribuindo para a recarga dos sistemas aquíferos locais (SANTOS, op. cit.; FERREINA NETO et al, 2004).

Porém, face a grande ocupação ocorrida nessa área, apresenta-se atualmente com sua rede de drenagem totalmente desconfigurada devido às ações antrópicas, com poucas áreas de declive. Na figura 9 pode-se observar como era caracterizada a rede de drenagem na área, na década de 60, época em que a bacia ainda se encontrava próxima às suas características naturais.

Figura 9 – Configuração e situação das áreas de drenagem na década de 60.



Fonte: Acervo UFAL/IGDEMA/LGA⁶

⁶ Imagem aérea vertical pancromática executada pelo Serviço Aerofotogramético Cruzeiro do Sul S.A., no ano de 1965, na escala compatível de 1:60.000.

Com o advento da urbanização na área, muitos canais de escoamento natural e depressões foram aterrados, dando lugar a vias de circulação e edificações. O que configura a situação atual da área com inúmeros problemas relacionados à drenagem.

4.3.4 Características hidrogeológicas

Em termos hidrogeológicos, os aquíferos da área apresentam-se sob duas unidades litoestratigráficas: Formação Barreiras e Formação Marituba (SANTOS et al., 2000). Segundo os autores, na área de estudo, o aquífero Barreiras, tem espessuras de 11 a 63 metros, estando, por vezes, sotoposto a camadas de argila plástica, que podem ser consideradas confinantes. Já na parte noroeste, sul e sudeste da bacia apresenta espessuras de 6 a 48 metros, caracterizando-se como aquífero livre. Já o aquífero Marituba, apresenta uma camada argilosa no topo, mostrando assim características de aquífero confinado, podendo também se mostrar como um sistema livre, quando diretamente conjugado ao aquífero Barreiras (SANTOS et al., op cit).

Através do tratamento estatístico, realizados por ANA (2011), dos dados de poços profundos da PETROBRAS do ano de 1975, mostra que o comportamento litoestratigráfico evidencia que os aquíferos Barreiras e Marituba conceituados, respectivamente, como livre e confinado encontram-se em amplas áreas em estado de comunicação permanente, ou seja, compõem um único sistema hidráulico, o qual denomina-se de Sistema Aquífero Barreiras-Marituba. A figura 10 apresenta o comportamento das unidades litoestratigráficas para a área de estudo.

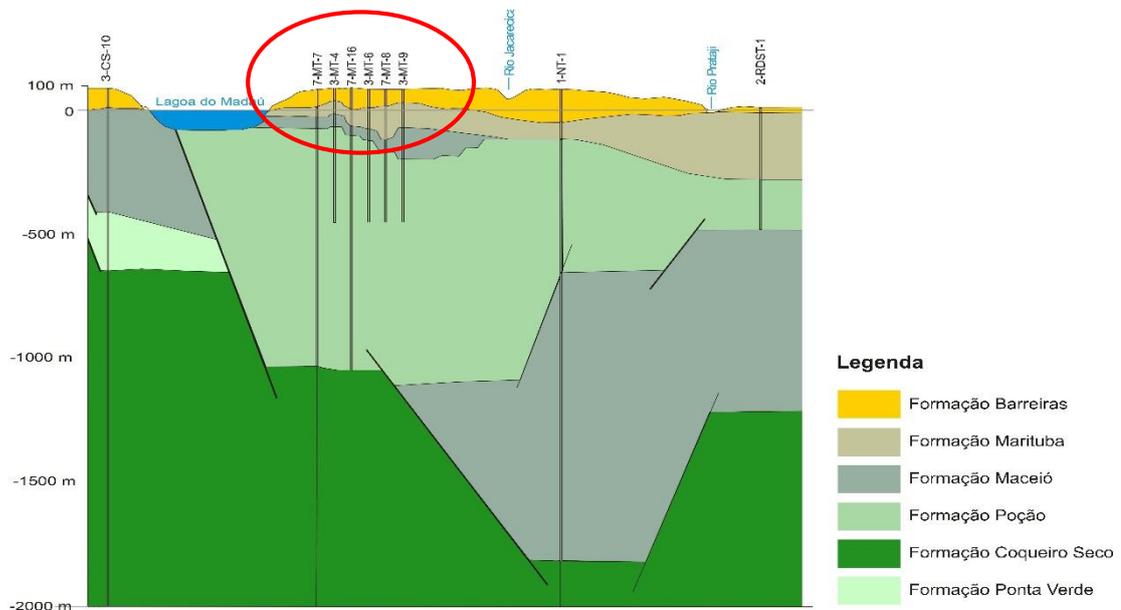
Conforme estudo hidrogeológico realizado no ano de 2011 pela Agência Nacional de Águas (ANA) o Sistema Aquífero Barreiras comporta-se como um sistema de potencial médio, em função das condições de aquífero livre a semiconfinado existentes, e da litologia bastante variada representada por intercalações de níveis arenosos, sílticos e síltico-argilosos, apresentando níveis de condutividade hidráulica elevada (10^{-3} m/s) e níveis muito menos permeáveis (10^{-8} m/s).

De acordo com o estudo, o Aquífero Barreiras está ameaçado de degradação devido à expansão urbana, onde os efeitos mais impactantes estão concentrados na drenagem que funciona como rede coletora do esgoto urbano, sistema de saneamento com deposição *in situ* de efluentes domésticos (fossas e sumidouros) e da ocupação desordenada do terreno. Ainda pode-se citar em menor escala para esta degradação, os cemitérios, postos de gasolina, a

fertirrigação da monocultura da cana-de-açúcar (ANA, 2011), além das indústrias instaladas no Distrito Industrial Governador Luiz Cavalcante.

O mesmo autor (op. cit.) ainda descreve que o Sistema Aquífero Marituba é o aquífero mais importante da área, em função da sua potencialidade, condições hidrogeológicas e hidroquímicas. O estudo mostrou com base nos perfis dos poços que penetram esta formação, que o mesmo é constituído por uma sequência de arenitos quartzosos, médios a grosseiros, cinzentos, que passam em profundidade para folhelhos e calcários. E indica condições predominantemente de semiconfinamento com drenança, podendo ocorrer também uma condição de semilivre. A recarga do Sistema Aquífero Marituba é exclusivamente por percolação vertical, através da Formação Barreiras.

Figura 10 - Perfil Geológico SW – NE, das unidades litoestratigráficas. Em destaque, círculo vermelho, a localização da área de estudo.



Fonte: adaptação ANA (2011)⁷

4.3.5 Macrodrenagem do Tabuleiro do Martins

De acordo com Peplau (2005), a região da bacia tem propensão natural para a ocorrência de alagamentos, ao fato de ser uma bacia sem saída natural das águas pluviais, que se acumulam no seu interior. Para agravar mais a situação, o processo de urbanização não considerou o grau

⁷ Perfil elaborado por meio da Carta Geológica da Bacia Sergipe e Alagoas, PETROBRAS/DNPM, folha SC. 25-V-C- IV-2(Maceió). Escala de 1:50.000, do ano 1975.

de risco de alagamento dos diversos locais da bacia, de forma que ocorreu ocupação urbana em locais de grande risco de alagamento.

Pedrosa (1996) ressalta que a bacia, com exceção de algumas ruas, não possuía sistema de drenagem de águas pluviais, portanto, a maioria das águas pluviais escoava naturalmente sobre a sua superfície, até a parte mais baixa da bacia, onde se encontra um importante polo econômico da cidade - o Distrito Industrial Luiz Cavalcante (DILC). Atualmente, com a expansão urbana, diversos conjuntos habitacionais foram implantados na área, comprometendo ainda mais a drenagem superficial nessa região.

Diante da preocupação, quanto a área ser propensa a eventos de alagamentos, sucedida pelo expressivo processo de ocupação dessa área, houve a preocupação em tentar solucionar tal problema. Em 1983, foi elaborada pela extinta Superintendência Municipal de Obras e Viação (SUMOV) o primeiro Sistema de Macrodrenagem do Tabuleiro dos Martins, intitulado de “Projeto Básico de Drenagem da Área do Grande Tabuleiro”, que previa a construção de nove lagoas para amortecimento das cheias (FERREIRA NETO, 2007).

Porém esse projeto não construiu o total de lagoas pretendidas, construindo apenas duas, e como também não levou em conta a crescente expansão da área e as consequências do aumento das áreas impermeabilizadas, o que acarretou no aumento das alagamentos, destacando as ocorridas nos anos de 1988, 1989 e 1992 (op. cit.).

Diante desses acontecimentos, em 1998 o governo do Estado, por meio da Secretaria de Infraestrutura do Estado de Alagoas (SEINFRA), e com o apoio do governo federal, foi elaborado um novo projeto de Macrodrenagem do Tabuleiro do Martins, uma adequação ao projeto anterior, onde este previu a utilização de três lagoas de retenção para a captação da água das chuvas, como forma de sanar a vazão de água nos períodos de cheia, nas indústrias localizadas no DILC (FILHO, 2010).

O projeto da macrodrenagem do Tabuleiro foi concebido como um plano de ocupação urbana que considera esses sistemas em sua implementação, acarretando numa menor necessidade de instalação de grandes estruturas para retenção do excesso de água nos períodos de chuva.

O Projeto de Macrodrenagem do Tabuleiro dos Martins, atualmente, totaliza três lagoas interligadas por canais, no qual todo o escoamento parte por um túnel em direção a bacia do rio Jacarecica, (PEPLAU, 2005). Duas dessas lagoas estão localizadas na região do Distrito Industrial e no Conjunto Habitacional Salvador Lyra, e a terceira no Conjunto Graciliano Ramos, denominadas, respectivamente de Lagoa 1 (coca-cola), Lagoa 2-3 e Lagoa 4.

A figura 11 mostra as lagoas de retenção, construídas para armazenar as águas resultantes do escoamento superficial e a descarga da Macrodrenagem da Bacia do Tabuleiro no rio Jacarecica.

Figura 11 - Localização das lagoas de retenção e da descarga da Macrodrenagem do Tabuleiro



Fonte: Google Earth (2015); Autor (2016)

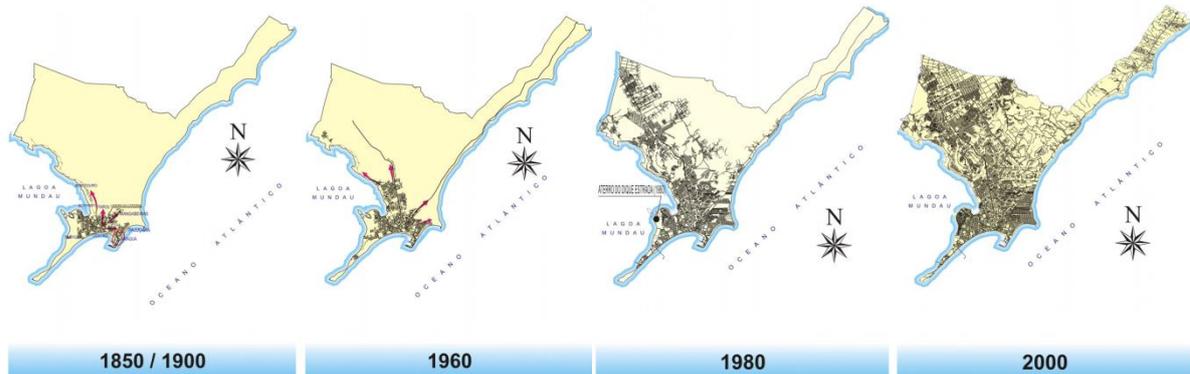
Para solucionar o problema dos alagamentos na bacia do Tabuleiro do Martins, notadamente no DILC, foi gradativamente implantado o Projeto de Macrodrenagem do Tabuleiro do Martins. Ferreira Neto et al (2004) ressaltam que o objetivo de amenizá-los por meio de lagoas artificiais de retenção não se mostrou totalmente eficiente, pois, enquanto a bacia infiltra naturalmente as águas, o Sistema de macrodrenagem as redireciona, em parte, para bacias hidrográficas vizinhas, reduzindo a recarga dos aquíferos.

4.4 Expansão urbana e adensamento populacional na bacia

O final da década de 1960 é marcado pelo intenso crescimento populacional de Maceió, com significativos reflexos e transformações na conjuntura do espaço urbano. O crescimento da cidade ganhou impulso devido ao grande número de migrantes que passou a convergir para a cidade em pleno desenvolvimento, quando se iniciou o êxodo rural no Estado de Alagoas. É importante considerar que por volta de 1960, a ocupação urbana intensifica-se para além da sua área central e bairros adjacentes (Figura 12).

Esse processo de expansão urbana seguiu os limites físicos de seu sítio natural: o oceano, a Lagoa Mundaú e o aglomerado de vales e encostas (CARVALHO e ROBALINHO, 2010). Dessa forma, o crescimento da cidade aconteceu em três direções: planície litorânea norte, margens da Lagoa Mundaú e tabuleiros costeiros, região onde se localiza a bacia endorreica.

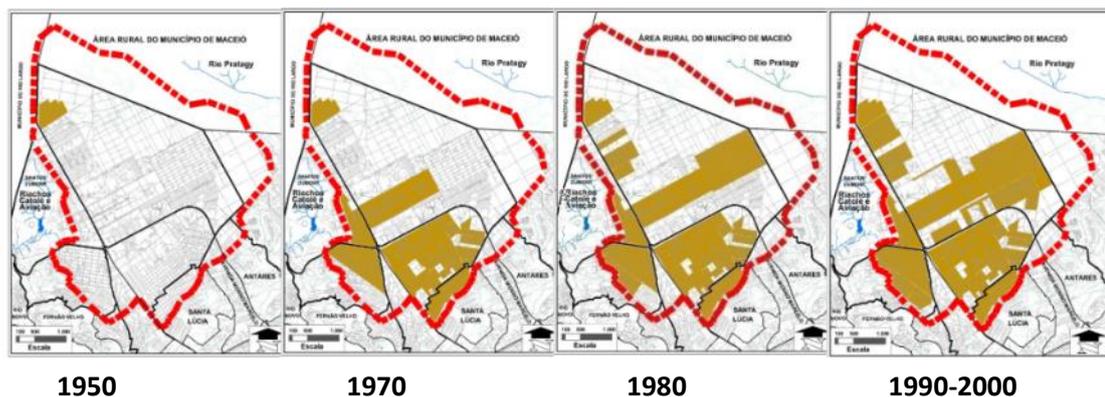
Figura 12 - Evolução da malha urbana da cidade de Maceió-AL



Fonte: adaptação Alencar (2007)

A região do Tabuleiro, em especial a bacia endorreica, tem sofrido nestes últimos anos uma crescente expansão urbana (figura 13). Esse processo de urbanização e o aumento populacional vem afetando significativamente a recarga dos aquíferos locais. Dessa forma, compreender seu processo de urbanização é um meio para entender os impactos causados, sobretudo, o da impermeabilização do solo.

Figura 13 - Evolução da ocupação urbana na área da Bacia Endorreica (1950-1990).



Fonte: adaptação Carvalho e Robalinho (2010).

Salienta-se que as áreas hachuradas mostradas na figura 13 e definidas como áreas urbanas, na realidade não eram totalmente urbanizadas, visto que as edificações não ocupavam toda a área assim delimitada.

Até meados do século XX a ocupação da bacia endorreica era constituída por chácaras e sítios distribuídos em grandes lotes, cuja área edificada, permitia que a vegetação propiciasse um uso compatível com o meio ambiente natural, possibilitando a recarga dos aquíferos da região (CARVALHO *et al.*, 2010).

Na década de 1960 a bacia apresentava pouca, ou praticamente nenhuma expansão urbana, salvo a vila militar da aeronáutica e alguns sítios e chácaras em direção ao aeroporto, fundado em 1928, e na área, onde hoje denomina, “Feirinha do Tabuleiro”. Só foi a partir do início da década de 1970 que a bacia, de fato, teve seu processo de uso e ocupação, até mesmo no que diz respeito às áreas cultivadas pela cultura da cana de açúcar, que teve início praticamente no fim da década de 60. A expansão urbana, ocorrida nesta década (70), foi possibilitada por uma soma de fatores, tais como: a criação e asfaltamento de rodovias, construção de loteamentos e conjuntos habitacionais populares, sedes de instituições públicas, ocorrência de terrenos planos, a presença de água potável (poço), além do rápido e intenso crescimento demográfico de Maceió (SANTOS, 2014).

Porém, foi a partir da implantação da Universidade Federal de Alagoas – UFAL em 1971 e seu Hospital Universitário – HU em 1973 e a criação do Distrito Industrial Luís Cavalcanti – DILC no ano de 1975, que a bacia endorreica, de fato, passou a receber um contingente populacional maior, impulsionado pelo surgimento de algumas redes de serviços e a criação de alguns conjuntos habitacionais⁸ do tipo popular, por exemplo, os conjuntos Salvador Lyra (1976), José Maria de Melo (1977), conjunto Inocoop (1977) e Eustáquio Gomes (1979).

Contudo, foi a partir do final da década de 1970, com a construção da BR-316 (Via expressa), e atual Avenida Menino Marcelo, quando se intensificou o processo de urbanização e ocupação das glebas situadas na bacia endorreica (SANTOS, 2014). Foi somente a partir da década de 1980 que a ocupação da bacia começou a se configurar como hoje se apresenta, com a construção e financiamentos de conjuntos habitacionais, tais como: Village Campestre I (1982), Colina dos Eucaliptos (1983), Graciliano Ramos (1988), Osman Loureiro (1988) e Conjunto Tabuleiro do Martins em 1989. Este último, o primeiro do tipo vertical na área da bacia. Outros que ajudaram a configurar a situação atual de ocupação da bacia foram o conjunto Rosane Collor, localizado no bairro do Clima Bom, criado em 1991 e Conjunto Habitacional Benedito Bentes em 1986, este último, mesmo estando fora dos limites físicos, foi responsável em impulsionar a ocupação da porção leste da bacia.

⁸ Fonte: SMCCU (2012); MEP (2013) apud Santos (2014).

O processo de expansão urbana na área da bacia passou por várias transformações por diferentes razões, fatores e agentes. Atualmente, a bacia abarca a área urbana dos municípios de Maceió e Rio Largo. Em Maceió, compreende alguns bairros da parte alta da capital, tais como, todo o bairro Cidade Universitária e parte dos bairros Santos Dumont, Clima Bom, Tabuleiro do Martins, Santa Lúcia, Antares e Benedito Bentes; e quanto ao município de Rio Largo, uma pequena porção do bairro Aeroporto.

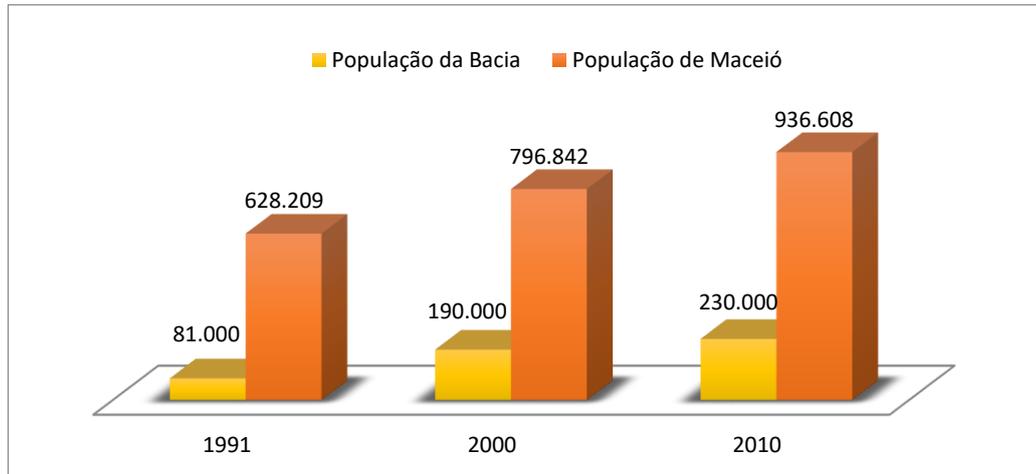
Segundo IBGE⁹ (Censos de 1991, 2000 e 2010), a população inserida na bacia apresentou ao longo do tempo um crescimento gradativo. Em 1991, a bacia contava com uma população aproximada de 81.000 habitantes. Já em 2000, essa população mais do que duplicou, passando a ser de 190.000 habitantes. No censo atual, a população está próxima aos 230.000 habitantes (Censo 2010), um crescimento de quase três vezes, em apenas 30 anos. Porém, essas informações possam estar aquém da realidade atual, pois a área apresenta um constante crescimento urbano e populacional, ao fato de inúmeros empreendimentos habitacionais estarem se inserindo na bacia nestes últimos anos, o que leva a estimar um crescimento em torno de 15% da população.

Ao fazer uma relação entre a população residentes na bacia e o total da população residente na cidade de Maceió nos respectivos censos acima citado, verifica-se um crescimento expressivo em termos relativos. Em 1991, a população da bacia representava 12,90% da população de Maceió, em 2000 praticamente duplicou, passando para 23,84% e no censo de 2010 a população registrava 24,56%. Como podemos observar na figura 14, a população apresentou um crescimento de pouco mais de 28,3% entre os censos de 1991-2010.

Levando-se em conta que o crescimento populacional das últimas décadas se deu de forma expressiva sobre as áreas da bacia, constituindo a principal área de expansão da cidade em termos de localização de atividades, seria natural procurar uma analogia entre o adensamento populacional e as áreas de fato ocupadas. No entanto, foi realizada uma relação entre os dados populacionais dos anos dos censos analisados com os anos dos cenários proposto neste estudo (1988, 2002 e 2013), desta forma procurou relacionar as informações da seguinte forma: 1991 (censo) com 1988 (cenário), 2000 (censo) com 2002 (cenário) e 2010 (censo) com 2013 (cenário), a fim de estimar o mais aproximado a densidade populacional da bacia. Desta forma, foram excluídos da área geral dos cenários, os usos correspondentes ao cultivo da cana.

⁹ Dados obtidos por meio dos setores censitários inseridos no limite da bacia nos respectivos anos (1991, 2000 e 2010). Entretanto, os valores apresentados é uma aproximação, ao fato do limite da bacia corta alguns limites dos setores censitários, impossibilitando estimar o valor exato.

Figura 14 – Evolução populacional na área da bacia nos anos de 1991, 2000 e 2010.



Fonte: IBGE

Assim, obteve-se os seguintes resultados quanto a densidade demográfica da bacia: no ano de 1991 apresentou uma densidade de 2.658 pessoas por quilometro quadrado (km²); para o ano de 2000, o valor aumentou sensivelmente, apresentando uma densidade de 6.101 pessoas por km² e por fim, para o ano de 2013 foi obtido um valor de 6.506 pessoas por km².

Esses resultados demonstram a consolidação cada vez maior da ocupação urbana e populacional na área da bacia. Prevalece, ainda, a presença de conjuntos habitacionais populares horizontais, com lotes de pequenas dimensões. Esse tipo de crescimento urbano põe em risco aqueles vazios remanescentes, além de acarretar desmembramentos, aumentando a taxa de impermeabilização do solo e trazendo implicações à recarga dos aquíferos no local.

4.5 Uso e ocupação do solo

Atividades econômicas e sociais realizadas ocasionam mudanças na morfologia dos processos dos sistemas ambientais. As repercussões das atividades incidem nas modificações da superfície terrestre, com processos ocorrendo em ritmos variados. A questão do uso e cobertura do solo mostra-se amplamente relevante, uma vez que o conhecimento de como se deu o processo, a forma, padrão e o período de ocupação fornece indicativos das origens dos problemas observados numa determinada área. Estas informações podem esclarecer questões e indicar caminhos para melhor ordenação territorial, bem como, para a preservação e conservação dos recursos naturais.

Os usos e ocupação na bacia endorreica do Tabuleiro dos Martins existentes foram obtidos através da metodologia descrita no item 3.3.2.3 e suas classes definidas conforme o quadro 3. Foi estabelecida a evolução dos usos e ocupações dos seguintes anos, os de 1988,

2002 e 2013, visando a determinação da sua dinâmica histórica. A distribuição espacial dos valores de uso do solo é apresentada na tabela 1 e ilustrada nas figuras 15, 16, 17.

Tabela 2 – Uso e cobertura do solo na área da bacia endorreica nos anos de 1988,2002 e 2013

Classes de Uso e Cobertura	Ano					
	1988		2002		2013	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Zonas florestais e vegetação densa	8,3	0,18	7,6	0,17	14,13	0,31
Campo e áreas verdes	3.433,12	75,02	2.548,26	55,69	2.048,20	44,76
Edificações muito densas	141,57	3,09	486,22	10,62	777,48	16,99
Edificações não muito densas	168,39	3,68	649,34	14,19	683,28	14,93
Edif. com superfícies livres	178,18	3,89	17,17	0,38	65,02	1,42
Edif. com muitas superfícies livres	189,62	4,14	208,57	4,56	193,25	4,22
Zonas industriais e comerciais	173,38	3,79	224,83	4,91	326,69	7,14
Ruas e vias asfaltadas	58,99	1,29	80,11	1,75	225,64	4,93
Ruas e vias em paralelepípedos	16,65	0,36	45,23	0,99	84,68	1,85
Rua e vias de Terra	204,14	4,46	265,31	5,80	133,09	2,91
Corpos d'água	3,85	0,08	43,55	0,95	24,73	0,54
Total	4.576,19	100,00	4.576,19	100,00	4.576,19	100,00

Como podemos observar na tabela 2 e na figura 15 as classes de uso e cobertura no ano de 1988, mais da metade de sua área era representada pela classe *Campo e áreas verdes*, um total de 75,02%, fato este explicado pela grande extensão de áreas ocupadas pelo cultivo da cana de açúcar, além de inúmeros terrenos não ocupados (terrenos baldios). As áreas edificadas recobriam 14,81% de sua área, sendo representada na sua maioria como classe de *Edificações com muitas superfícies livres*. As *Zonas industriais* perfaziam apenas 3,79%; as áreas das *Ruas e vias asfaltadas* eram demasiadamente pequenas, representando apenas 1,29% comparada com a classe de *Ruas e vias de terra* (não calçada) que totalizava, na época, 4,46%, um valor significativo, em relação as áreas das classes do tipo vias, representando 73% do total das vias (ruas, avenidas...) no ano de 1988, época em que processo de urbanização começa a se firmar na área, onde as únicas e poucas avenidas asfaltadas se concentravam na área do distrito industrial e nas principais avenidas e rodovias (Durval de Góes Monteiro, BR-104 e BR-316).

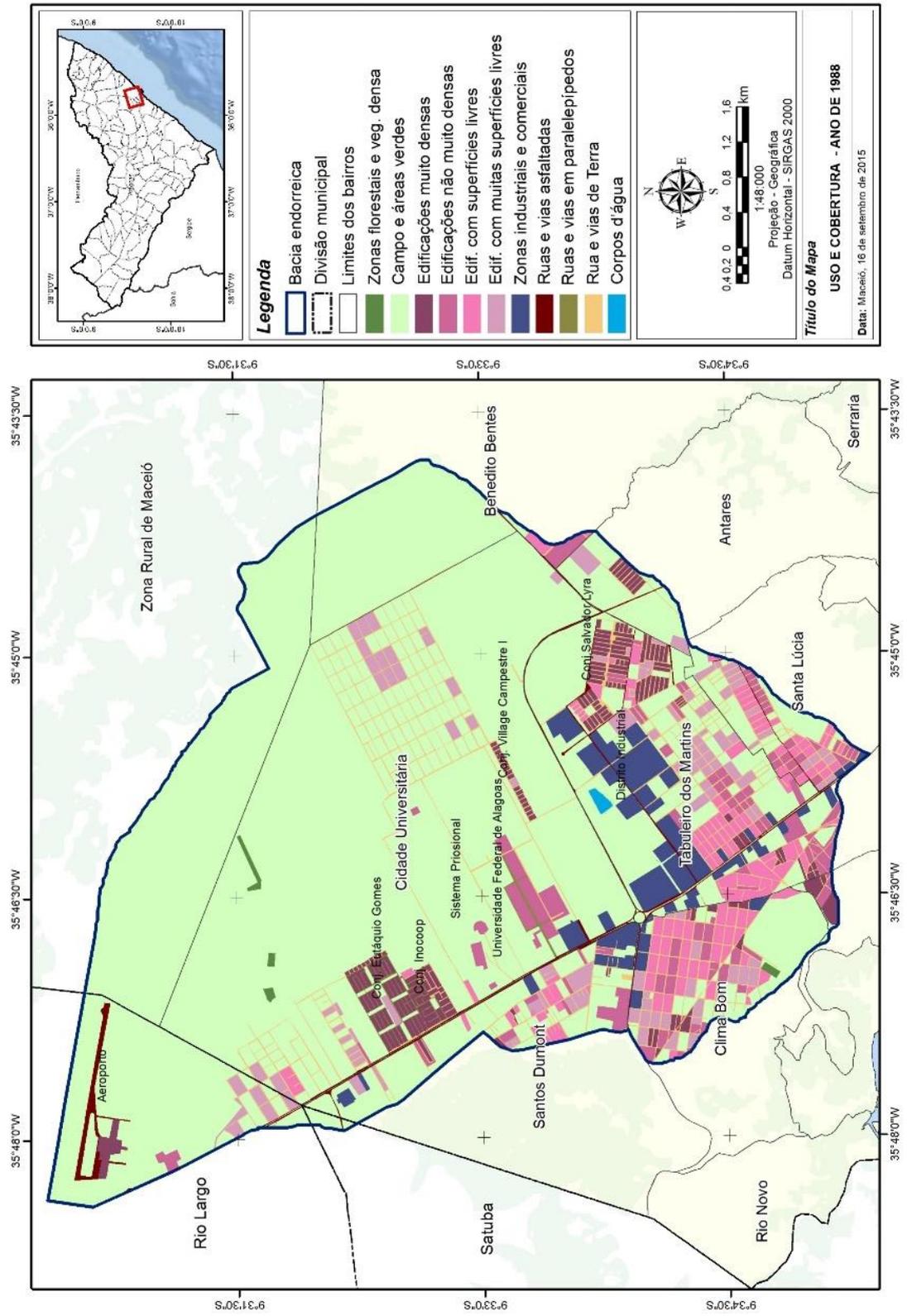
Quatorze anos após, em 2002, os dados da tabela 2 e da figura 16 mostram que, classe *Campo e áreas verdes* ainda representava mais da metade da área da bacia, um total de 55,69%, representada na grande maioria pelo cultivo da cana de açúcar; os terrenos baldios começam a ser ocupados, explicando a diminuição em comparação com o ano de 1988. As áreas edificadas

apresentam um crescimento significativo 29,75%, antes (1988) enquanto a classe *Edificações com muitas superfícies livres* representava a maior parte das edificações, no ano de 2002 a classe *Edificações não muito densas* foi a que apresentou maior percentual 14,19% (649,34 hectares), com ampliações de áreas impermeáveis nos terrenos antes na sua maioria com cobertura permeável.

Outo dado que chama atenção é o contínuo crescimento da classe *Edificações com muitas superfícies livres*, passando de 189,62 hectares em 1988 para 208,57 em 2002, fato explicado pelo crescimento de novas residências na área do Conjunto Village Campestre II. Nas *Zonas industriais* houve uma pequena expansão de 3,79% para 4,91%. As áreas das *Ruas e vias asfaltadas* ainda continuam demasiadamente pequenas comparadas com as áreas das *Ruas e vias de terra* (não calçada), 5,80%, o que apresentou um crescimento de mais de 23% quando comparada com os dados de 1988. Este fato pode ser explicado pelo aumento da urbanização em algumas localidades como o Clima Bom, Santos Dumont e Village Campestre.

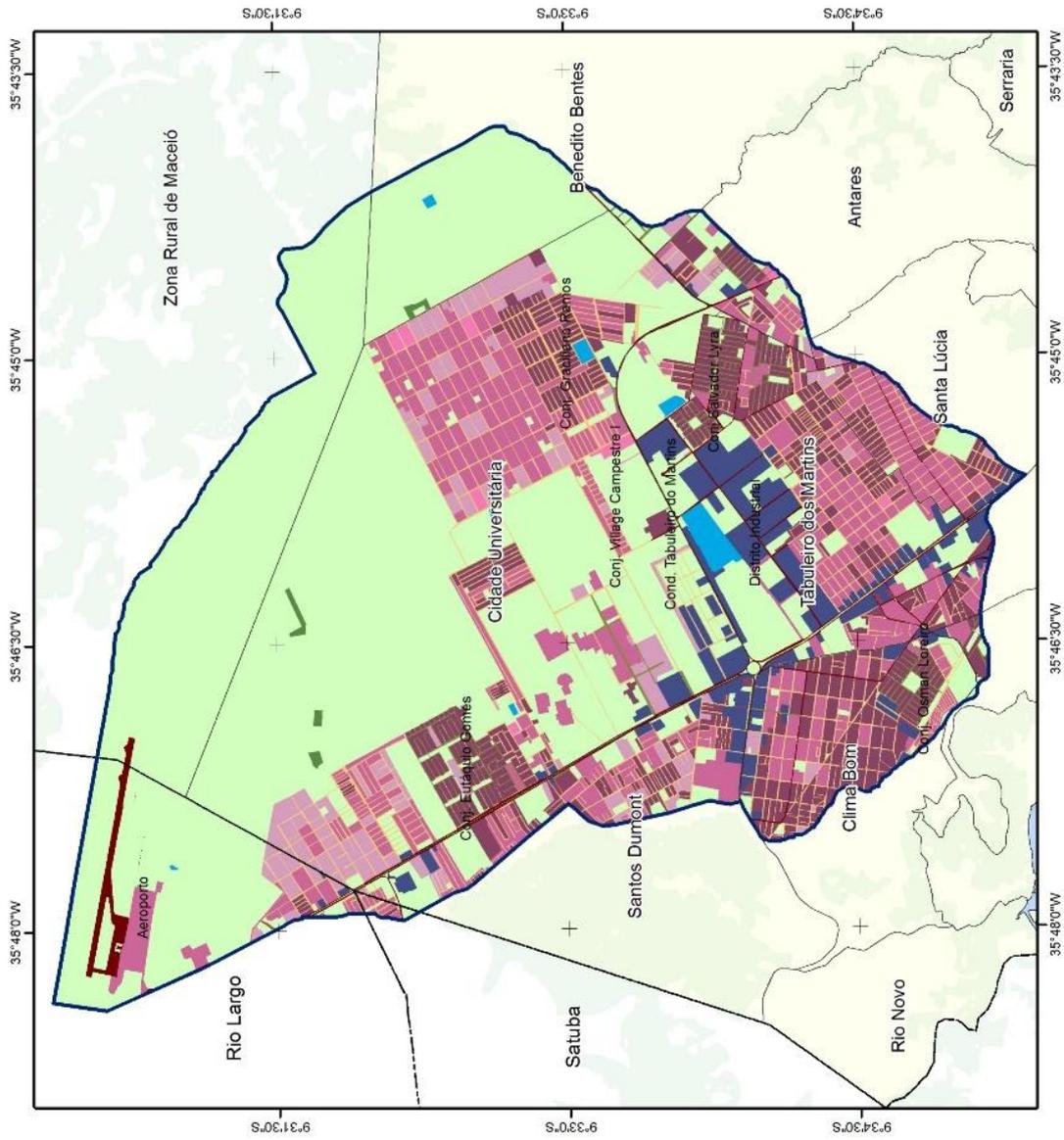
Em 2013, decorridos onze anos em relação ao cenário anterior, verifica-se através da tabela 2 e da figura 17 que, as áreas das *Zonas florestais e vegetação densa* apresentaram um significativo crescimento de 14,13 hectares (0,31%), atribuído pela regeneração de vegetação em alguns terrenos e pela criação do Arboretum da UFAL. A classe *Campo e áreas verdes*, após duas décadas apresentou, enfim, uma diminuição em seu percentual 44,76%, decorrente do aumento do processo de urbanização na área da bacia, como a construção de novos empreendimentos e novos conjuntos habitacionais implantados pelo Programa Minha Casa Minha Vida, localizados principalmente nos bairros do Benedito Bentes e Cidade Universitária (Eustáquio Gomes). O que representou um aumento nas áreas edificadas, principalmente, na classe *Edificações muito densas*, que até o momento não apresentava um expressivo valor na área, passando de 141,57 hectares (3,09%) em 1988 para 777,48 hectares (16,99%) em 2013.

Figura 15– Uso e cobertura do solo da bacia endorreica no ano de 1988.



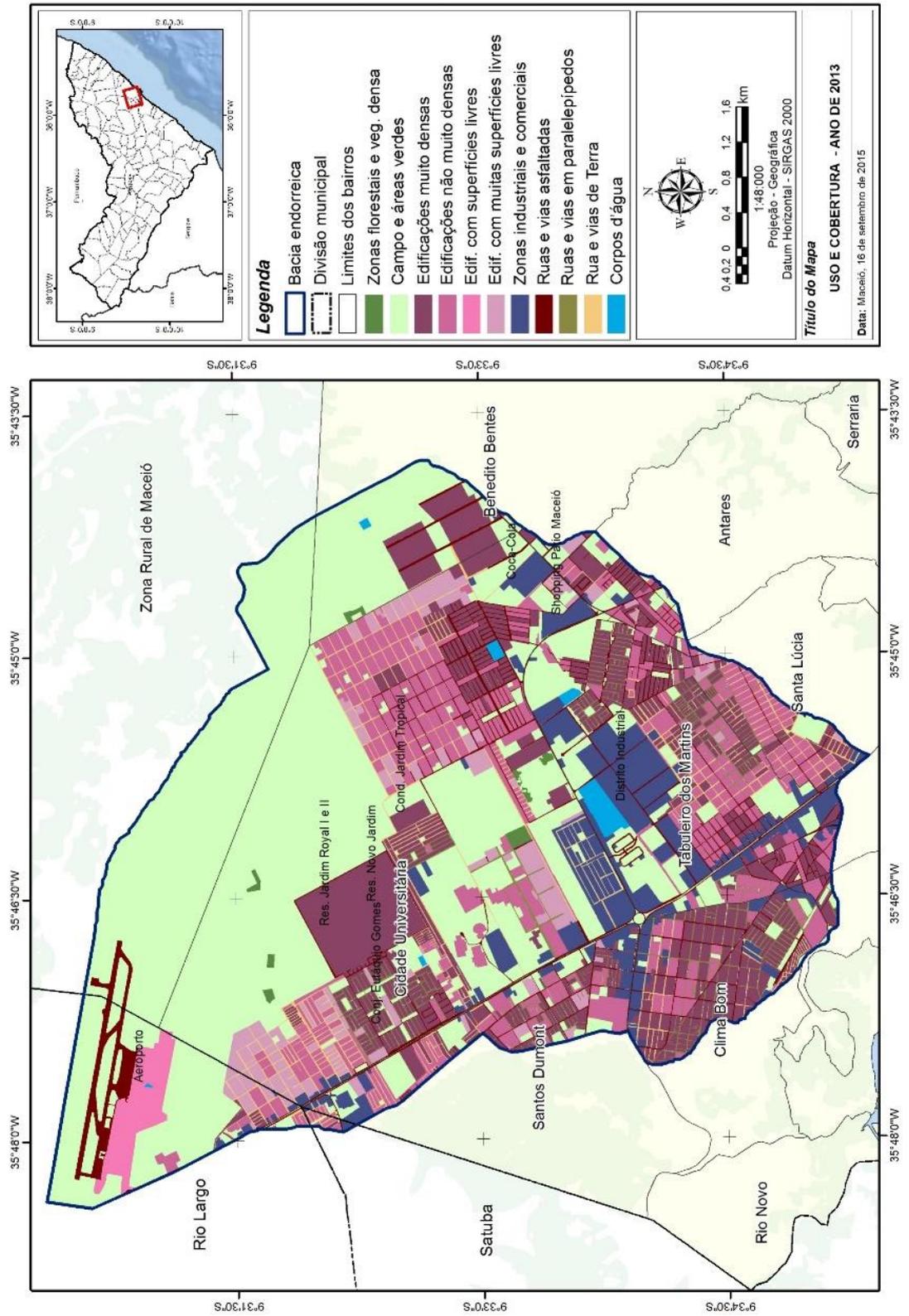
Fonte: Autor (2016)

Figura 16 – Uso e cobertura do solo da bacia endorreica no ano de 2002



Fonte: Autor (2016)

Figura 17 – Uso e cobertura do solo da bacia endorreica no ano de 2013.



Fonte: Autor (2016)

Outra classe ligada as áreas edificadas, *Edificações com superfícies livres*, apresentou um crescimento de 17,17 hectares em 2002 para 65,02 ha em 2013, devido a ampliação do Aeroporto Zumbi dos Palmares, ao norte da bacia. As *Zonas industriais* apresentaram uma significativa expansão de 4,91% para 7,14% em consequência da implantação de novas indústrias e comércios atacadistas no centro da bacia. As áreas das *Ruas e Vias Asfaltadas*, enfim, apresenta um expressivo aumento de 1,75% (2002) para 4,93% (2013), em consequência da criação de novas vias e o asfaltamento das áreas das *Ruas e vias de terra* (não calçada), que passaram de 5,80 % em 2002 para 2,91% em 2013.

Um meio para entendermos o processo de alteração na área da bacia e os respectivos valores das classes aqui analisadas, é comparando-as por períodos. Por meio da tabela 2 pode-se verificar as retrações e expansões nos períodos que vão de 1988-2002 e 2002-2013. Em síntese, os dados apresentados representam um balanço do uso e ocupação das terras da bacia.

Tabela 3 - Expansão e retração das classes de usos e cobertura do solo nos períodos: 1988-2002 e 2002-2013.

Classes de Uso e Cobertura	Ano			
	1988 – 2002		2002 - 2013	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Zonas florestais e vegetação densa	-0,7	-8,43	6,53	85,92
Campo e áreas verdes	884,86	25,77	-500,06	-24,41
Edificações muito densas	344,65	343,44	291,26	59,90
Edificações não muito densas	480,95	385,62	33,94	5,23
Edif. com superfícies livres	-161,01	-1.037,74	47,85	278,68
Edif. com muitas superfícies livres	18,95	9,99	-15,32	-7,92
Zonas industriais e comerciais	51,45	29,67	101,86	45,31
Ruas e vias asfaltadas	21,12	35,80	145,53	181,66
Ruas e vias em paralelepípedos	28,58	171,65	39,45	87,22
Ruas e vias de Terra	61,17	29,96	-132,22	-99,35

Quando avaliada a diferença do percentual de áreas em cada classe nos períodos analisados, conforme tabela 3, nota-se que a classe *Edificações não muito densas* no período de 1988-2002 foi que apresentou a maior expansão (crescimento) com 385,62%, seguida da classe *Edificações muito densa*, no mesmo período, com 343,44% e a classe *Edificações com superfícies livres* no período de 2002-2013 com 278,68%. Dessa forma, pode-se afirmar que a temática, quanto às classes analisadas, que maior apresentou crescimento expressivo foi relacionada às *Edificações*.

Em igual medida, mas no sentido contrário, o uso que apresentou maior percentual de retração, foi a classe *Edificações com superfícies livres* no período de 1988-2002 com um decréscimo de -1.037,74%, seguida das classes *Campos e áreas verdes* e *Ruas e vias de Terra*, com valores relativos de -24,41% e 99,35% respectivamente, ambas no período que compreende de 2002-2013. Verifica-se que os resultados, quanto aos maiores valores, de expansão e retração, mostram que a urbanização por meio da concentração das edificações, e conseqüentemente, o aumento das áreas impermeáveis, vem diminuindo a quantidade de áreas verdes e espaços livres permeáveis, diminuindo desta forma áreas locais que possibilitariam a retenção pluviométrica e contribuindo para o aumento do escoamento superficial e diminuição da recarga do aquífero.

4.6 Áreas Impermeáveis

A bacia em estudo teve seu início de ocupação por conjuntos habitacionais a partir de 1970 e encontra-se ainda em evolução, apresentando alguns terrenos desprovidos de construções e áreas ocupadas pelo cultivo da cana de açúcar. De 1970 a 2013 a bacia endorreica do Tabuleiro do Martins teve sua área impermeabilizada triplicada. Com a instalação de empreendimentos habitacionais, comerciais e industriais, na bacia, aumentou o processo de impermeabilização do solo e, obviamente, diminuiu a infiltração natural da região o que prejudicou a percolação das águas pluviais, gerando alagamentos nas vias principais (SANTOS, 2014).

De acordo com Guerra (2005), as alterações hidrológicas na bacia hidrográfica são ampliadas após a construção da cidade, onde as superfícies impermeáveis diminuem a capacidade de infiltração do solo e resultam em um grande aumento no volume do escoamento superficial. Bastos (2009), ressalta que o processo de urbanização intervém no sistema de drenagem natural das águas à medida que interfere no meio através de aterramentos, impermeabilização do solo e execução de obra artificiais de drenagem.

Essa problemática vem ocorrendo há vários anos, desde o início da ocupação, e principalmente após a implantação do Distrito Industrial Governador Luiz Cavalcante (DILC) em 1975, na área de menor cota altimétrica na bacia, ocasionando vários problemas devidos aos intensos alagamentos nos períodos com maiores índices pluviométricos, como nos anos de 1975, 1989, 2004 e 2009, quando a lâmina d'água chegou a atingir mais de um metro de altura em alguns pontos (SANTOS, 2014).

Caso como este da bacia, com características de drenagem confinada, onde as águas das precipitações tendem a dirigir para depressões naturais do terreno, a função natural do balanço hídrico foi prejudicada a partir da ocupação, e o processo de impermeabilização que esta conduz, afetando dessa forma o escoamento natural e a falta de infiltração, e conseqüentemente, a falta de contribuição da água nos aquíferos.

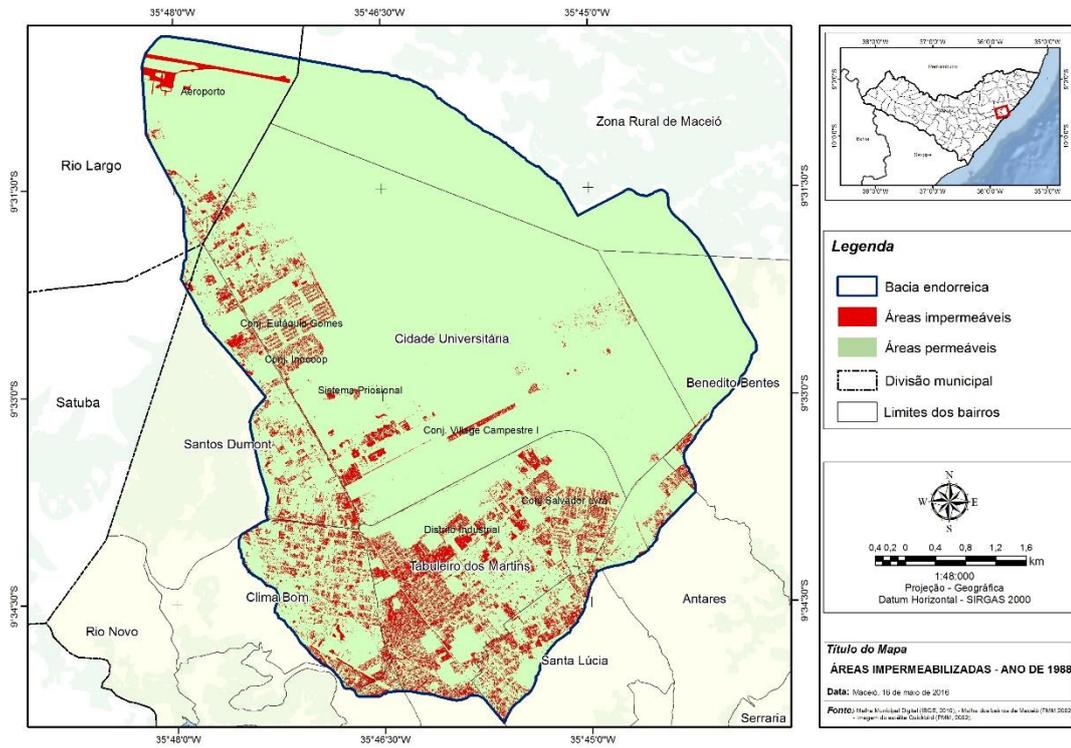
Assim, os índices de impermeabilização da bacia endorreica foram determinados levando-se em consideração as áreas construídas, edificações e a pavimentação de ruas e calçadas, verificadas ao longo dos anos analisados, cuja ocupação física ocorreu preferencialmente nas áreas com altitudes mais baixas, ou seja, nas áreas com os maiores riscos de alagamentos.

Para facilitar o entendimento da evolução, os resultados são representados segundo duas classes: área impermeabilizada e área permeável, como descritas nos procedimentos metodológicos no item 3.3.2.6.

No ano de 1988, a área impermeabilizada da bacia compreendia apenas residências e algumas poucas indústrias localizadas no Distrito Industrial, totalizando 4,85 km² (figura 18). Nesse período, a área impermeabilizada começa a expandir-se em direção ao aeroporto, com a construção de alguns conjuntos habitacionais. No entanto, mesmo com uma significativa área ocupada por residências, as áreas permeáveis ainda eram altas, ao fato das vias não serem calçadas ou asfaltadas, salvo as principais avenidas. Salienta-se também que a maior parte da área permeável era ocupada pelo plantio da cana de açúcar.

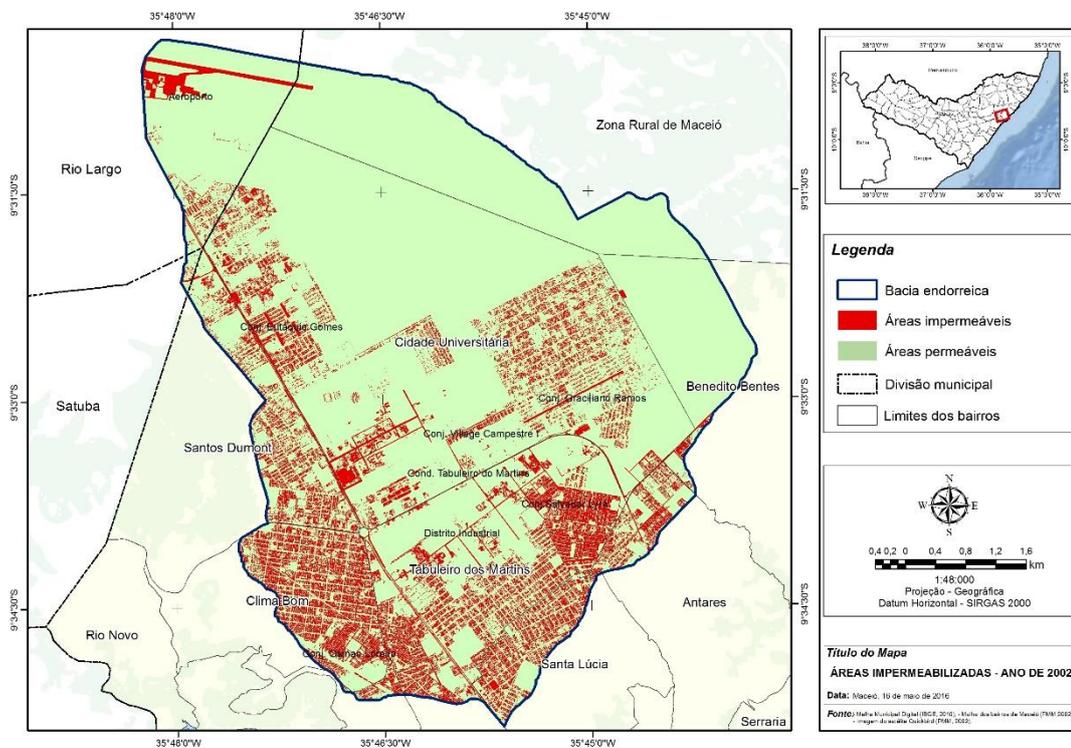
No ano de 2002, observa-se um grande aumento da área impermeabilizada devido à construção de novos loteamentos e edificações nos bairros Cidade Universitária, Clima Bom e Santos Dumont. As antigas áreas ocupadas, no bairro do Tabuleiro do Martins, intensificaram-se, aumentando as áreas impermeabilizadas com o calçamento e asfaltamento das vias (figura 19), totalizando 13,2 km². De 1988 a 2002 todos os bairros apresentaram um aumento da urbanização e novas indústrias foram instaladas no distrito industrial.

Figura 18 - Áreas impermeabilizadas na bacia endorreica nos ano de 1988.



Fonte: Autor (2016)

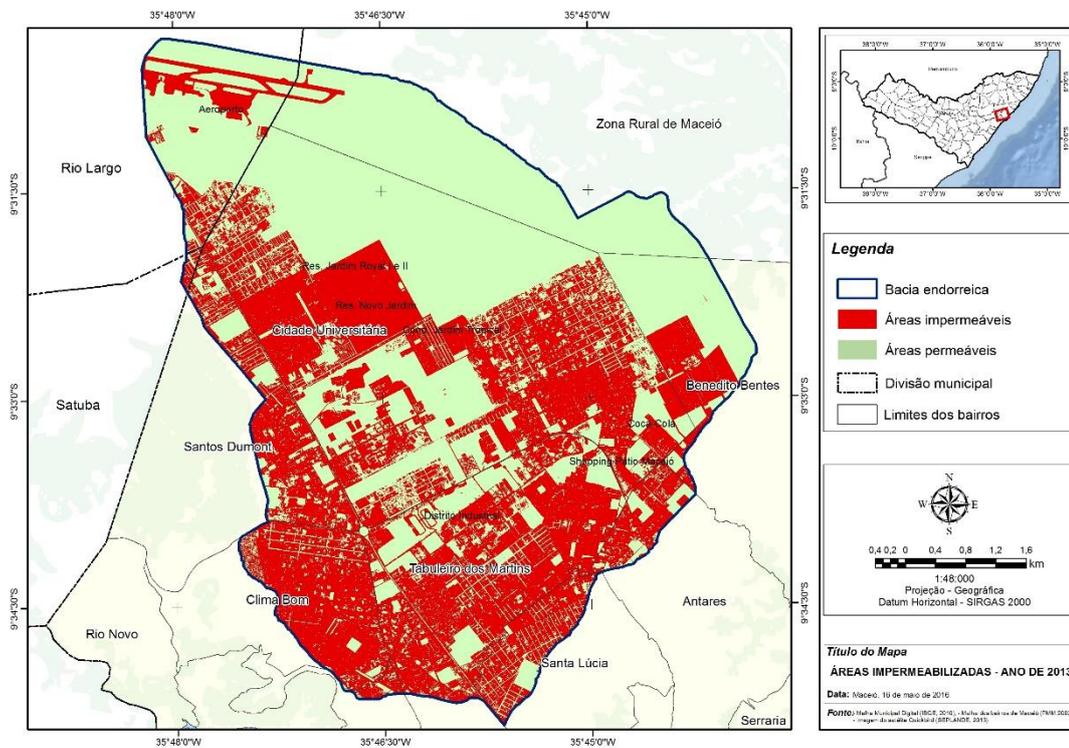
Figura 19- Áreas impermeabilizadas na bacia endorreica no ano de 2002



Fonte: Autor (2016)

Em 2013, as áreas ocupadas pela urbanização são similares ao ano de 2002, permanecendo praticamente a mesma configuração (Figura 20), salvo alguns novos condomínios e loteamentos nos bairros Cidade Universitária e Benedito Bentes. Porém, mesmo não apresentando uma expansão urbana significativa, observa-se o adensamento das áreas impermeáveis, devido ao asfaltamento das vias públicas, calçamento dos quintais e calçadas das moradias e, ocupação das áreas verdes. As áreas de plantio de cana de açúcar passam a ser substituídas por novos loteamentos. Este adensamento foi responsável pelo aumento da área impermeável, totalizando 20,30 km², o que corresponde aproximadamente a 44% da área da bacia.

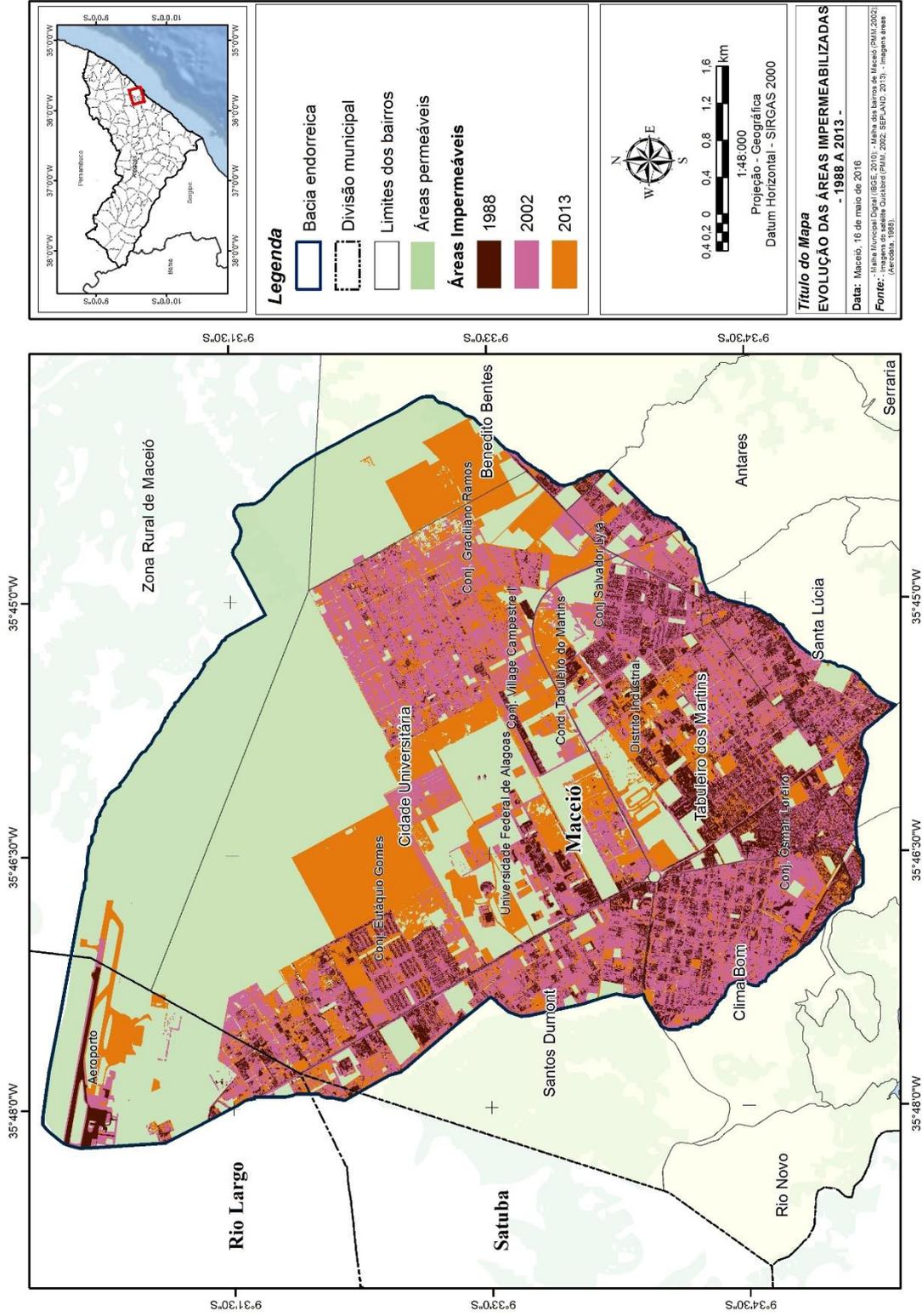
Figura 20 - Áreas impermeabilizadas na bacia endorreica nos ano de 2013



Fonte: Autor (2016)

Pelo exposto, pode-se inferir que a impermeabilização do solo, pela ocupação urbana, reduziu a área de infiltração, o que pode ampliar o volume de escoamento superficial, provocando o aumento da frequência e da magnitude dos problemas de inundação, durante os períodos chuvosos. Neste contexto, a figura 21 exhibe a evolução das áreas impermeabilizadas na extensão da bacia endorreica, revelando suas direções principais e padrões.

Figura 21 - Evolução das áreas impermeáveis da bacia Endorreica do Tabuleiro do Martins



Fonte: Autor (2016)

Dessa forma, o processo de impermeabilização fez com que as águas das chuvas fossem impedidas de se infiltrarem no solo. Conforme estudo do impacto da urbanização na década de 90, sobre as águas subterrâneas na região, estimou em 30% do total precipitado a taxa média de infiltração (CAVALCANTE, 1992). O escoamento superficial da área de estudo direcionava as águas para as depressões naturais, de onde parte evaporava e parte infiltrava no solo, recarregando os sistemas aquíferos. A região apresentava significativa taxa de infiltração. As imagens do ano de 1988 mostram uma correlação com estas informações, pois a bacia apresentava uma pequena área impermeável, quando comparada aos anos posteriores (2002 e 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta, para avaliação dos impactos da urbanização no comportamento hidrológico da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins em três cenários escolhidos.

Na primeira etapa foi analisado o comportamento do escoamento superficial quanto às alterações dos usos e coberturas superficiais nos valores *CN*, coeficiente de infiltração e coeficiente de escoamento. Na sequência, foram avaliados os resultados obtidos no comportamento hidrológico quanto ao tempo de concentração e vazão de pico. Por fim, foi aplicado o modelo de capacidade de armazenamento com a finalidade de verificar o desempenho, no decorrer dos anos, da capacidade de infiltração e do armazenamento na bacia; e, ainda, é apresentado um cenário futuro quanto às modificações encontradas.

A segunda e a terceira etapas dissertam por meio dos resultados obtidos dos modelos aplicados na primeira etapa, os impactos e os efeitos na drenagem e recarga dos aquíferos na bacia endorreica.

5.1 Análise hidrológica dos diferentes cenários de ocupação

A análise foi conduzida a partir da estimativa do impacto da urbanização sobre o escoamento superficial, nas mesmas condições meteorológicas. Por meio da metodologia SCS-*CN*, foram gerados resultados quanto a evolução dos valores *CN* relativos aos usos e ocupações e as respostas destas alterações no comportamento dos Coeficientes de Infiltração (*S*) e Escoamento Superficial (*C*), e conseqüentemente no desempenho hidrológico do Tempo de Concentração (*T_c*) e na Vazão de Pico.

A abordagem partiu da premissa que as modificações ocorridas quanto aos tipos de cobertura superficial, vem modificando a capacidade hidrológica da bacia, em particular, na capacidade de infiltração que alteram o regime de vazão do escoamento superficial, que por consequência, ficam no reflexo negativo dos impactos de ordem socioeconômicas e ambientais. Portanto, os resultados apresentados, mostram como ocorreu no tempo e no espaço, através as alterações dos usos do solo, os seus efeitos no comportamento hidrológico nos cenários propostos de 1988, 2002 e 2013.

Considerando os resultados obtidos nos referidos cenários, o estudo permitiu simular um cenário futuro dos efeitos dos usos da terra, na necessidade de se proporcionar informações

que alicersem o processo de planejamento das intervenções futuras por meio da avaliação e controle dos impactos que poderá vir a ocorrer.

5.1.1 Escoamento superficial da bacia

5.1.1.1 Curva Número (CN)

Por meio da metodologia descrita no item 3.6.1.3, foi obtido os valores *CN* correspondentes às coberturas superficiais da bacia endorreica para os cenários analisados (1988, 2002 e 2013). Segundo a metodologia do SCS, o *CN* é a principal variável para estimativa da chuva excedente, tornando-o um dos principais parâmetros para compreender o sistema hidrológico de uma bacia. Desta forma, através do SGI, possibilitou que a análise dos mapas de uso e ocupação contemplasse, ao mesmo tempo, características quantitativas e qualitativas, na determinação de valores de *CN*, correspondente ao grupo hidrológico do solo e às condições de umidade antecedente do tipo II. Para cada grupo de uso de solo encontrado, foi estabelecido um valor de *CN*.

Assim, a tabela 4 ilustra os valores de *CN* calculados para cada tipo de cobertura superficial do terreno, grupo hidrológico de solos e condição II de umidade antecedente na bacia endorreica do Tabuleiro do Martins.

Tabela 4 – valores de CN em relação ao uso e cobertura do solo.

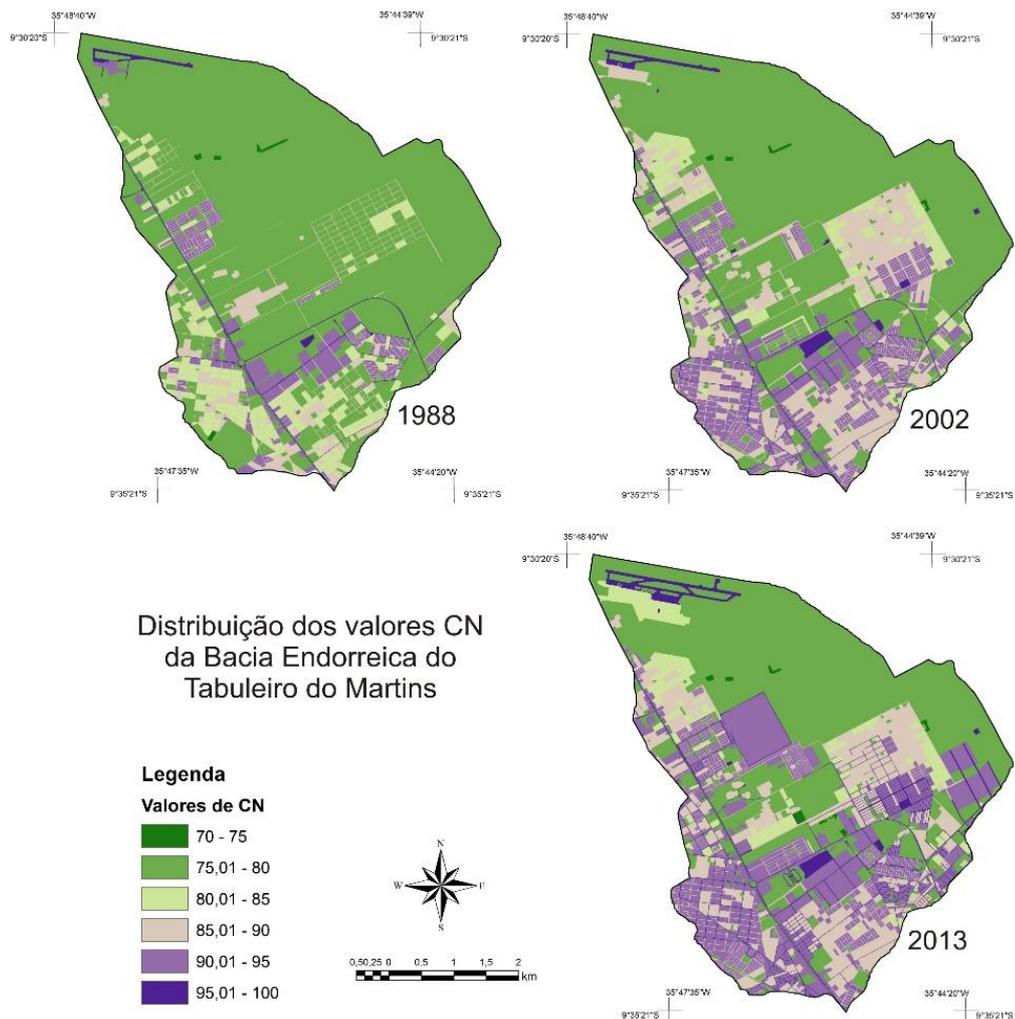
Uso e cobertura do solo	Valor de CN
Zonas florestais e vegetação densa: Área com vegetação de porte arbóreo natural ou reflorestadas em boas condições.	70
Campo e áreas verdes: Parques, praças, campos de esportes, áreas cultivadas, áreas com gramados e terrenos desnudos.	78
Edificações muito densas: Zonas residenciais uma cidade, com cerca de 85% de taxa de impermeabilização dos solos.	94
Edificações não muito densas: Zonas residenciais, com cerca de 65% de taxa de impermeabilização dos solos.	90
Edificações com superfícies livres: Zonas residenciais, com cerca de 38% de taxa de impermeabilização dos solos.	83
Edificações com muitas superfícies livres: Zonas residenciais com construções esparsas, com cerca de 30% de taxa de impermeabilização dos solos.	81
Zonas industriais e comerciais: Áreas industriais e barracões de comércio, com cerca de 72% de taxa de impermeabilização dos solos.	91
Ruas e vias asfaltadas.	98
Ruas e vias em paralelepípedos.	89
Rua e vias de Terra.	87

Fonte: Adaptação Tucci (2007) e Nunes (2007).

A partir da descrição feita no item 4.5, através da análise interpretativa da tabela 1 e das Figuras 15, 16 e 17, quanto ao uso e cobertura do solo da bacia, foi possível observar o aumento nas tipologias edificações na cobertura superficial, conseqüentemente, o aumento das áreas impermeabilizadas (Figuras 18, 19 e 20), acarretando modificações notáveis no aumento dos valores de *CN*, comprometendo o comportamento hidrológico da bacia, quanto à capacidade de infiltração e ao aumento do escoamento superficial, sendo mais notadamente o efeito desses aumentos o desempenho da drenagem local.

A Figura 22 apresenta as alterações dos *CNs* da bacia para cada um dos cenários estudados. Observa-se que a faixa de valor que apresentou maior alteração foi entre 90-100 no valor do *CN*, um crescimento em torno de 371,19% entre os anos 1998-2013. Reflexo da alteração da cobertura do solo, o que promoveu o aumento da impermeabilização, e conseqüentemente na elevação dos valores de *CN* da bacia no respectivos anos.

Figura 22 – Mapas com os valores de *CN* nos respectivos cenários analisados.



Fonte: Autor (2016)

O incremento dos valores do *CN* com a evolução da ocupação urbana já era esperado, pois, sendo seu valor a relação do tipo de solo e do uso e ocupação do solo, e quanto maior for o grau de impermeabilização das áreas, também maiores serão os valores *CN* e, conseqüentemente, maiores os volumes de escoamento superficial direto esperados para uma determinada chuva. A importância da análise desses incrementos dá-se à medida que possibilita a avaliação direta da evolução da expansão urbana e seus efeitos sobre o sistema hidrológico.

Dessa forma, para o entendimento do processo de urbanização de uma bacia, tanto a taxa de expansão quanto sua porcentagem de impermeabilização são alguns dos fatores que buscam relacionar com os problemas hidrológicos. Nesse entendimento, a partir da média ponderada dos diversos *CN*, a pesquisa busca entender, de forma síntese, a influência hidrológica do solo com sua cobertura superficial para cada cenário por meio do *CN* médio. Fundamentado nas informações apresentadas na tabela 3, quanto aos valores de *CN* em relação ao uso e cobertura do solo, o *CN* médio da bacia foi calculado através da ponderação pela área de cada *CN* e tipo de uso por meio da Equação 16.

$$CN = \frac{\sum CN_i \cdot A_i}{A} \quad (16)$$

Onde *CN* corresponde ao *CN* médio da bacia; CN_i corresponde o *CN* de cada tipologia de uso e cobertura do solo associada ao grupo hidrológico do solo; A_i a parcela da bacia que apresenta o CN_i ; *A* refere-se a área total da bacia.

A partir da descrição do uso e ocupação do solo chegou-se ao resultado sobre o *CN* médio, utilizando médias ponderadas para cada cenário, onde foram obtidos os seguintes valores: 80,40 (ano de 1988), 83,29 (ano de 2002) e 85,14 (ano de 2013), um crescimento de 5,90%. Pode-se parecer pouco este valor para um intervalo de 25 anos, onde foram registradas diversas alterações quanto ao uso e cobertura. Porém, ao relacionar com o percentual de impermeabilização no mesmo espaço temporal, verifica-se que áreas impermeabilizadas cresceram em torno de 418% (item 4.5). O que nos leva a entender, que mesmo aparentemente, o valor sendo pequeno na taxa de alteração no valor médio do *CN*, não podemos relacionar esta taxa, com os problemas hidrológicos, sem levar em conta a real noção de alteração de uma bacia por meio da identificação e quantificação das áreas impermeáveis.

5.1.1.2 Coeficiente de infiltração (S)

A capacidade potencial de infiltração é uma expressão hidrológica do solo referente a penetração da água no seu perfil, que dentre outros fatores, é dependente da textura. Coelho Neto (1998) ressalta que outros fatores como as características das chuvas, as condições de cobertura dos solos, a estrutura e umidade antecedente, afetam o processo de infiltração. Porém, o uso e cobertura existente na superficial é que, de fato, vai favorecer ou não o processo de infiltração.

A fim de relacionar os tipos de uso e ocupação na bacia e seus impactos na capacidade de infiltração, foi obtido por meio da equação (5), descrita no item 3.6.1.4, os valores do parâmetro “S”, coeficiente de infiltração, adequado às coberturas superficiais dos anos de 1988, 2002 e 2013, e seus respectivos valores CN tabelados. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5.

Dessa forma, foi determinado o Coeficiente de Infiltração, assentados em 5 classes, quanto à capacidade: Muito Alto, Alto, Médio, Baixo e Muito Baixo, e os respectivos valores em milímetros (mm) do nível de infiltração. A distribuição espacial dos valores de uso do solo está ilustrada nas figuras 23, 24, 25.

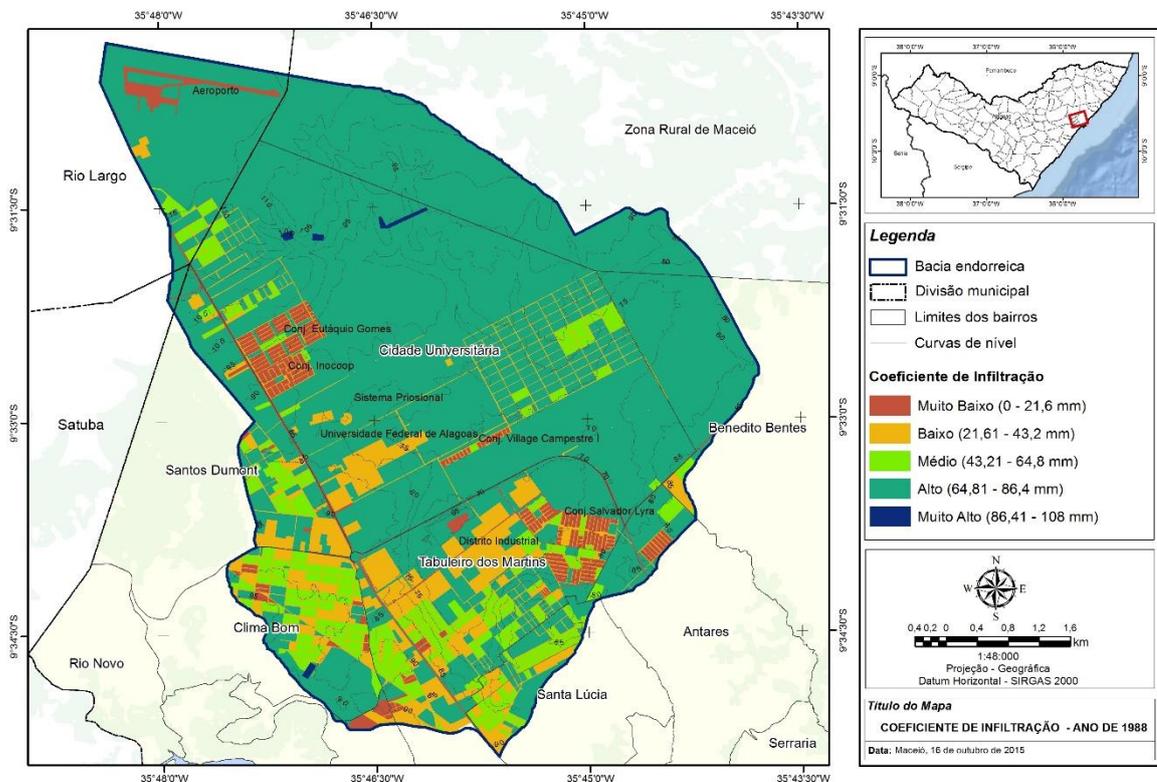
Tabela 5 – Valores de S em relação aos valores CN

Uso e cobertura do solo	Valor de S (mm)
Zonas florestais e vegetação densa: Área com vegetação de porte arbóreo natural ou reflorestadas em boas condições.	108,86
Campo e áreas verdes: Parques, praças, campos de esportes, áreas cultivadas, áreas com gramados e terrenos desnudos.	71,64
Edificações muito densas: Zonas residenciais uma cidade, com cerca de 85% de taxa de impermeabilização dos solos.	16,21
Edificações não muito densas: Zonas residenciais, com cerca de 65% de taxa de impermeabilização dos solos.	28,22
Edificações com superfícies livres: Zonas residenciais, com cerca de 38% de taxa de impermeabilização dos solos.	52,02
Edificações com muitas superfícies livres: Zonas residenciais com construções esparsas, com cerca de 30% de taxa de impermeabilização dos solos.	59,58
Zonas industriais e comerciais: Áreas industriais e barracões de comércio, com cerca de 72% de taxa de impermeabilização dos solos.	25,12
Ruas e vias asfaltadas.	5,18
Ruas e vias em paralelepípedos.	31,39
Rua e vias de Terra.	37,95

As mudanças nas coberturas superficiais no decorrer dos anos analisados, foram sem dúvida, o principal fator pela diminuição dos índices de infiltração na área da bacia. Como se pode observar comparando os mapas, analisando-os e quantificando os respectivos índices, verifica-se que os índices *Muito Alto* e *Alto* somados, são os que apresentam as maiores áreas, com exceção do ano de 2013, perfazendo um valor relativo de 75,67%, 56,04% e 45,25% para os respectivos anos de 1988, 2002 e 2013. Porém, são os que apresentam a maior retração no valor de área entre todos os outros índices, correspondendo a uma diminuição de 1.401,33 hectares (-59,51%).

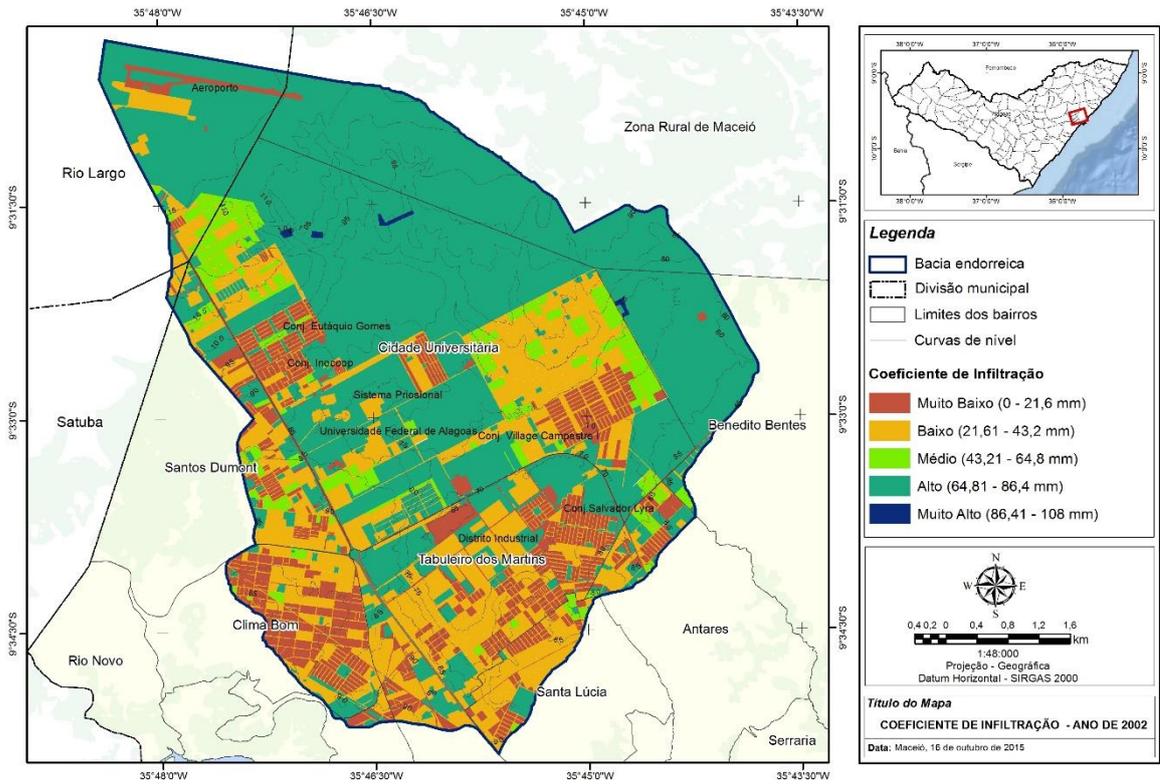
No sentido contrário, quanto a quantificação, mas no sentido lógico, enquanto dinâmica das mudanças de uso e ocupação verificadas no item 4.5, observamos que enquanto diminui as áreas com propensão natural a infiltração, aumentam as áreas densamente ocupadas, e que por meio da impermeabilização afetam este processo hidrológico. Foi observado que os índices *Muito Baixo* e *Baixo* somados apresentaram um crescimento de 2.170,86 hectares (301%) entre os anos de 1988 a 2013, advindo do processo de expansão urbana que a bacia passou nos últimos anos, perfazendo os valores relativos de 16,31% (1988), 38,72% (2002) e 49,11% (2013).

Figura 23 – Mapa dos índices de Coeficiente de Infiltração no ano de 1988.



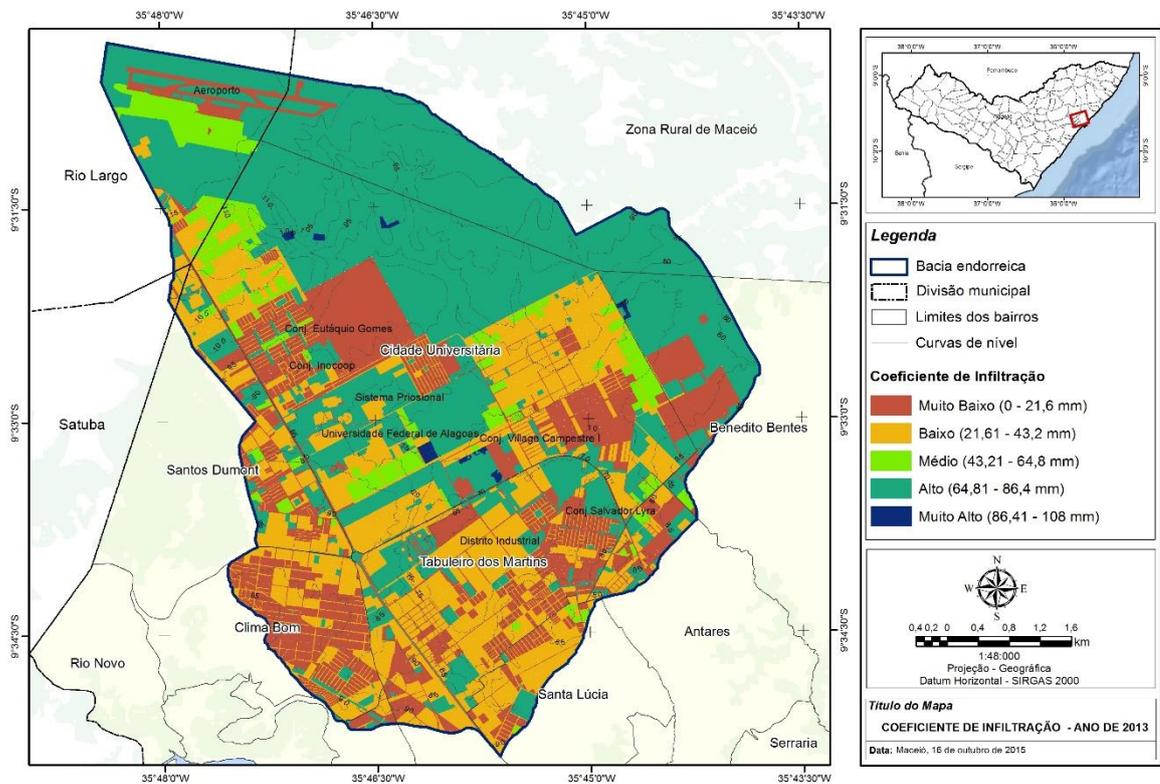
Fonte: Autor (2016)

Figura 24 – Mapa dos índices de Coeficiente de Infiltração no ano de 2002.



Fonte: Autor (2016)

Figura 24 – Mapa dos índices de Coeficiente de Infiltração no ano de 2013.



Fonte: Autor (2016)

Por meio da análise multitemporal dos resultados, ilustrados nos mapas, conclui-se que a medida que a urbanização e a impermeabilização vão se intensificando no decorrer dos anos, ocorre a diminuição das áreas com os maiores índices de capacidade de infiltração. Portanto, há que se considerar que o processo de infiltração não foi estático no decorrer dos anos, e que esse processo é importante para se compreender a dinâmica de alteração hidrológica da bacia. Nesse sentido, ressalta-se a importância de evitar ao máximo a impermeabilização das áreas ocupadas, uma vez que, a área da bacia como sendo uma superfície tabular, e apresentando depressões, tendem a favorecer a infiltração, e com crescimento urbano tendem a perder esta capacidade.

5.1.1.3 Perda inicial da precipitação

A partir da metodologia descrita no item 3.4.1.4 e através da equação 2, foi obtido os valores da perda inicial (I_a). A função da perda inicial é a geração do escoamento superficial por meio do excedente que não foi infiltrado, onde é gerado e influenciado como a intensidade da chuva, tipo e umidade do solo, e sobretudo o tipo de cobertura superficial. Dessa forma, a partir dos valores CN das coberturas superficiais da bacia foram calculados os valores da perda inicial para cada uso da bacia, apresentadas na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6 – Valores I_a dados em função da uso e cobertura superficial.

Uso e cobertura do solo	Valores de I_a (mm)
Zonas florestais e vegetação densa: Área com vegetação de porte arbóreo natural ou reflorestadas em boas condições.	21,77
Campo e áreas verdes: Parques, praças, campos de esportes, áreas cultivadas, áreas com gramados e terrenos desnudos.	14,33
Edificações muito densas: Zonas residenciais uma cidade, com cerca de 85% de taxa de impermeabilização dos solos.	3,24
Edificações não muito densas: Zonas residenciais, com cerca de 65% de taxa de impermeabilização dos solos.	5,64
Edificações com superfícies livres: Zonas residenciais, com cerca de 38% de taxa de impermeabilização dos solos.	10,40
Edificações com muitas superfícies livres: Zonas residenciais com construções esparsas, com cerca de 30% de taxa de impermeabilização dos solos.	11,92
Zonas industriais e comerciais: Áreas industriais e barracões de comércio, com cerca de 72% de taxa de impermeabilização dos solos.	5,02
Ruas e vias asfaltadas.	1,04
Ruas e vias em paralelepípedos.	6,28
Rua e vias de Terra.	7,59

5.1.1.4 Coeficiente de escoamento superficial (*C*)

Do volume precipitado sobre a bacia, apenas uma parte atinge a seção de deságue sob a forma de escoamento superficial, uma vez que parte da água é interceptada e infiltrada. O volume escoado desta forma representa apenas uma parte da precipitação, e esta relação é denominada coeficiente de escoamento. Porém, com a alteração da cobertura superficial, principalmente pela impermeabilização, as quantidades de água interceptadas, infiltradas e escoadas são alteradas, sobretudo, no que diz respeito ao volume escoado, que aumentam conforme a intensidade e duração da chuva.

Assim, o Coeficiente de Escoamento Superficial (*C*) foi adequado para as coberturas superficiais dos cenários analisados (1988, 2002 e 2013) e seus respectivos valores *CN*, por meio do Coeficiente de infiltração (*S*). Através da metodologia descrita no item 3.4.1.5, foram determinados os índices de Escoamento Superficial, empregando o modelo proposto por meio da calculadora raster¹⁰ presente no Software QGIS, aplicando nesta etapa a precipitação máxima registrada pela estação Maceió (Tabuleiro). Os dados resultantes da aplicação são apresentados na Tabela 7 e ilustrados nas figuras 26, 27, 28.

Tabela 7 – Valores de C em relação ao uso e cobertura superficial da bacia

Uso e cobertura do solo	Valores de <i>C</i>	
	Coeficiente	mm
Zonas florestais e vegetação densa: Área com vegetação de porte arbóreo natural ou reflorestadas em boas condições.	0,51	91,00
Campo e áreas verdes: Parques, praças, campos de esportes, áreas cultivadas, áreas com gramados e terrenos desnudos.	0,64	112,67
Edificações muito densas: Zonas residenciais uma cidade, com cerca de 85% de taxa de impermeabilização dos solos.	0,90	158,64
Edificações não muito densas: Zonas residenciais, com cerca de 65% de taxa de impermeabilização dos solos.	0,83	146,84
Edificações com superfícies livres: Zonas residenciais, com cerca de 38% de taxa de impermeabilização dos solos.	0,72	126,68
Edificações com muitas superfícies livres: Zonas residenciais com construções esparsas, com cerca de 30% de taxa de impermeabilização dos solos.	0,68	121,03
Zonas industriais e comerciais: Áreas industriais e barracões de comércio, com cerca de 72% de taxa de impermeabilização dos solos.	0,85	149,77
Ruas e vias asfaltadas.	0,97	170,64
Ruas e vias em paralelepípedos.	0,81	143,92
Rua e vias de Terra.	0,78	138,12

¹⁰ Ferramenta que nos permite efetuar cálculos na base de existência dos valores de pixel do raster (imagens que contêm a descrição de cada pixel). *Qgis > Raster > Raster Calculadora*.

Para construção dos mapas temáticos, quanto ao coeficiente (*C*), os valores foram classificados de acordo com a proposta de Nunes (2012), onde foram compostos por meio da importância relativa ao potencial de gerar escoamento. O produto numérico resultante desta classificação, foram escalonados em cinco intervalos: Lento, Baixo, Médio, Moderado e Alto. Para demonstrar de uma maneira mais clara, a tabela 8 demonstra os valores das áreas de cada classe e seus respectivos percentuais.

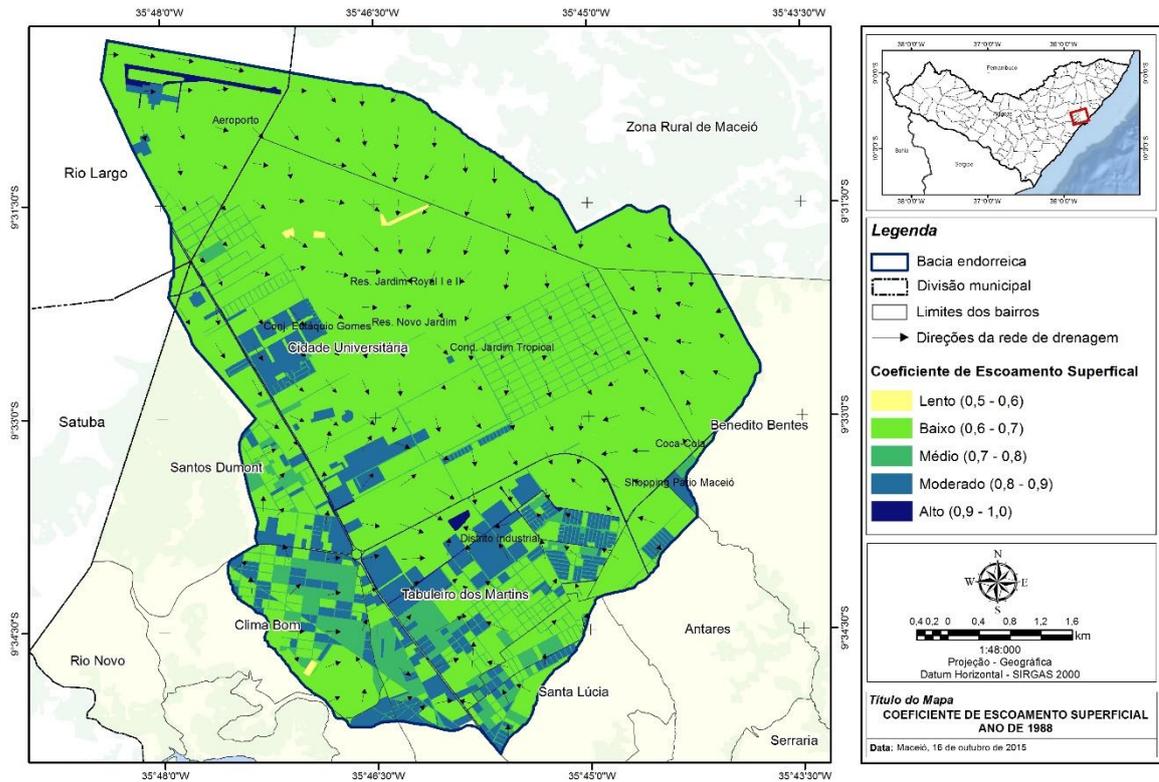
Tabela 8 – Classes definidas e seus percentuais de áreas ocupadas.

Índices	Ano					
	1988		2002		2013	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Lento	8,29	0,18	7,59	0,17	14,13	0,31
Baixo	3.643,16	79,61	2.769,30	60,52	2.304,76	50,36
Médio	369,07	8,07	283,23	6,19	127,84	2,79
Moderado	493,97	10,79	1.413,29	30,88	1.887,02	41,24
Alto	61,70	1,35	102,78	2,25	242,44	5,30
Total	4.576,19	100,00	4.576,19	100,00	4.576,19	100,00

Analisando a tabela acima, verifica-se que no ano de 1988, mais da metade da área da bacia (79,61%) gerava um escoamento superficial *Baixo*, que no decorrer dos anos passou por uma diminuição nos seus valores relativos, 60,52% em 2002 e 50,36% no ano de 2013. Uma retração de 36,74% no total de áreas, representada na grande maioria pelo cultivo da cana de açúcar e pelos terrenos baldios que, ao passar dos anos, começaram a ser ocupados principalmente por edificações densas e muitos densas, nas diversas direções da bacia.

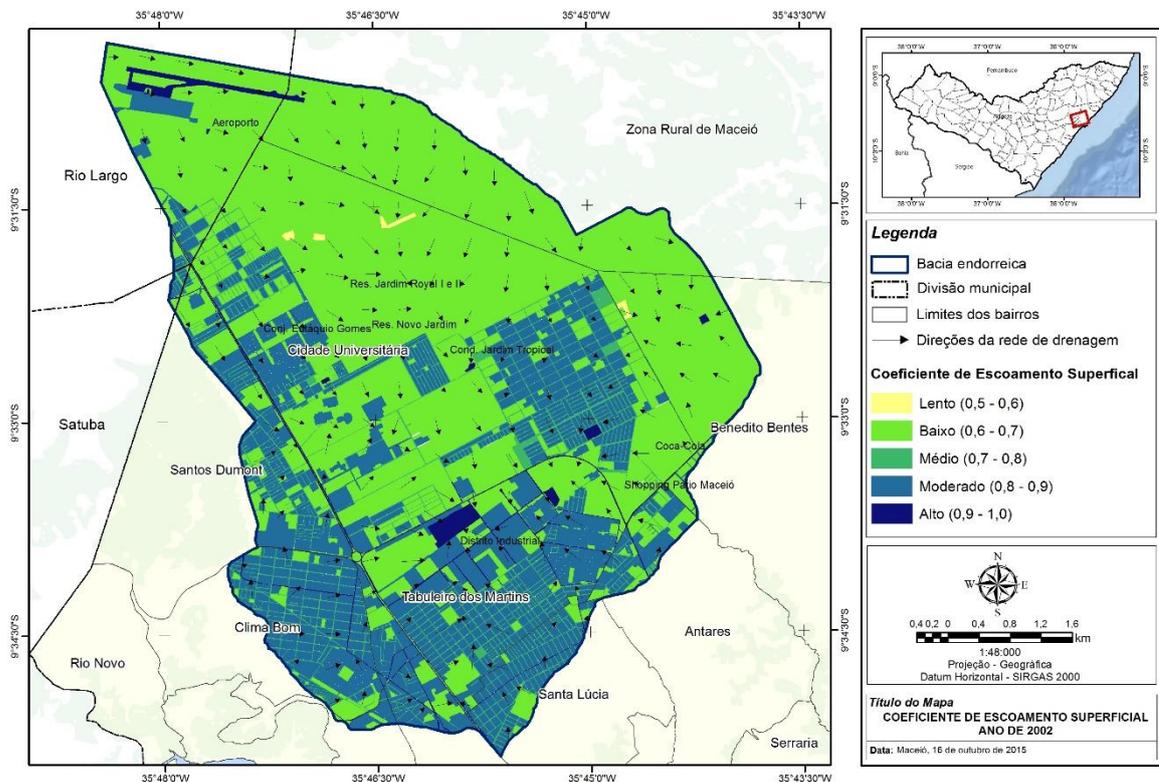
Dentre as outras classes, a que chama atenção referente ao tipo de escoamento, é a do tipo *Moderado*, apresentando um aumento de 1.393,05 hectares no período de 1988-2013, com um acréscimo relativo no valor de 382%. Esta classe faz total relação com as outras classes que apresentaram decréscimo, em particular com as classes do tipo *Baixo* e *Médio*, quanto ao aumento e concentração das edificações, e conseqüentemente, o aumento das áreas impermeáveis em detrimento de áreas verdes e espaços livres permeáveis, passando a ocupar no ano de 2013, 41,24% da área da bacia, um valor absoluto que corresponde a 1.887,02 hectares. Por fim, são apresentados os mapas dos índices do Coeficiente de Escoamento Superficial dos anos de 1988, 2002 e 2013.

Figura 25 – Mapa dos índices de Coeficiente Escoamento Superficial do ano de 1988.



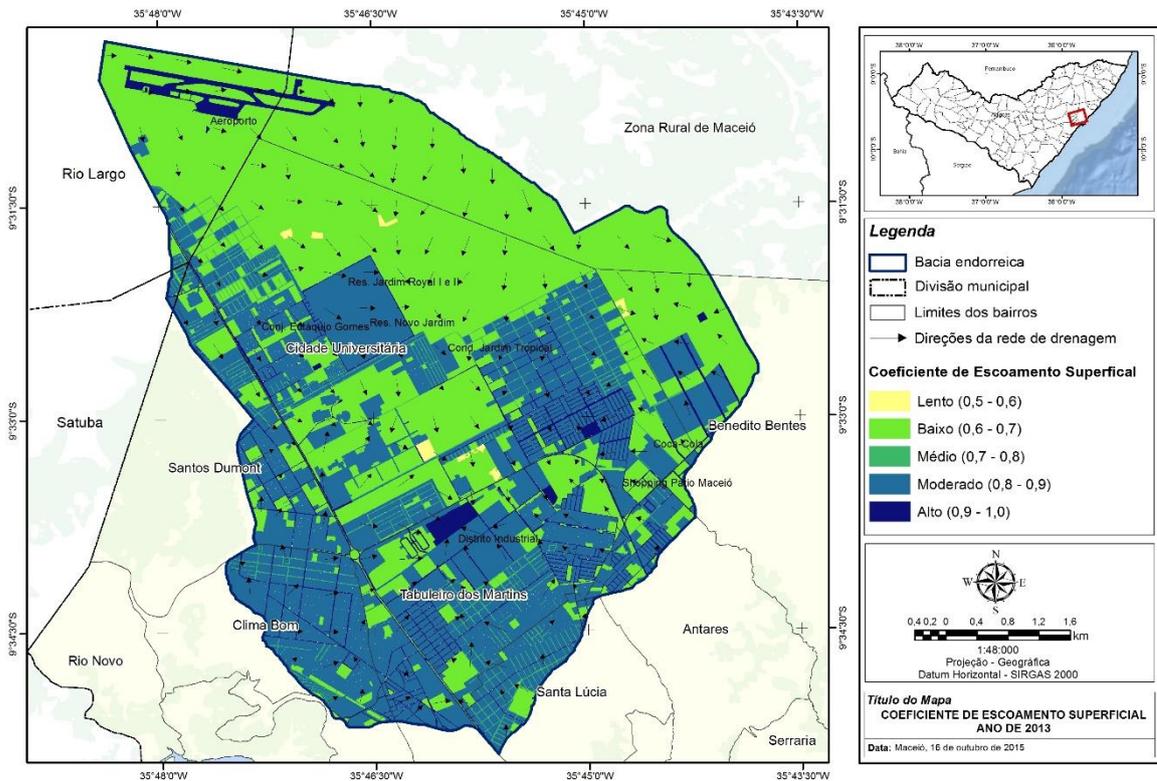
Fonte: Autor (2016)

Figura 26 – Mapa dos índices de Coeficiente Escoamento Superficial do ano de 2002.



Fonte: Autor (2016)

Figura 27 – Mapa dos índices de Coeficiente Escoamento Superficial do ano de 2013.



Fonte: Autor (2016)

5.1.2 Potencial de Recarga do Solo (PR)

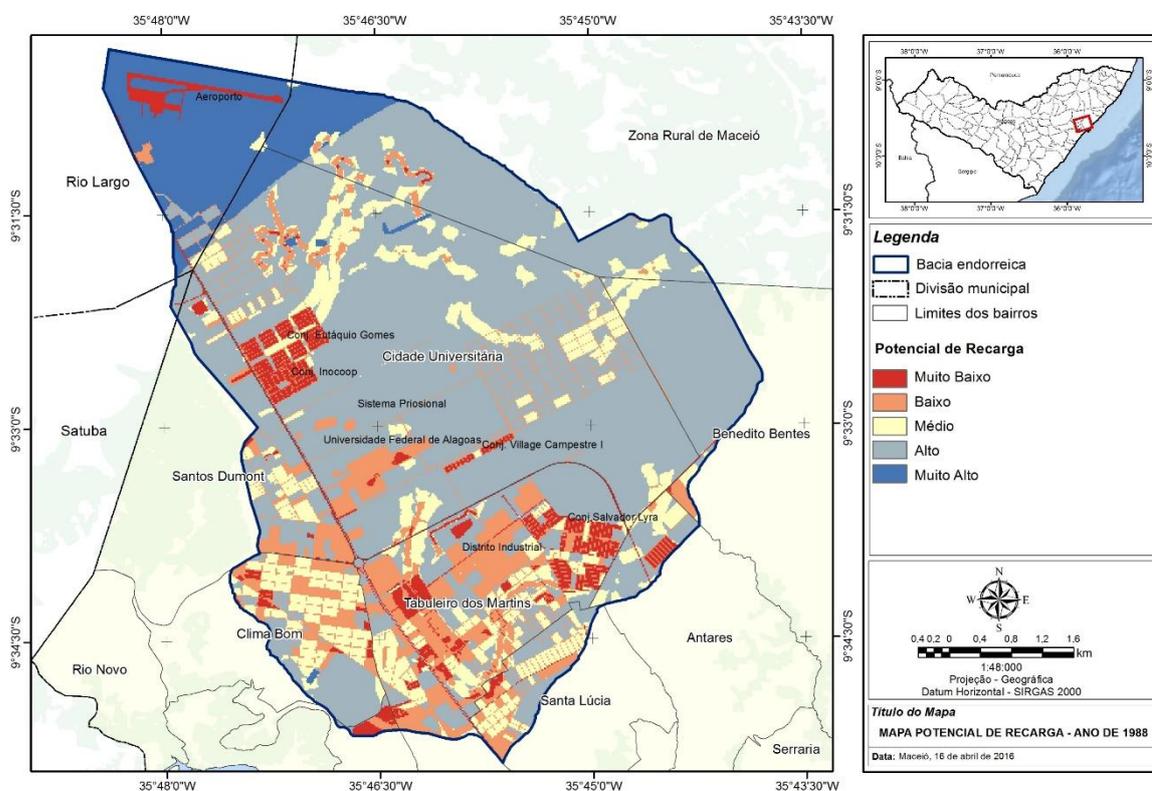
De acordo com a metodologia proposta (item 3.4.3), a elaboração dos mapas e informações do Potencial de Recarga do Solo (PR) para a área da bacia endorreica partiu da integração de planos de informações (PI), DH e declividade, por meio da equação 12. Assim, o modelo PR foi adequado para as coberturas superficiais dos cenários analisados (1988, 2002 e 2013) e seus respectivos valores CN, permitindo, desta forma, relacionar os tipos de uso e ocupação na bacia e seus impactos na capacidade potencial de recarga.

Com base nesses procedimentos, foram construídos os mapas temáticos, a fim de identificar as regiões potencialmente favoráveis à recarga. Foram classificados em cinco intervalos: Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto. A tabela 9 demonstra os valores das áreas de cada classe, seus respectivos percentuais, e verificação da retração e expansão das referidas classes no período de 1988 a 2013, cujos resultados são também apresentados nas figuras 29, 30 e 31.

Tabela 9 – Potencial de recarga do solo na área da bacia nos anos de 1988, 2002 e 2013

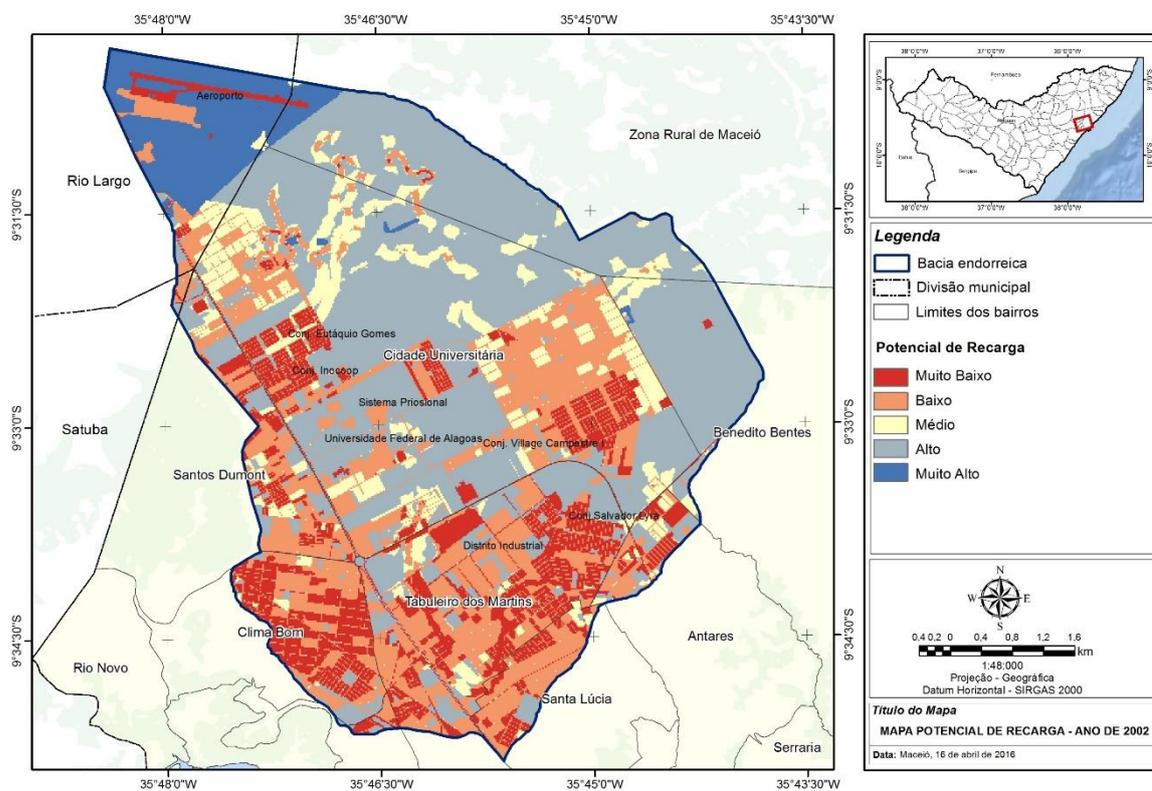
Classes	Ano						Expansão e retração (1988 a 2013)	
	1988		2002		2013			
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Muito Baixo	238,30	5,21	652,58	14,26	1101,30	24,07	863,00	362,15
Baixo	620,75	13,56	1195,02	26,11	1215,29	26,56	594,54	95,78
Médio	641,72	14,02	473,09	10,34	399,18	8,72	-242,53	-37,80
Alto	2745,34	59,99	1948,43	42,58	1611,89	35,22	-1133,45	-41,29
Muito Alto	330,08	7,21	307,07	6,71	248,52	5,43	-81,56	-24,71
Total	4576,19	100,00	4576,19	100,00	4576,19	100,00	-	-

Figura 28 - Mapa Potencial de Recarga do solo para o ano de 1988



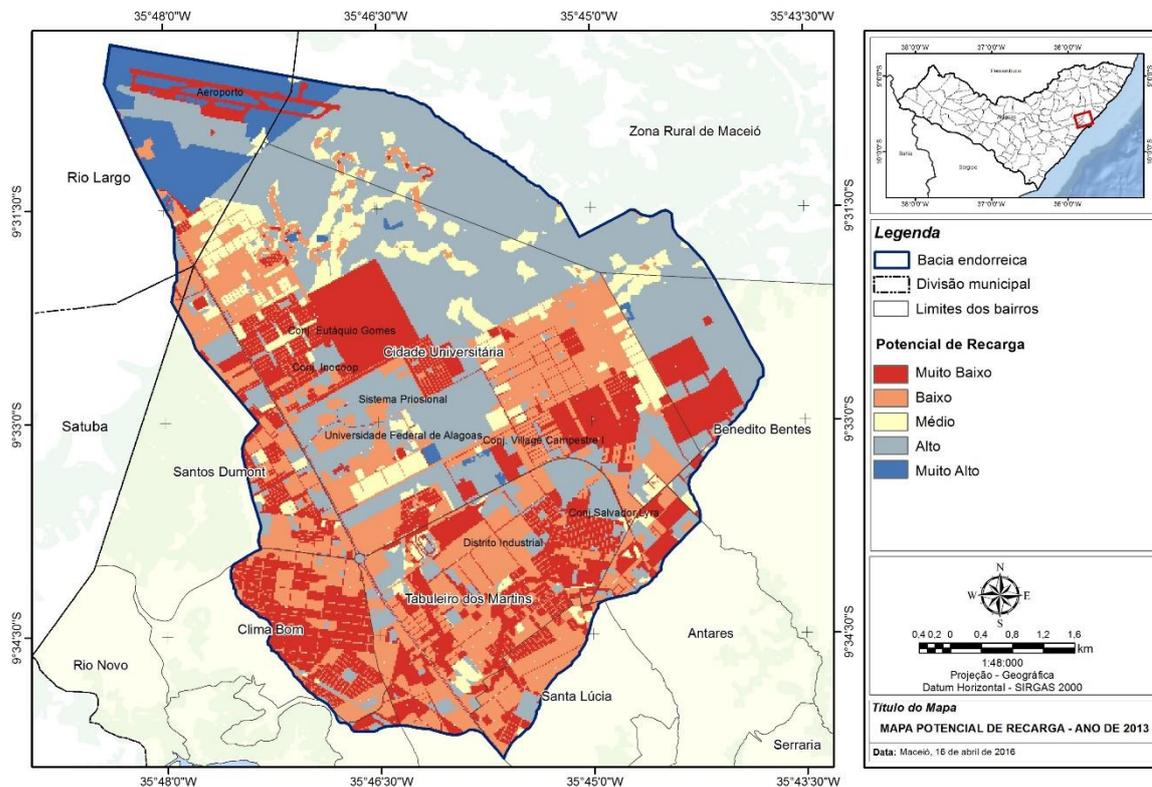
Fonte: Autor (2016)

Figura 29 – Mapa Potencial de Recarga do solo para o ano de 2002



Fonte: Autor (2016)

Figura 30 – Mapa Potencial de Recarga do solo para o ano de 2013



Fonte: Autor (2016)

Observando a tabela e os mapas acima, verifica-se que as áreas classificadas como *média, alta e muito alta* quanto ao potencial de recarga passam por uma retração, enquanto que as classes *Muito Baixa e Baixa* sofrem uma expansão significativa no decorrer desses 25 anos.

Esses resultados chamam a atenção quanto aos efeitos dos usos da terra sobre a potencialidade de recarga da bacia, apontando para uma continuidade de alteração das classes, devido a urbanização de novas áreas em curso. Tais alterações trazem como significado a modificação da participação das componentes do fluxo hidrológico na produção de infiltração, percolação e, conseqüentemente, a recarga dos aquíferos, gerando desta forma o aumento da quantidade e velocidade do escoamento.

Nota-se nos mapas, que as maiores taxas de recarga estão localizadas nas regiões onde predominam declividades baixas, variando de 0 a 8%. Observa-se que as áreas de maiores altitudes (parte norte da bacia), áreas próximas ao aeroporto Zumbi dos Palmares, também favorecem a recarga, uma vez que apresentam maior gradiente e, em geral, maior carga hidráulica, facilitando as condições de recarga e a transferência de águas de precipitação para áreas mais profundas dos aquíferos.

Verifica-se que em todos os cenários as manchas, classificadas como *Média*, presentes no interior da bacia, na classe de uso e cobertura do solo “*Campo e áreas verdes* (local de plantio de cana)” eram, em 1988, referentes a áreas onde predominam declividades que variam de 8 a 15%. Essas manchas têm a classe alterada para *Baixa e Muito Baixa* no decorrer dos anos pois passam a ser ocupadas pela expansão urbana, por meio de suas edificações, muitas vezes sem considerar o mínimo de áreas verdes. Dessa forma, o potencial de recarga se reduz principalmente pela crescente impermeabilização da superfície da bacia e, conseqüente, pelo aumento no escoamento superficial.

De modo geral, os resultados, quanto às alterações das classes de potencial de recarga do solo, estão relacionados com o tipo de usos e cobertura, assim como foi elucidado nas análises dos Coeficientes de Infiltração (item 5.1.1.2) e do Escoamento Superficial (item 5.1.1.4), que, por vez, estão relacionados ao crescimento do parâmetro CN. Assim, fica evidenciado que a análise hidrológica para estimar o escoamento superficial, infiltração ou recarga, partiu de um pressuposto que foi o entendimento da alteração do uso e cobertura do solos na mudança no comportamento hidrológico da bacia.

5.1.3 Comportamento dos processos hidrológicos

5.1.3.1 Tempo de concentração (T_c)

O cálculo do tempo de concentração obtido pela equação de Germano et al. (1998) (item 3.4.2.1) para os três cenários analisados, permitiu avaliar que as respostas hidrológicas da bacia foram alteradas no decorrer dos anos pela urbanização da área. A partir dessa configuração, foram obtidos os valores do tempo de concentração para cada cenário, estabelecidos em relação às taxas de impermeabilização. Os valores encontrados para o tempo de concentração dos cenários estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Valores do tempo de concentração da bacia endorreica do Tabuleiro nos anos de 1988, 2002 e 2013.

Anos	Impermeabilização (km ²)	Impermeabilização (%)	Tc (min)	Tc (h)
1988	4,85	10,60	90,76	1,51
2002	13,2	28,85	69,12	1,15
2013	20,3	44,36	61,48	1,02

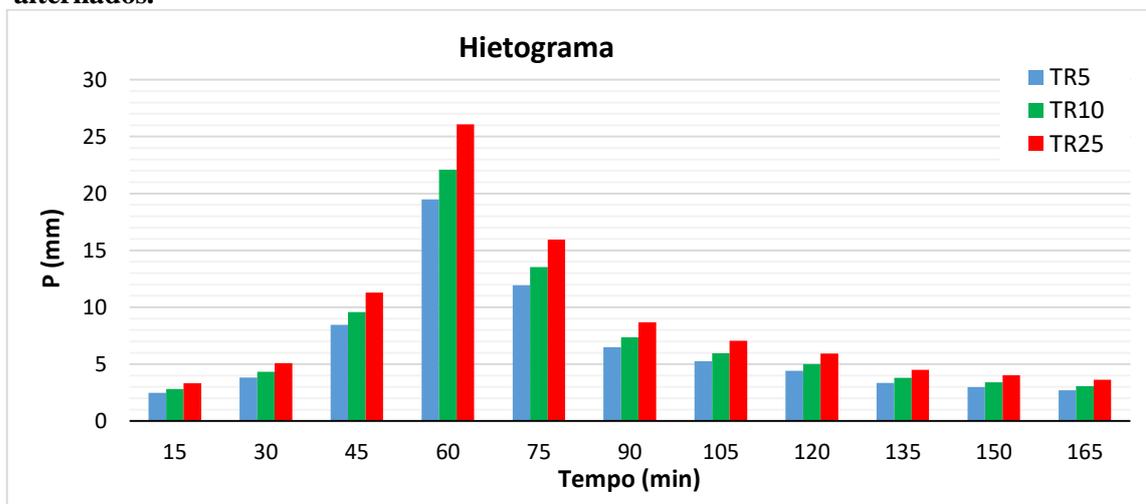
Analisando a alteração do tempo de concentração da bacia em relação à impermeabilização dos solos ocorrida entre 1988 a 2013, estima-se um decréscimo de 29 min no tempo de concentração da bacia.

5.1.3.2 Chuvas intensas e vazões de pico

As chuvas intensas para cálculo das vazões de pico são mostradas nos hietogramas da Figura 32, definidos conforme item 3.4.2.2, em função dos diferentes períodos de retorno.

A figura mostra algumas características das precipitações utilizadas nas simulações, para os tempos de retorno estudados. Observa-se que os picos dos hietogramas, ocorreram em 60 min da duração do evento, com valores máximos de 19,49, 22,10 e 26,09mm, para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos, respectivamente. Os hietogramas mostram que, devido ao método utilizado, os picos sempre ocorrerão em relação ao tempo de base e do pico do HUS.

Figura 31 - Hietogramas para os períodos de retorno 5, 10, e 25 anos – Método dos blocos alternados.



Fonte: Autor (2016)

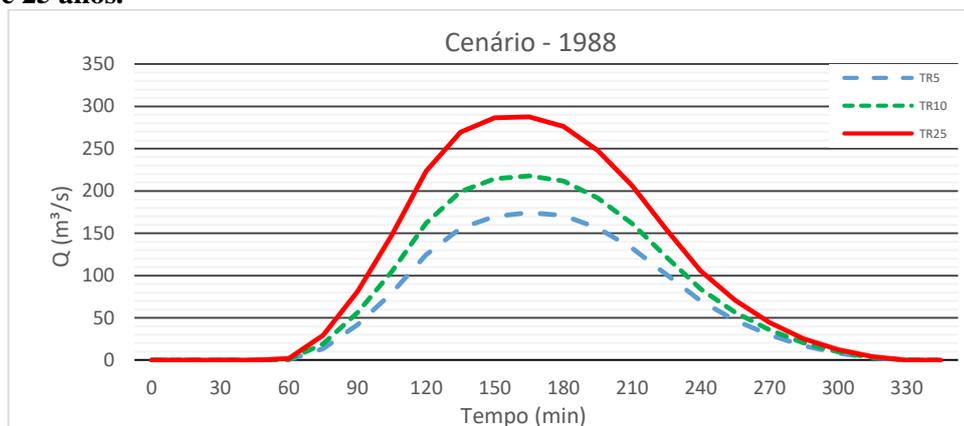
Nota-se que as intensidades máximas médias de precipitação, para a mesma duração, são diretamente proporcionais ao período de retorno. A priori, os resultados dos hietogramas independem das condições da bacia e do uso e ocupação do solo, pois dependem apenas das condições da chuva propriamente dita. Portanto, os hietogramas, para cada condição da chuva são iguais para os três cenários analisados, resultando da estrutura da equação que representa a curva IDF (Eq. 7).

Uma vez determinadas as chuvas intensas, foram realizadas simulações chuva-vazão, para tentar quantificar as consequências, do ponto de vista hidrológico, as implicações decorrentes da ocupação da bacia no decorrer dos anos.

As Figuras 33, 34 e 35 apresentam as vazões de pico para as simulações dos cenários com período de retorno de 5, 10 e 25 anos.

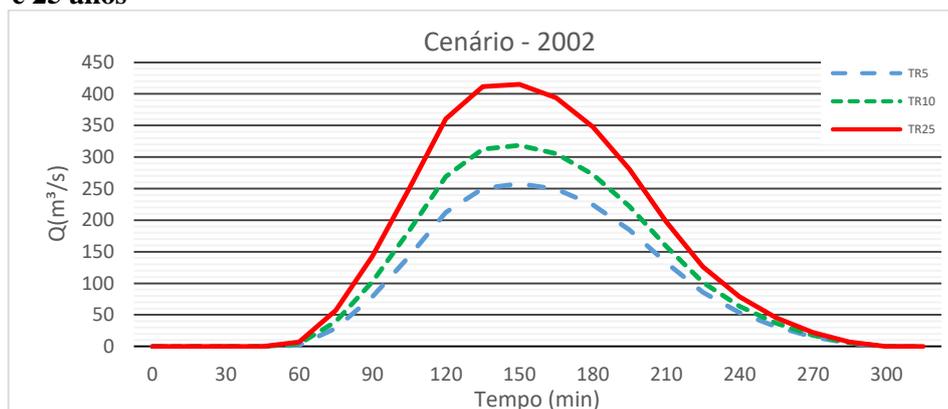
Observa-se que os valores totais escoados aumentam em função do período de retorno, com valores totais de 71,39, 80,94 e 95,54 mm para os períodos de retorno acima mencionados, respectivamente.

Figura 32 - hidrograma gerado para cenário de 1988 para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.



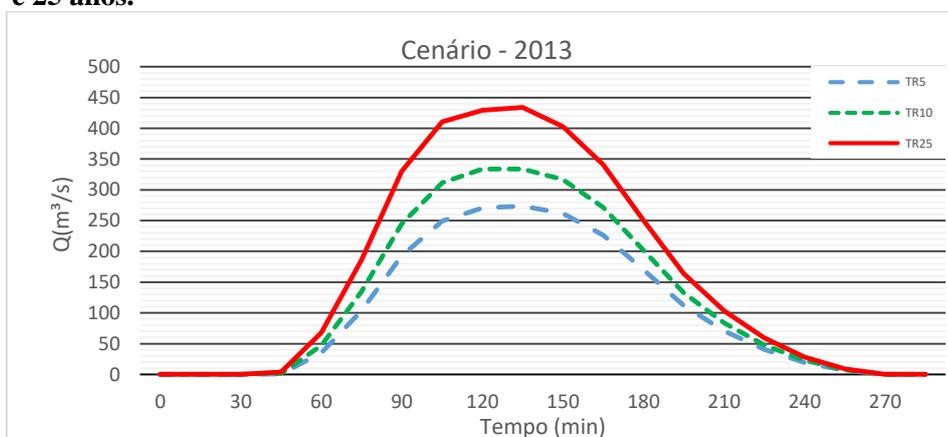
Fonte: Autor (2016)

Figura 33 - hidrograma gerado para cenário de 2002 para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.



Fonte: Autor (2016)

Figura 34 - hidrograma gerado para cenário de 2013 para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.

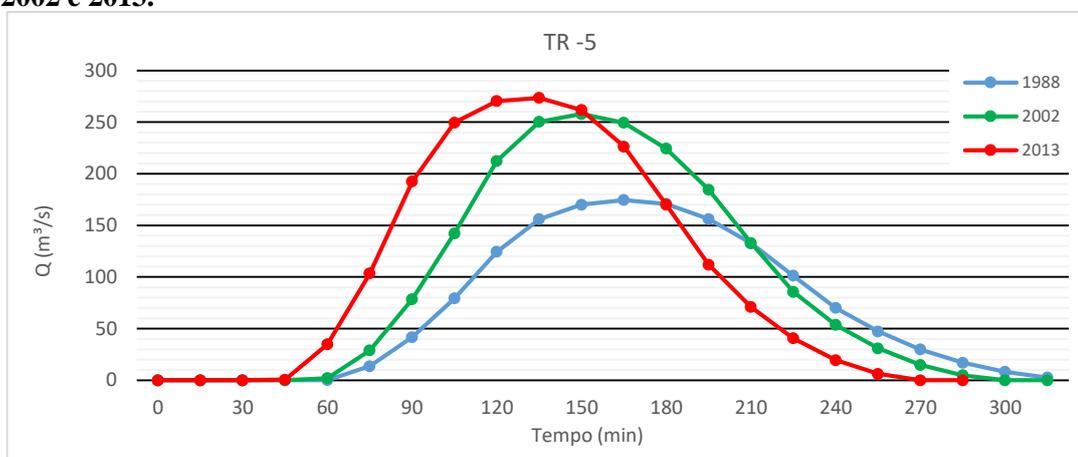


Fonte: Autor (2016)

Analisando as figuras anteriores, nota-se um aumento significativo do valor da vazão de pico nos hidrogramas dos cenários no decorrer dos anos analisados e houve uma grande redução do tempo da vazão, diminuição de 60 minutos, o que mostra que os picos de vazão se anteciparam e que a velocidade da vazão aumentou, o que acabou diminuindo o tempo total de escoamento.

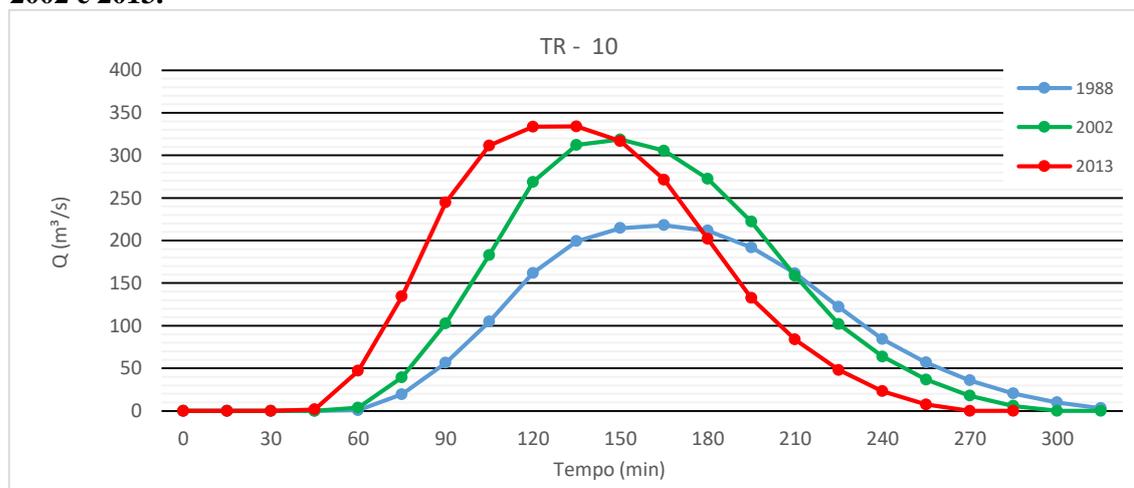
Para melhor expor esta averiguação, as Figuras 36, 37 e 38 mostram as simulações dos valores da vazão e seus respectivos hidrogramas considerando como análise os tempos de retorno (5, 10 e 25 anos) para os três cenários citados.

Figura 35 - hidrogramas gerados para tempo de retorno de 5 anos para os cenários de 1988, 2002 e 2013.



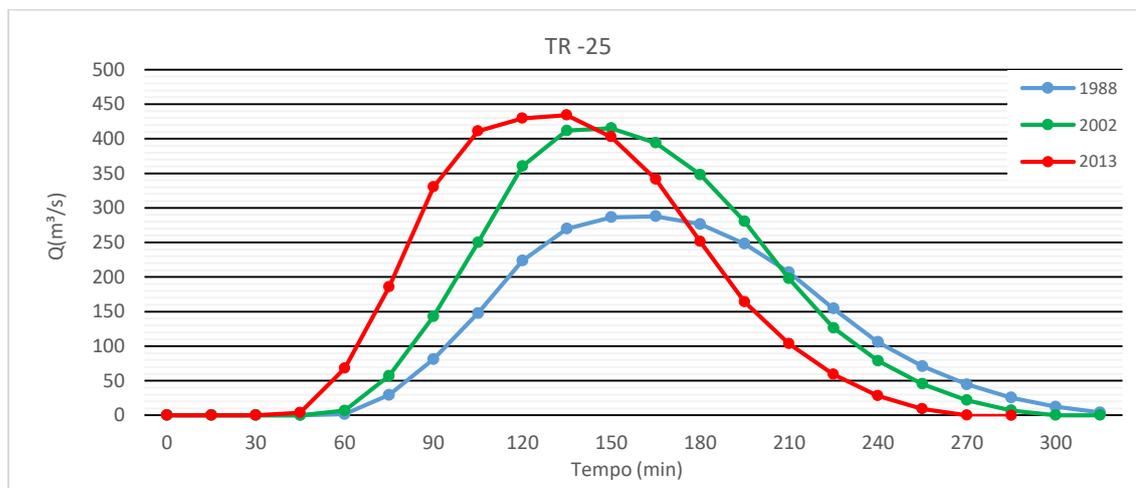
Fonte: Autor (2016)

Figura 36 - hidrogramas gerados para tempo de retorno de 10 anos para os cenários de 1988, 2002 e 2013.



Fonte: Autor (2016)

Figura 37 - hidrogramas gerados para tempo de retorno de 25 anos para os cenários de 1988, 2002 e 2013.



Fonte: Autor (2016)

Conforme as figuras acima, fica claro o entendimento da relação do processo de urbanização com as alterações hidrológicas quanto ao aumento e antecipação do pico de vazão, que, conseqüentemente, acresce os valores dos volumes escoados superficialmente num curto período de tempo. A Tabela 11 apresenta uma síntese dos resultados, mostrando os aumentos percentuais da vazão de pico, do volume escoado e da lâmina d'água, comparando os cenários para os diferentes tempos de retorno.

Tabela 11 - Resultado dos hidrogramas para os cenários analisados para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos.

Tempo de Retorno (Tr)	Cenários	Vazão de Pico (m³/s)	Volume escoado (m³)	Lamina d'água (mm)
5 anos	1988	174,50	1,3465 x10 ⁶	29,43
	2002	257,85	1,7587 x10 ⁶	38,43
	2013	273,49	1,8293 x10 ⁶	39,98
10 anos	1988	218,00	1,6843 x10 ⁶	36,81
	2002	318,56	2,1712 x10 ⁶	47,45
	2013	334,04	2,2424 x10 ⁶	49,00
25 anos	1988	287,70	2,2287 x10 ⁶	48,70
	2002	415,18	2,8298 x10 ⁶	61,84
	2013	434,04	2,8985 x10 ⁶	63,34

Quando os hidrogramas e a tabela são analisados, observa-se que as vazões de pico aumentaram de 127,76 m³/s para uma chuva com tempo de retorno igual a 5 anos, de

152,67 m³/s para chuvas com tempo de retorno igual a 10 anos e de 190,90 m³/s para uma chuva com tempo de retorno igual a 25 anos.

Com relação às vazões observadas em cada cenário, nota-se significativo incremento proporcionado pelo aumento da área impermeável na bacia, resultando no aumento do escoamento superficial. O aumento expressivo nas vazões observadas entre os cenários de 1988 e 2013 é resultado da redução significativa das classes de *campos e áreas verdes*, *Edificações com superfícies livre*, e *Ruas e vias de Terra* (classes usos e cobertura do solo, ver tabela 2 e 3), em consequência da urbanização, que por meio da concentração das edificações, e o aumento das áreas impermeáveis, que vem diminuindo a quantidade de áreas verdes e espaços livres permeáveis.

É importante destacar que, para períodos de retorno pequenos, como o de 5 anos, por exemplo, o processo de infiltração é mais evidente; o que torna o escoamento superficial menor, ocorrendo o oposto para períodos de retorno maiores, como o de 25 anos.

Quanto ao volume escoado¹¹ superficialmente, verifica-se uma relação com os valores do pico de vazão, pois, quanto maior vazão maior o volume escoado. Sendo assim, foi avaliado que para as categorias de uso e ocupação entre 1988 e 2013, o volume escoado para os três tempos de retorno aumentou 0,4828 x10⁶ m³/s, 0,5581 x10⁶ m³/s e 0,6698 x10⁶ m³/s, respectivamente. Esses valores estão diretamente relacionados às consequências da impermeabilização que reduziu a infiltração na bacia. Observa-se que, quanto maior for o tempo de duração da chuva, maior será o tempo de escoamento superficial.

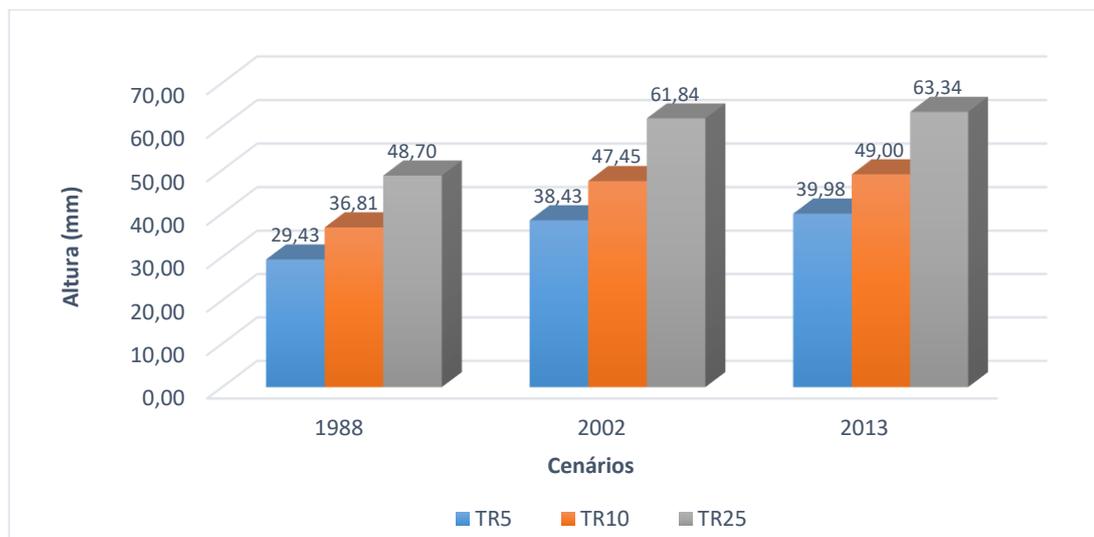
Da mesma forma que o volume escoado, a lâmina d'água¹² que se forma a partir do escoamento superficial aumenta com o tempo de duração e de retorno da chuva, além de ser altamente dependente do uso e ocupação do solo, conseqüentemente, dependente do valor CN, que quanto maior, maior será a lâmina formada.

Para a área total de drenagem da bacia endorreica, 45,76km², e com as condições de uso e ocupação do solo entre os anos analisados, constata-se, para os tempos de retorno, um aumento na lâmina d'água escoada de 10,55, 12,20 e 14,64mm, respectivamente. No Figura 39 pode ser observado os valores das lâminas d'água para os respectivos cenários e tempos de retorno, obtidas para a duração da chuva simulada.

¹¹ O volume escoado foi obtido a partir do somatório das vazões multiplicadas pelos intervalos de tempo.

¹² A lâmina escoada é obtida através da divisão do volume escoado pela área da região analisada.

Figura 38 – Valores das lâminas d’água para os cenários de 1988, 2002 e 2013 e os respectivos tempos de retorno



Fonte: Autor (2016)

Observa-se que os valores acima evidenciam um aumento mais significativo para os períodos de retorno de 10 e 25 anos, mas como dito antes, é preciso destacar que para o período de retorno de 5 anos o processo de infiltração é maior, o que torna a altura da lâmina d’água menor.

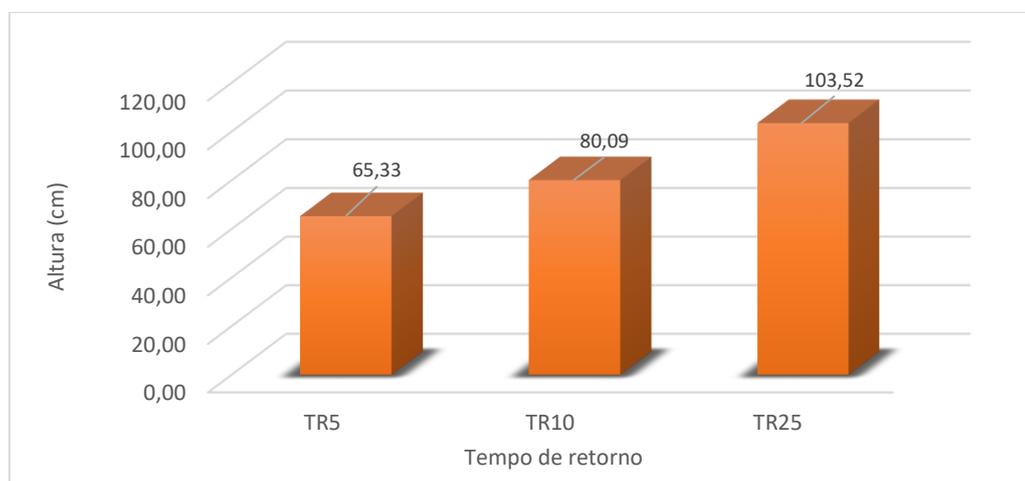
Os volumes escoados superficialmente não são muito significativos quando distribuídos em toda a superfície da bacia em forma de lâmina d’água. Considerando o cenário atual (2013), as lâminas geradas em toda a bacia seriam de apenas 39,98mm (4cm), 49,00mm (4,9cm) e 63,34mm (6,3cm) para os períodos de retorno 5, 10 e 25 anos, respectivamente. Contudo, considerando que os volumes d’água escoam pela bacia endorreica em direção ao ponto de cota mais baixa (Lagoa da Coca-Cola), e considerando a área em torno dessa Lagoa delimitada pela curva de nível 70m, totaliza apenas uma superfície de 2,8km², (Figura 40). Os valores obtidos, neste caso, para o ano de 2013, (Figura 41), mostram alturas significativas das lâminas d’água, com valores que superam 1,0 metro para o tempo de retorno de 25 anos. Este valor é compatível com o histórico dos eventos de alagamentos ocorridos constantemente no local.

Figura 39 – Localização (em laranja) da porção de menor cota altimétrica da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins.



Fonte: Google Earth (2016); Autor (2016)

Figura 40 - Valores das lâminas d'água para o cenário de 2013 e os respectivos tempos de retorno da área de baixa cota altimétrica da bacia (inferior a 70m).



Fonte: Autor (2016)

Deve-se ressaltar, que por falta de uma rede de drenagem natural na bacia, pois com o advento da urbanização na área, muitos canais de escoamento natural e depressões foram aterrados, as características dos processos hidrológicos, foram estimadas considerando o principal meio de escoamento, ou seja, antigo e principal talvegue, depressão natural por onde escoava as águas pluviais, adotando como exutório da bacia, a sua porção mais baixa, por onde

toda forma de escoamento se direciona. Desta forma, a análise do comportamento hidrológico da bacia é feita para sua totalidade, não analisando em partes.

5.2 Análise dos impactos hidrológicos

5.2.1 Impactos no escoamento superficial da bacia

A partir dos resultados fornecidos pela análise multitemporal da cobertura superficial dos solos e realizada por meio da quantificação das análises quanto ao escoamento superficial da bacia, foi possível constatar que a intensificação urbana com a consequente diminuição do tempo de concentração, vem aumentando e acelerando o volume da d'água desde o ponto mais distante da bacia até a seção de interesse.

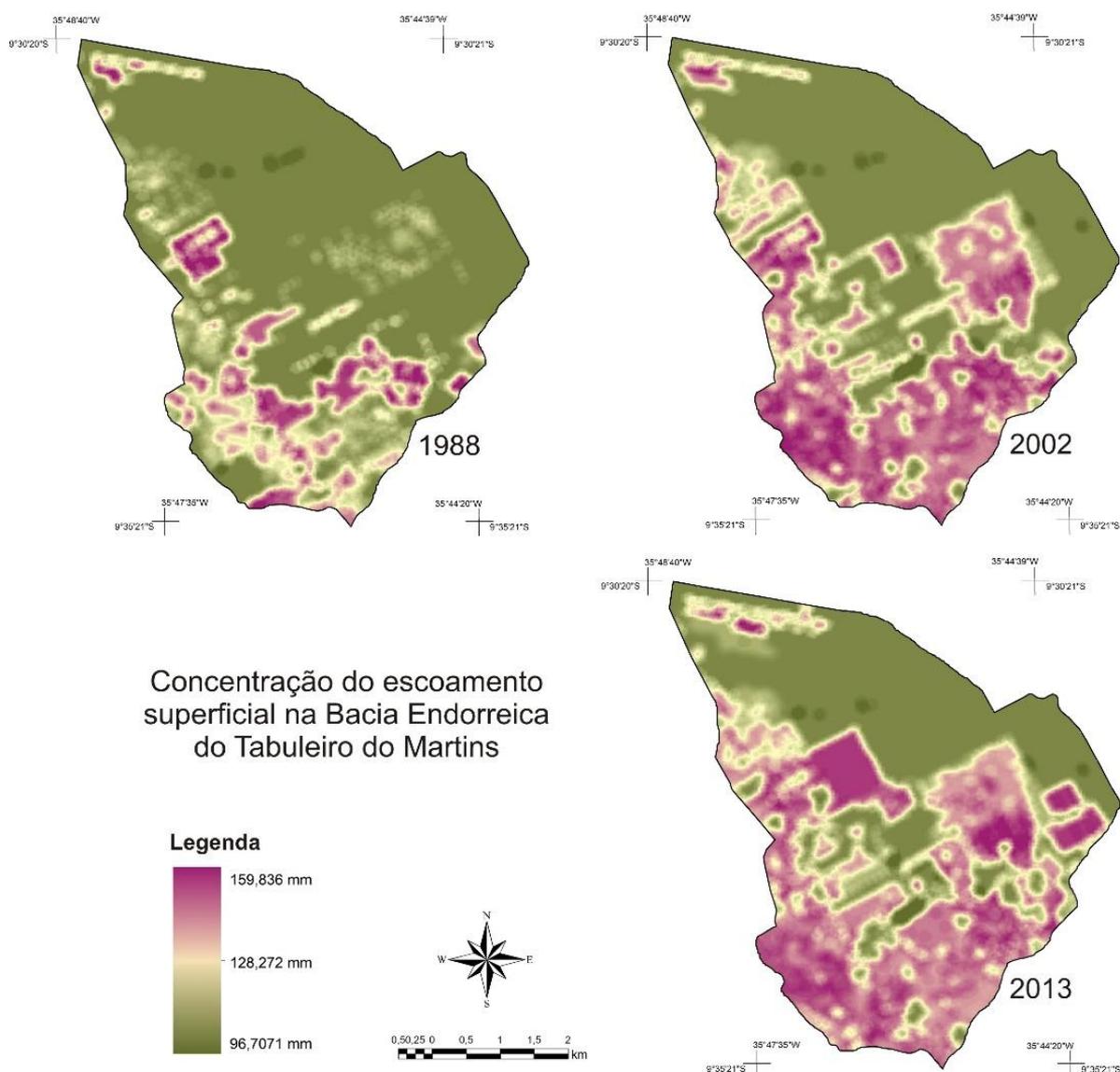
Analisando a variação do tempo de concentração em relação processo de ocupação entre 1988 a 2013, pode-se verificar uma mudança na taxa de impermeabilização dos solos de 10,60% para 44,36 %, o que alterou o tempo de concentração, passando de 1 hora e 48 min para 1 hora. Outro parâmetro hidrológico analisado, que vem a evidenciar a influência intensificação da ocupação urbana na variação do regime hidrológico da bacia, foi aumento do volume escoado pela diminuição da capacidade de infiltração e de armazenamento da camada superficial do solo.

Os resultados gerados através da aplicação dos modelos de transformação de chuva-vazão, revelam que o aumento das vazões de pico entre os anos de 1988 a 2013, também foi bastante expressivo em todos os tempos de retorno analisados. Os mapas de coeficientes de escoamento superficial possibilitam a visualização das regiões mais críticas ao escoamento das águas pluviais. As Figura 26, 27 e 28 deixam bastante clara a correlação existente entre o aumento da impermeabilização do solo, com aumento do coeficiente de escoamento superficial e da vazão de pico.

Para melhor compreender o comportamento do escoamento superficial da bacia, foram gerados mapas que mostram a intensidade de escoamento nos respectivos anos analisados. A geração dos mapas foi feita por meio da interpolação dos valores dos pixels presentes nas classes dos mapas dos índices de Coeficiente Escoamento Superficial para os anos de 1988, 2002 e 2013.

Como se pode verificar na Figura 42 a distribuição da intensidade do escoamento dada em milímetros, seguiu o padrão de expansão da bacia. Nota-se que no ano de 1988 os maiores valores se localizavam na direção Centro-Sudoeste, onde se encontram o DILC e se concentravam maior parte de edificações da época, como exemplo o conjunto Salvador Lyra. No ano de 2002, verifica-se um crescimento significativo da mancha com os maiores índices, notando-a ascendendo na direção sudeste da bacia. Naquele ano, a taxa de impermeabilização perfazia mais de 28% da área total da bacia, acarretado pela construção de novos loteamentos e edificações, sobretudo no bairro Cidade Universitária.

Figura 41 – Mapas de concentração do escoamento superficial nos respectivos cenários analisados.



Fonte: Autor (2016)

Em 2013, o escoamento superficial se mostra mais intenso. Observa-se um crescimento na direção Leste e Norte da bacia, ao fato da instalação de novos conjuntos habitacionais nos bairros do Benedito Bentes e Cidade Universitária (Eustáquio Gomes). Nesse ano a área impermeável somava em torno de 41% da área da bacia, sobretudo, por meio da substituição das áreas de plantio de cana por edificações.

Com base nos resultados apresentados, observa-se um padrão de continuidade de expansão ou retração das classes/índices do Coeficiente de Escoamento Superficial. No decorrer dos cenários analisados, os dados mostraram que a impermeabilização do solo foi a principal responsável pela alteração da capacidade potencial do escoamento. Enfim, a representação dos índices e a distribuição dos valores possibilitam a visualização das áreas mais críticas nos cenários analisados, mostrando a relação do crescimento urbano e seus impactos na concentração de áreas propícias à geração do escoamento das águas superficiais.

Quanto aos aspectos morfométricos analisados em conjunto com as características hidrológicas, nota-se a configuração de uma bacia do tipo endorreica, ou seja, sem exutório, onde toda água escoar e acumula na porção mais baixa. Além disso, a bacia conta com um fator de forma de 0,78, o que demonstra que o tempo de concentração do fluxo d'água até a parte de desagüe é rápido, com vazão irregulares e com propensão a alagamento. Fato este preocupante, uma vez que, a porção onde ocorre este desagüe encontra-se ocupada por alguns conjuntos habitacionais e pelo distrito industrial da cidade.

5.2.2 Impactos na recarga dos aquíferos

Analisando os resultados dos Coeficientes de Infiltração (S), considerando a altura pluvial de entrada da chuva máxima histórica registrada para a bacia, verifica-se que as taxas de infiltração veem diminuindo expressivamente no decorrer dos anos. Quando estas informações são avaliadas junto com os resultados obtidos da Potencialidade de Recarga de água no solo (PR), o qual considera o relevo agente decisivo neste processo, nota-se para um resultado preocupante, quanto a parte da chuva que deveria infiltrar e abastecer os aquíferos.

Como se pode observar, analisando e quantificando os índices de potencial de recarga, verifica-se que os índices *Muito Alto* e *Alto* somados perfaziam um total de 67,2% em 1988, da área total da bacia, enquanto que, em 2013, somam apenas 40,65%. Em contrapartida os resultados dos índices *Muito Baixo* e *Baixo* somados passaram de 18,77% em 1988 para 50,63%

em 2013, um crescimento muito significativo ao levar em conta uma bacia, do tipo endorreica, no qual o processo natural do ciclo hidrológico que mais se destaca é a infiltração.

Nesse entendimento, quando analisamos a média de infiltração, obtida por meio do coeficiente S^{13} , tomando, nesse caso, como referência a chuva (187,8 mm) utilizada na equação, verifica-se uma queda razoável na taxa, passando de 62,40 mm em 1988 para 46,06 mm em 2013. Observa-se para estes fatos decorrentes, que a consequente diminuição dos índices de infiltração e potencial de recarga foram resultados do aumento do processo de adensamento de ocupação urbana na bacia.

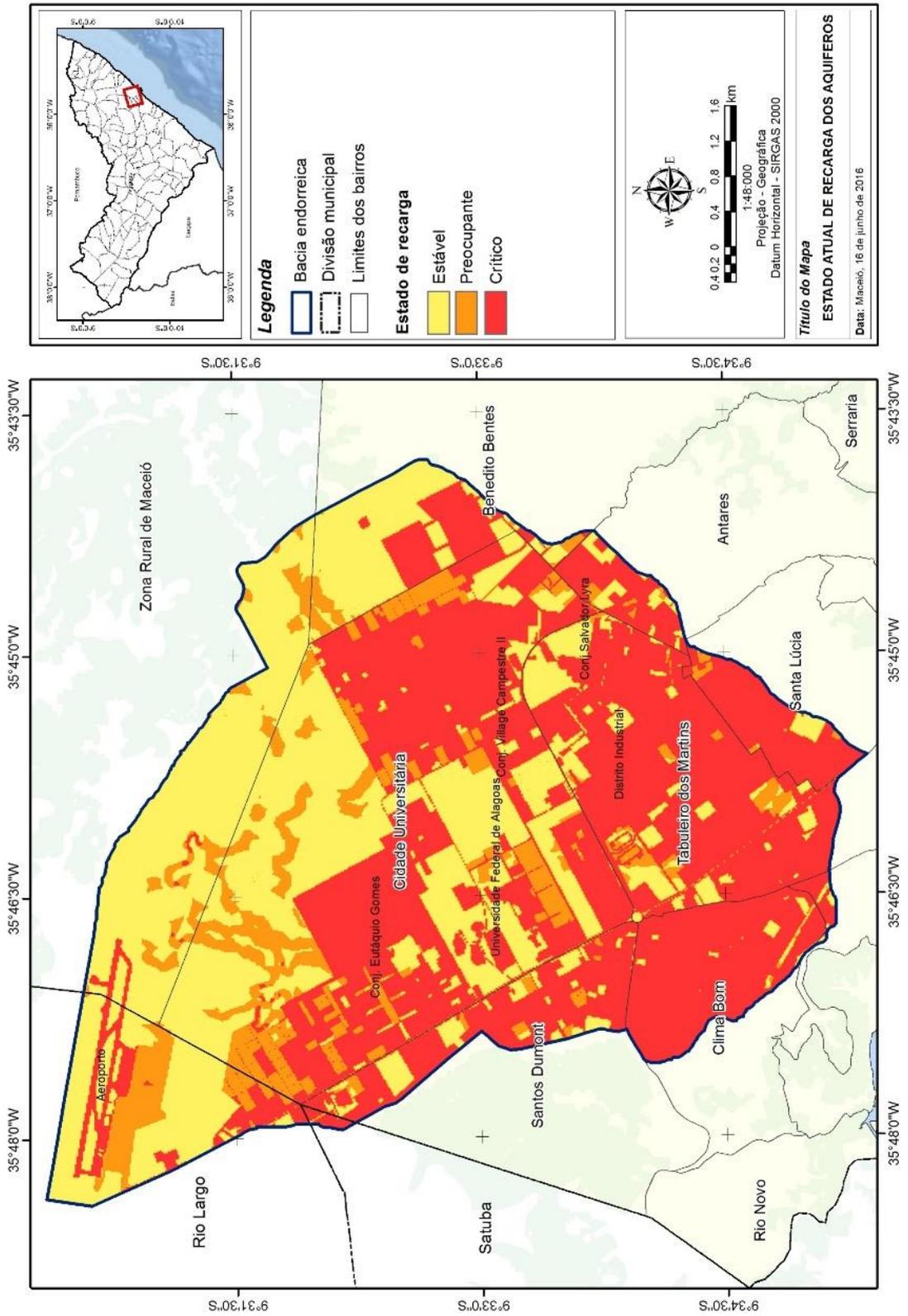
Para tentar compreender esses processos, foi gerado um mapa, por meio do cruzamento dos planos de informações S e PR , onde suas referidas classes foram multiplicadas por meio da álgebra de mapas ($ER = S \times PR$), objetivando produzir informação quanto o estado hidrológico de recarga da bacia. O produto numérico resultante desta combinação, foram escalonados em três categorias, estado ou situação, no qual se encontra a bacia: Estável, Preocupante e Crítico. Por sua vez, resultou no mapa de estado atual de recarga dos aquíferos (Figura 43).

Os resultados obtidos mostram que 49,27% da área da bacia, encontra-se na classe de situação *Crítica*, ao mesmo tempo que a classe de situação *Estável* ocupa 39,45% da bacia. Os resultados evidenciam uma situação delicada, visto que, praticamente metade da bacia está comprometida quanto ao processo natural de infiltração, e conseqüentemente, da recarga dos aquíferos. O que poderá provocar num futuro, não tão distante, um comprometimento da dinâmica hidrológica local. Dessa forma, estes resultados ficam mais claros quando são comparados com os resultados anteriores, quanto ao escoamento superficial, onde mostram que se intensificaram e deixaram os picos de vazão mais rápidos e elevados.

No entanto, o comprometimento de áreas de recarga causará efeitos negativos na descarga artificial dos aquíferos, por meio dos poços tubulares perfurados, que tende a promover o rebaixamento, ou mesmo exaurir, o nível freático dos aquíferos. Nesse sentido, na busca por resultados que comprovassem essa afirmação, foram realizadas simulações dos níveis dos aquíferos, levando em consideração a potenciometria da bacia, expostos por meio dos mapas potenciométricos dos cenários avaliados (Figuras 44, 45 e 46), elaborados por meio da metodologia descrita no item (3.3.3.3).

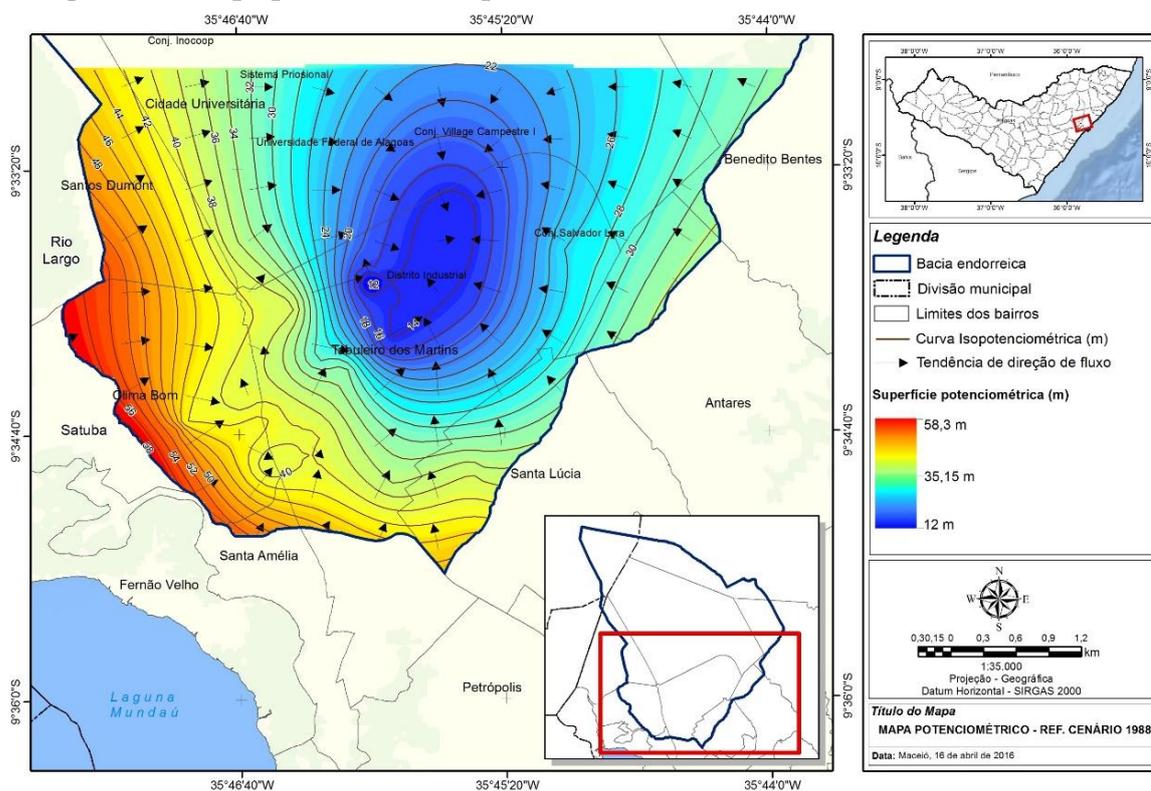
¹³ Na aplicação do modelo foi utilizada a condição de umidade antecedente do solo descrita como Condição II. Foi escolhida esta condição considerando representar uma situação intermediária para a umidade do solo.

Figura 42 – Mapa do estado atual de recarga dos aquíferos da bacia.



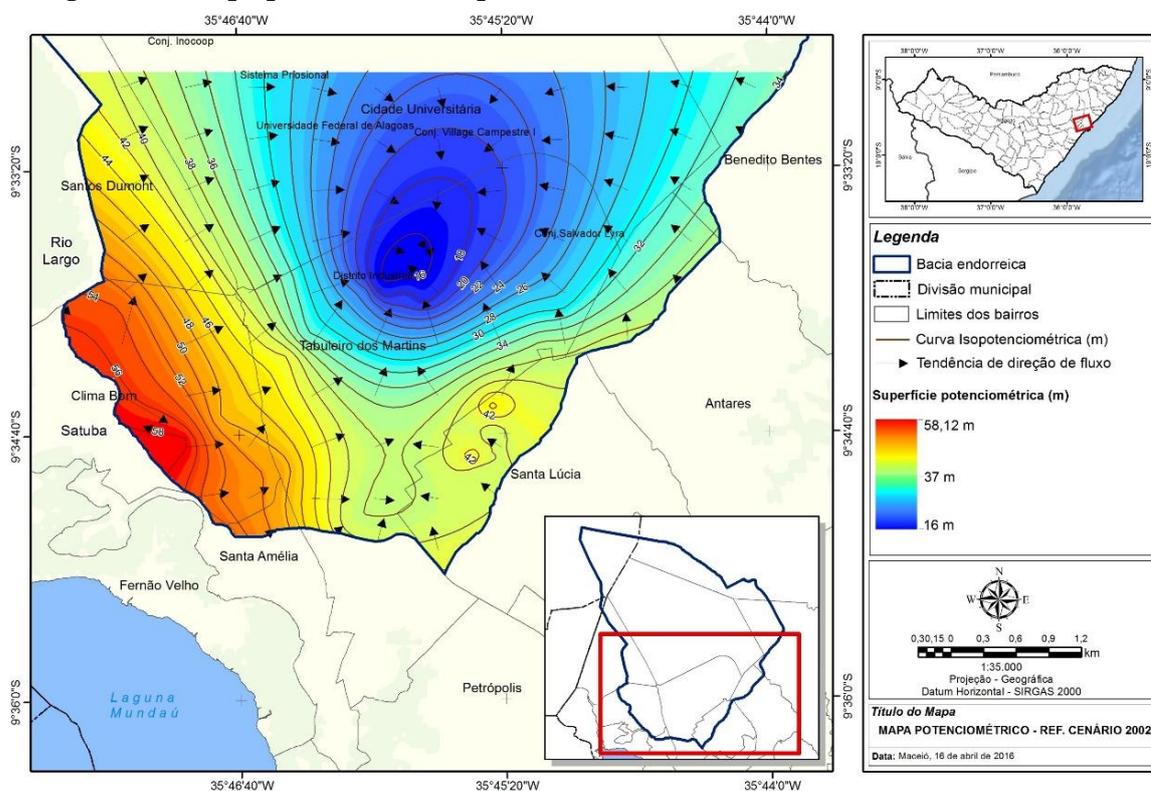
Fonte: Autor (2016)

Figura 43 – Mapa potenciométrico para ano de referência de 1988.



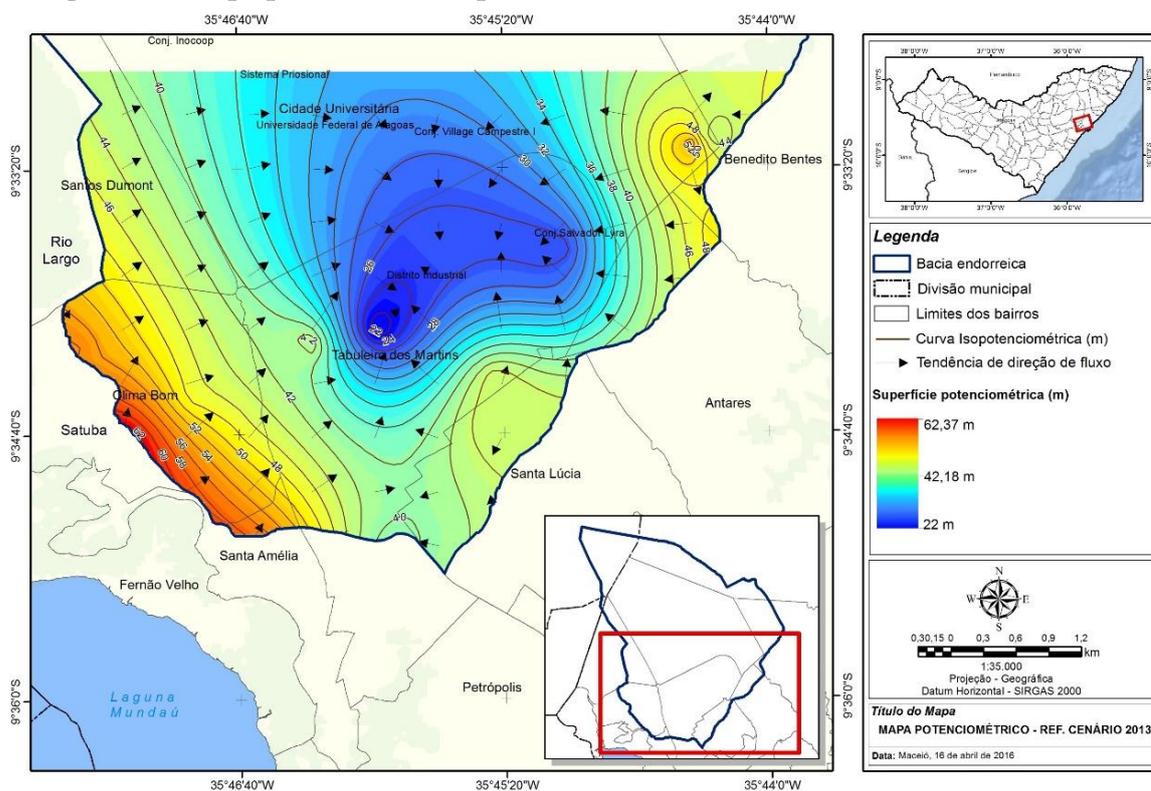
Fonte: Autor (2016)

Figura 44 - Mapa potenciométrico para ano de referência de 2002.



Fonte: Autor (2016)

Figura 45 - Mapa potenciométrico para ano de referência de 2013.



Fonte: Autor (2016)

A simulação da potenciométrica do aquífero, feita para os cenários analisados para porção centro sul da bacia¹⁴, identificou um rebaixamento de 10 metros na área estudada entre o ano de referência de 1988 e ano de referência de 2013¹⁵, os dados mostram que a profundidade mínima registrada passou de 12m para 22m.

Notou-se, pela análise dos poços, que não houve redução sensível dos níveis potenciométricos nas áreas próximas ao divisor d'água da bacia. Porém, quando analisada a parte central, também a parte de menor cota altimétrica, verifica-se perdas de potencial hidráulico. Nota-se que há um aumento dos valores mínimos dos níveis estáticos e suas respectivas curvas isopotenciométricas, que reflete nos resultados das superfícies potenciométricas dos mapas (tons de azuis mais escuros).

Esses valores das curvas variaram de 12 para 24 metros, 16 para 26 metros, e 22 para 32 metros nos anos de 1988, 2002 e 2013, respectivamente. Além disso, os mapas mostram que

¹⁴ Os mapas foram gerados considerando informações dos poços presentes na bacia e áreas adjacentes, porém, apenas a área central e sul da bacia possuíam essas informações. Motivo pelo qual os mapas apresentam apenas área da metade da bacia. No entanto, apresentando a porção mais importante, quanto ao uso, impactos e exploração.

¹⁵ Para confecção do mapa potenciométrico do ano de referência para 2013, foram utilizadas informações quanto a campanhas realizadas em setembro de 2010 pela equipe da ANA para confecção do estudo hidrogeológico da região metropolitana de Maceió.

as direções de fluxo predominantes, praticamente não se alteraram ao longo do período analisado, o que configura a característica endorreica da bacia, ou seja, uma bacia sem exutório, onde suas águas escoam na direção da cota altimétrica mais baixa, neste caso, a Lagoa da Coca-Cola – Distrito Industrial.

Diante disso, fica evidente as perdas de potencial hidráulico com os resultados obtidos quanto a infiltração e potencial de recarga, tornando clara a relação destes resultados com um indicativo da perda das reservas aquíferas, áreas permeáveis, pela incapacidade do aquíferos em recompor seu armazenamento. Embora exista uma quantidade razoável de poços bombeando água, essa exploração não seria suficiente para provocar estes resultados apresentados na bacia sem considerar o aumento da impermeabilização dos solos, ocasionada pelo processo de adensamento urbano na região.

5.2.3 Impactos nos cenários futuros

A expansão urbana é um processo dinâmico e inevitável e os seus impactos são significativos em todos os aspectos, qual seja social ou ambiental. Uma das formas de minimizar tais impactos é delinear ações a partir da análise de cenários futuros, para que de alguma forma venha auxiliar a tomada de decisões, possibilitando a demonstração dos impactos que ocorreriam devido à ausência ou a falta de implementação de um planejamento.

Dessa forma, esse estudo, até o momento, demonstrou que o crescimento urbano na área da bacia endorreica, em apenas 25 anos, provocou inúmeras alterações sem levar em conta o real impacto que esta urbanização pode ter provocado, sobretudo, em consequência do aumento da fração das áreas impermeáveis. Sendo assim, foi elaborado um projeto de um cenário que contemplasse uma possível expansão junto com seus possíveis impactos, sobretudo hidrológicos, contribuindo para a tomada de futuras decisões.

O cenário hipotético futurístico foi elaborado para o ano de 2025, considerando a média temporal do cenário analisado (12 anos), cujos valores apresentados foram obtidos por meio dos dados existentes dos anos de 1988, 2002 e 2013, por meio de uma regressão linear (linha de tendência), medida por meio do coeficiente de determinação¹⁶, também chamado de R^2 , ajustado para valores acima 0,9. Foi estabelecido prevendo-se o crescimento da urbanização,

¹⁶ O coeficiente de determinação, também chamado de R^2 , é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a Regressão linear, em relação aos valores observados. O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é modelo, melhor ele se ajusta à amostra.

levando-se em consideração a aplicação das diretrizes estabelecidas na Lei Municipal nº 5.593/2007 (código de urbanismo e edificações do município de Maceió), onde foi generalizada a taxa de permeabilidade de 15% para os novos lotes a serem implantados.

Dessa forma, foi elaborado um mapa de uso e cobertura do solo para o ano de 2025, no sentido de mostrar por meio de uma simulação hipotética, como se configuraria a bacia por meio da simulação das referidas classes. A confecção do mapa partiu de evidenciar o crescimento urbano na área, levando-se em consideração a diminuição das áreas permeáveis, alterações dos referidos valores do CN das classes, e simulações de futuros loteamentos em áreas para provável construção. Convém salientar que os valores simulados foram obtidos por meio da regressão linear com valores médios de 0,96 do coeficiente de determinação (R^2). A figura 47 tenta representar hipoteticamente as classes de uso e cobertura da terra para o respectivo cenário.

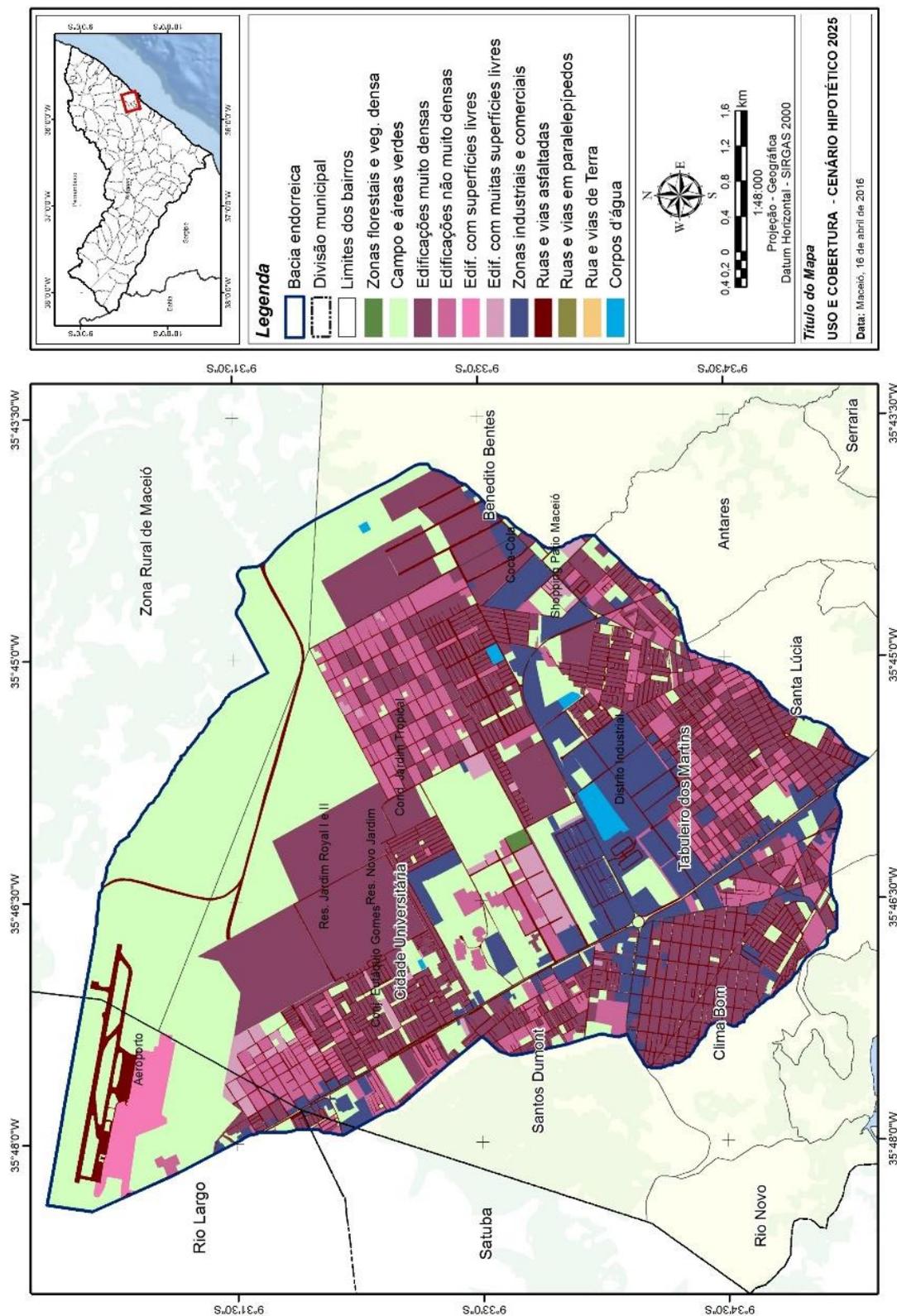
Fica evidenciado, pela análise, que ocorreu uma diminuição considerável das áreas permeáveis, estimando em torno de 60% a porcentagem da área impermeabilizada, sobretudo ao crescimento do contingente populacional que passaram a residir na área da bacia, por volta dos 310.000 (trezentos e dez mil) moradores. Considerando que hoje a população residente na bacia perfaz 24,55% da população de Maceió, a taxa aumentaria para pouco mais de 26%.

Este aumento da impermeabilização irá provocar, sobretudo, uma grande alteração hidrológica, quanto ao escoamento superficial e recarga dos aquíferos. Foi estimado que o valor médio do *CN* passará a ser 87,30, um aumento de 7,9% em comparação com o ano de 1988 que contava apenas com 10,6% da área da bacia impermeabilizada.

Este aumento no valor do *CN*, provocaria um acréscimo significativo no volume e na velocidade do escoamento superficial, sendo visível no aumento dos valores da vazão de pico da bacia que passariam para 332,18m³/s para TR de 5 anos; 406,22 m³/s para TR de 10 anos e 522,5 m³/s para o TR de 25 anos. Um aumento de 21,46 %, 21,61 % e 20,38 % para os tempos de retorno de 5, 10 e 25, respectivamente, em comparação aos valores dos picos de vazões do ano 2013.

Quando analisamos o tempo de concentração, foi estimado que o mesmo decairá para 56 minutos, correspondente a um decréscimo de 4 minutos e 40 segundos em comparação ao cenário de 2013.

Figura 46 – Mapa hipotético de uso e cobertura do solo para o ano de 2025.



Fonte: Autor (2016)

Um outro parâmetro hidrológico analisado, foi quanto a influência e alteração do uso e ocupação da bacia quanto a recarga dos aquíferos, verificando-se que as somas das taxas *alta* e *muito alta* do coeficiente de infiltração (*S*) diminuiriam em torno de 30,20%. Um decréscimo em torno de 15% comparado ao cenário de 2013. O mesmo se aplica para a potencialidade de recarga (PR) que passaria a contar com apenas 26,30% da área da bacia com potencial alto de recarga.

Essas estimativas também refletiriam e alterariam o valor do índice do plano de informação quanto situação (estado) de recarga dos aquíferos, que passaria para 66,10% a situação *crítica* da bacia quanto às áreas favoráveis para recarga. Um aumento de 16,83%, o que demonstra a grave situação que os aquíferos irão passar, caso não sejam aplicados meios para contornar tais intervenções.

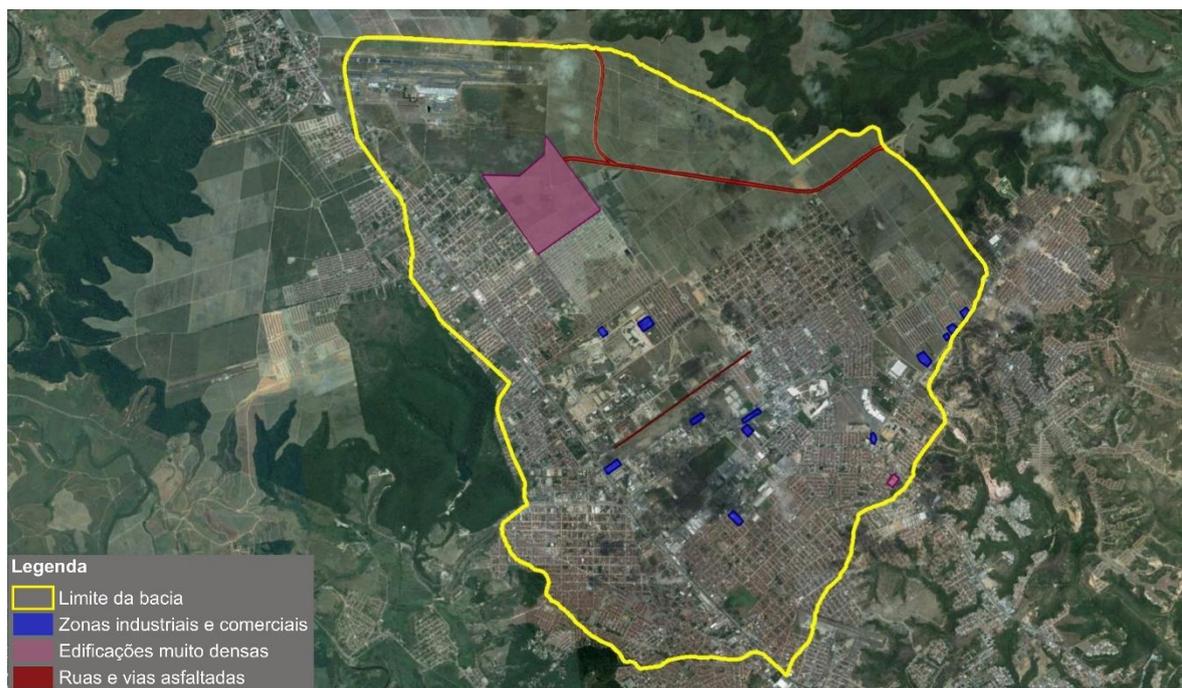
A tabela 12 resume os valores das simulações dos modelos e parâmetros aplicados.

Tabela 12 – Resultados obtidos das simulações dos modelos e parâmetros aplicados.

Valores dos modelos e parâmetros	Cenários			
	1988	2002	2013	2025 (Estimativa)
População	81.000	190.000	230.000	310.000
Área Impermeável (km ²)	4,85	13,2	20,3	27,5
CN médio	80,4	83,29	85,14	87,3
Tempo de concentração (min)	89,14	67,89	60,39	55,61
Coeficiente de infiltração (% da soma da classe muito alta e alta)	75,67	56,04	45,25	30,2
Potencial de recarga (% da soma da classe muito alta e alta)	67,2	49,29	40,65	26,3
Situação da bacia quanto a recarga (% do índice Crítico)	16,71	38,66	49,27	66,1

Tentando comprovar essas estimativas para o ano de 2025, foi realizado uma análise na bacia quanto às alterações identificadas entre o ano de 2013 e o atual (2016). Por meio do software Google Earth e de seu acesso a imagens de satélites de alta resolução, foi possível identificar, pela imagem datada de 02 de janeiro de 2016, as seguintes alterações apresentadas na figura 48:

Figura 47- Alterações identificadas na área da bacia no ano de 2016.



Fonte: Google Earth (2016); Autor (2016)

Foi constatado que em menos de 3 anos, a bacia passou por mudanças significativas, sobretudo, quanto a construção de um novo loteamento na porção NW da bacia, com uma área de 111 hectares, e a construção de um rodovia (20,1 ha) que irá interligar a rodovia AL-105 (Cachoeira do Meirim) à rodovia BR-104 por meio deste novo loteamento e por um acesso paralelo ao aeroporto Zumbi dos Palmares. Quando somadas, apenas estas duas mudanças, verifica-se que foram responsáveis pela diminuição de 126,5 hectares da classe *Campo e áreas verdes* e 4,50 hectares, do pouco que sobra, referente a classe *Zonas florestais e vegetação densa*. Além do aumento da classe *Zonas industriais e comerciais*, um total de 16,36 ha em detrimento da classe *Campo e áreas verdes*.

Essas alterações constataam a preocupação apresentada anteriormente, quanto às implicações hidrológicas que a bacia vem passando e, de certa forma, vem confirmar a preocupação deste estudo em entender as futuras mudanças, quanto ao seu uso e cobertura, sobretudo, quanto ao processo de impermeabilização.

Atenção especial deve-se ter com essa nova rodovia que está sendo finalizada na principal área de recarga da bacia, pois, de certa forma, será um atrativo para construção e financiamento de novos loteamentos às suas margens, o que comprometerá as poucas áreas permeáveis. Mesmo com a aplicação das diretrizes do código de urbanismo e edificações, indicando permeabilidade em 15%, não seria suficiente para conter tais implicações

apresentadas. Seriam necessárias medidas mais drásticas, tais como, a alteração das taxas de permeabilidade contida no Plano Diretor; planos que contemplem sistemas adequados de drenagem levando em consideração a recarga d'água, tais como a implantação de micro reservatórios nos novos loteamentos; além de reestruturação da arborização e aumento de áreas verdes por parte dos órgãos gestores, evitando assim que comprometa ainda mais a fragilidade hidrológica pela qual a bacia endorreica do Tabuleiro do Martins está passando.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com quase 50% de sua área ocupada, hoje a bacia reflete os danos provocados por esta ocupação, principalmente, quanto às implicações hidrológicas. Os dados e resultados obtidos através desse estudo sobre o processo de urbanização e os impactos nos processos hidrológicos na bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, evidencia a falta de um planejamento adequado que minimize os impactos decorrentes da expansão urbana.

As técnicas de geoprocessamento integrada com os modelos aplicados, apresentaram-se como boas alternativas para minimização das dificuldades de espacialização dos elementos hidrológicos e de uso e ocupação do solo. A integração possibilitou, de forma eficiente, representar a variabilidade espacial e temporal dos elementos envolvidos.

Verificou-se, a partir dos resultados da análise multitemporal da cobertura superficial do solo (1988, 2002 e 2013), que o avanço do processo de urbanização na bacia tem significativo efeito sobre o sistema hidrológico da região. O que permitiu conceber o comportamento hidrológico da bacia, servindo de base para quantificar e investigar as mudanças em seus componentes hidrológicos, tais como: mudanças no comportamento de infiltração e armazenamento da camada superficial dos solos; e mudanças no volume de escoamento superficial.

Observou-se que o processo de ocupação diminuiu o tempo de concentração do escoamento, que conseqüentemente, aumentou a velocidade e o volume escoado desde ponto mais distante até a seção de interesse, ou seja, a porção da bacia com a menor cota altimétrica, região onde se encontra o Distrito Industrial, mais especificamente, a Lagoa da Coca-Cola. Que por falta de um planejamento, este local passou por um processo de adensamento que alguns conjuntos habitacionais, como exemplo Conjunto Salvador Lyra, o que tornou a área propensa a eventos de alagamentos.

Os resultados mostraram que em 1988 a bacia apresentava 89,4% de área permeável, o que conduziu a um tempo de concentração maior, e com o decorrer dos anos, notamos um aumento significativo das áreas impermeáveis, devido ao adensamento das ocupações, levando a bacia, no ano de 2013, a ter 44,36% de suas superfícies impermeabilizadas.

A partir dessas verificações pode-se dizer que a intensificação da urbanização vem contribuindo para o aumento da velocidade e volume escoado e, conseqüentemente, a diminuição do processo de infiltração e recarga dos aquíferos. Nesse entendimento, foi verificado que a taxa de infiltração por meio do coeficiente de armazenamento, que os valores

entre os anos estudados diminuiram em torno de 35%. Um resultado preocupante, uma vez que, o processo hidrológico que mais se destaca nesse tipo de bacia é a infiltração.

Desta forma, foi constatado que as áreas propensas a infiltração e recarga dos aquíferos estão diminuindo. A medida que as áreas com características físicas potenciais para recarga diminuí, com baixo grau de inclinação, regiões potencialmente favoráveis à recarga deixam de exercer adequadamente esta função, comprometendo toda a dinâmica do potencial hidráulico das reservas aquíferas da bacia, sobretudo, quanto a recomposição de seu armazenamento.

A expansão territorial da cidade de Maceió é inevitável, em virtude do crescimento populacional. A região do Tabuleiro, a bacia endorreica, por sua vez, é considerada o principal eixo de expansão da cidade, devido às suas extensas áreas planas ocupadas ainda pela cana de açúcar. Assim, torna-a ainda mais preocupante, uma vez que, em apenas 25 anos analisados nesse estudo, a expansão provocou sérios problemas quanto aos processos hidrológicos, sobretudo, escoamento e infiltração, sobretudo pela falta de uma legislação mais rígida e pela não implantação de medidas preventivas que viessem a ordenar a ocupação na bacia.

Os resultados obtidos deixam claro a correlação existente entre o aumento da impermeabilização do solo e as implicações hidrológicas decorrentes. Quanto ao prognóstico para o futuro da bacia, caso não sejam tomadas medidas preventivas, foi avaliado que estas implicações se tornarão cada vez mais danosas, quanto à diminuição do tempo de concentração e da taxa de infiltração, quanto ao aumento da vazão, velocidade e volume escoado.

Neste contexto, o presente estudo pretendeu fornecer informações, que pudessem auxiliar no planejamento da expansão territorial da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, a fim de serem utilizadas para o gerenciamento de futuras ocupações. Desse modo, medidas não-estruturais, como legislação de uso e ocupação do solo, com regras e incentivo para aumento de áreas permeáveis em lotes e a regulação da expansão urbana de futuros loteamentos poderiam reverter essa situação, quanto as implicações hidrológicas.

Portanto, este estudo recomenda, em virtude de tudo que foi exposto quanto aos impactos hidrológicos, que para as futuras ocupações, os gestores e empreendedores busquem meios para favorecer a retenção e infiltração das águas precipitadas, visando o rearranjo temporal das vazões e a diminuição do volume escoado, que conseqüentemente, reduzirá a probabilidade de inundações.

REFERÊNCIAS

- ALEXAKIS, D. D. et al. GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 14, n. 2, p. 413-426, 2014.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió**. Brasília: ANA, SIP, 2011.
- ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J.R.de; GUERRA, A.J.T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 2.ed. Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2007. 320p.
- BACIENSE, Juliana Martins. **Avaliação de Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana baseadas no conceito de desenvolvimento de baixo impacto, com o apoio de modelagem matemática**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, 2013.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 266 p.
- BASTOS, P. C. **Efeitos da urbanização sobre vazões de pico de enchente**. 2009, 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológica, Universidade Federal do Espírito, Vitoria, 2009.
- BEDIANT, P. B., HOLDER, A., BENAVIDES, J. A., and VIEUX, B. E.: Radarbased flood warning system applied to tropical storm Allison, J. **Hydro Engineer.**, 8, p. 308–318, 2003.
- BOTELHO, R.G.M. Bacias Hidrográficas Urbanas. In: Guerra, A.J.T. **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.
- BRANDÃO, Ingrid Neves; FERREIRA, Marlene Elias (2000). Bacia do Rio Pararangaba (São José dos Campos–SP): características físicas e impactos da urbanização. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11, 2000, Rio de Janeiro, **Anais...** São Paulo: SBMET, 2000.
- BRASIL, República Federativa do Brasil, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, Centro Nacional de Pesquisa de Solos - Escritório Regional de Pesquisa e Desenvolvimento Nordeste. Diagnóstico Ambiental do Município de Maceió – AL, **Relatório Preliminar: uso atual, levantamento de solos, potencialidade das terras e áreas de risco para construção civil e poluição**. Recife: EMPBRAPA, 2000, 59 p.
- BRITO, J.L. N.S. Instituto Militar de Engenharia. **Estágio de Fotogrametria Digital para Engenheiros Cartógrafos**, Rio de Janeiro: IMG, 1999.
- BURROUGH, P. A., McDONNELL, R. **Principles of geographical Information Systems**. Oxford University Press, Clarendon, 1998.

CALIJURI, M. L.; MEIRA, A. D.; PRUSK, F. F. Geoprocessamento Aplicado aos Recursos Hídricos. In: XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais....** Lavras: UFLA, SBEA, 1998, p. 200-225

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395- 403, 1996.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de textos, 2005.

CARVALHO, Lina Martins. **Processo de urbanização em área de bacia endorréica: caracterização dos padrões de ocupação dos espaços construídos e dos espaços livres de construção em Maceió-AL**. 2012. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, 2012.

CAVALCANTE, A.T. e WANDERLEY P.R. de M. Recursos hídricos na área do Campus A. C. Simões – UFAL, Tabuleiro do Martins, Maceió - AL. **Revista Scientia ad Sapientiam**, Maceió: n. 10, p. 22-28. 1982.

CAVALCANTE, A.T. **Recursos hídricos subterrâneos da área de Maceió - Alagoas - Brasil**. 1978, 204 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Universidade Federal de Pernambuco, Recife:1978

CAVALCANTE, A.T., WANDERLEY, P.R. de M.; LIMA, R.C. de A. As reservas dinâmicas dos sistemas aquíferos Barreiras e Barreiras/Marituba a partir da análise das hidrógrafas dos rios Pratagy, Messias e Remédios. In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 10, 1992, Recife. **Anais...Recife: SRHN**, 1992. p.397-402.

CAVALCANTE, B. L; INACIO, A. S; GOMES, H. B. Utilização de imagens do satélite world view-2 e do senso raster para análise de bacias hidrográficas - estudo de caso: bacia do Tabuleiro do Martins, Maceió/AL. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hidricos, 20, 2013, São Gonçalo. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2013

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 24, n. 3, p. 459-479, 1988.

CHORMANSKI, J., VOORDE, T. V. d., ROECK, T. D., BATELAAN, O., & CANTERS, F. Improving distributed runoff prediction in urbanized catchments with remote sensing based estimates of impervious surface cover. **Sensors**, 8, 2008. 910–932.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hidrology**. New York: McGraw-Hill Book, 230 p.1988.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1980, 188p.

COELHO NETO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 93-148.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v.20, n.1, p.37-46, 1960.

COLET, Karina Marcondes. **Avaliação Do Impacto da Urbanização Sobre o Escoamento Superficial na Bacia do Córrego do Barbado, Cuiabá-MT**. 2012. Dissertação (Mestrado em Edificações e Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2012.

DAVIS, Elizabeth Guelman; DAVIS JR, Clodoveu Augusto. Uma proposta de modelagem de dados geográficos para hidrologia. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 27, 1997, Vitória. **Anais...Porto Alegre: ABRH 1997**, p. 597-604.

DEFRIES, R. and ESHLEMAN, K. N.: Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future, **Hydrol. Process.** v18, 2183–2186, 2004.

FERREIRA NETO, J. V. et al. Os recursos hídricos da área do Tabuleiro dos Martins Maceió/AL. In: ARAUJO, L. M (Org). **Geografia: espaço, tempo e planejamento**. Maceió: Edufal, 2004.

FERREIRA NETO, J. V. et al. Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas em área do Tabuleiro do Martins – Maceió-Alagoas-BR. **Revista Águas Subterrâneas**, São Paulo: n. 16. 2000.

FERREIRA NETO, José Vicente. **Sistema de macrodrenagem da região do Tabuleiro do Martins – Maceió/AL**. Relatório apresentado em auditoria. Maceió/AL, 2007.

FERREIRA, Marcos César. **Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São. Paulo: Editora Unesp: 2014, 344p.

FERREIRA, Sandra Lessa Da Silva. **Diagnóstico socioambiental da bacia do ribeirão dos Padilhas: o processo de ocupação do loteamento bairro Novo, Sítio Cercado – Curitiba – PR**. 2005, 132 f. Dissertação (mestrado em geografia) – Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FISRWG – Federal Interagency Stream Corridor Restoration Working Group. **Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices**. USA, 2001.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.

FLORENZANO, T.G. **Imagens de satélites para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FONSECA, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. São José dos Campos: INPE, 2000. 105p.

FONTES, A.R.M.; BARBASSA, A.P. Diagnóstico e prognóstico da ocupação e impermeabilização urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre (RS), v. 8, n. 2, p. 137-147, 2003.

FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Regionalização da vazão máxima instantânea com base na precipitação de projeto. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**. Porto Alegre – RS, v. 1, n. 1, p. 5-13, 2004.

GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Estimativa dos Parâmetros do Modelo IPH-II para Algumas Bacias Urbanas Brasileiras. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre – RS, vol. 3, n. 4, p. 103 -120, 1998.

GONÇALVES, R. F. (coord.). **Uso Racional da Água em Edificações**. 1 ed. Vitória: ABES, 2006

GONÇALVES, Tatiana Diniz. **Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal**. 2007. Tese (mestrado em geologia) Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 2007.

HISCOCK, K. M.; LOVETT, A. A. BRAINARD, J. S.; PARFITT, J. P. Groundwater vulnerability assessment: two case studies using GIS methodology. **Quarterly Journal of Engineering Geology**. London, v 28, n. 2, p. 179-194, 1995.

HORTON, R.E., Drainage Basin Characteristics. **Trans. American Geophysical Union**, n.13, p.350-361. 1932.

JACOBSON, Carol R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. **Journal of environmental management**, v. 92, n. 6, p. 1438-1448, 2011.

LANDIM, Paulo M. Barbosa. Sobre Geoestatística e mapas. **Terra e didática**. Campinas - SP, v. 2, n. 1, 2006 .

MARTINS, L. G. B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana**. 2012, 113 f. Dissertação (Mestre em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para São Carlos-SP: USP, 2012.

MELTON, M. A., **An analysis of the relations among elements of climate, surface properties and geomorphology**, Technical Report Dept. Geology, Columbia University. 1957.

MORELLI, D. R. T.; BARBASSA, A. P. Planejamento urbano com técnicas de desenvolvimento de baixo impacto. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 27, 2009, Campo Grande. **Anais...Campo Grand: SBRH**, 2009

MOURA, Ana Clara M. **Geoprocessamento na Gestão e Planejamento Urbano** 3. ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2014. 212p.

MÜLLER, V.C. A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic. **the Clinch Mountain Area**. New York, n. 3, p. 0-30, 1953.

NEVES, M. G. F. P.; SOUZA, V. C. B.; PEPLAU, G. R.; SILVA JÚNIOR, R. I.; PEDROSA, H. T. S.; CAVALCANTE, R. B. L. (2007). Características da bacia do Riacho Reginaldo em Maceió-AL e suas implicações no escoamento superficial. In XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17, 2007, São Paulo, **Anais...** São Paulo: SBRH, 2007.

NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1998.

NUNES, Fabrizia Gioppo. **A influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do Rio Atuba**. 2007, 175 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) - Setor de Ciências da Terra, Pós-Graduação em Geologia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba: 2007. 175 f.

NUNES, Fabrizia Gioppo. Modelagem Hidrológica e Técnicas de Geoprocessamento na Estimativa da Impermeabilização do Solo E Escoamento Superficial da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns - Goiânia (Go). **Ateliê Geográfico**, v. 6, n. 2, p. 55–74, 2012.

NUNES, Fabrizia Gioppo; FIORI, Alberto Pio; FIRPO, Giacomo. Estimativa de coeficientes de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Atuba: Curitiba e região metropolitana Paraná/Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 65, p. 27-39, 2011.

NUNES, R. T. S. **Métodos Para Inserção de Técnicas Em Gestão De Águas Pluviais no Processo De Planejamento e Desenho Urbano: Estudos de Caso em Guarantã do Norte, na Região Amazônica Brasileira, e na Região Metropolitana de Melbourne, Austrália**. 2011, 194 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro:2011.

ONDIEKI, C.M; MURIMI, S.Applications of geographic information system.. **Environmental Monitoring**, Vol. 2, p. 314-34. 2011.

PEDROSA, Valmir A. **O controle da urbanização na macrodrenagem de Maceió**: Tabuleiro dos Martins. 1996, 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1996.

PEPLAU, G. R. **Influência da variação da urbanização nas vazões de drenagem na Bacia do Rio Jacarecica em Maceió-AL**. 2005, 144f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife: 2005

PFRAFSTETTER, Otto. **Chuvvas Intensas no Brasil: Relação entre Precipitação, Duração e Frequência de Chuvvas Registradas com Pluviógrafos em 98 Postos Meteorológicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1982. 426 p.

POWELL, R. L.; ROBERTS, D. A.; DENNISON, P. E.; HESS, L. L. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, n. 106, p. 253-267, 2007.

RENNÓ, Camilo Daleles; SOARES, João V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. In: CAMARA, Gilberto; e MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira (Org.) **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. Belo Horizonte: INPE, 2003

RIBEIRO, R. A.; AYMONE, J. L. F.; LEÃO, S. Z. Aplicação do Geoprocessamento no estudo da impermeabilidade urbana. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional. In: Encontro de Modelagem Computacional, 9. Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte: CEFET/MG e IRRJ/UERJ, 2006.

ROY, Allison H. et al. Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. **Environmental management**, v. 42, n. 2, p. 344-359, 2008.

SÁ FILHO, José A. R. **Avaliação qualitativa das águas no sistema da macrodrenagem da bacia do Tabuleiro do Martins – Maceió/AL**. 2010. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, Alagoas, 2010.

SANTOS, Cilícia Dias dos. A formação e produção do espaço urbano: discussões preliminares acerca da importância das cidades médias para o crescimento da rede urbana brasileira. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté: v.5, n. 1, p. 177-190. 2008.

SANTOS, Clécio do Nascimento. **Padrões de ocupação intralotes na bacia endorreica do tabuleiro norte de Maceió/al: estudo de caso do conjunto salvador Iyra**. 2014, 145 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas. 2014

SANTOS, Milton. **A Urbanização Brasileira**. 3. Ed. São Paulo: Edusp, 2005.

SANTOS, Ricardo José Queiroz; LIMA, Rochana Campos de Andrade e FERREIRA NETO, José Vicente. Geomorfologia do Tabuleiro como consequência do neotectonismo. In: ARAUJO, L. M (Org). **Geografia: espaço, tempo e planejamento**. Maceió: Edufal, p. 255-268, 2004.

SANTOS, Ricardo José Queiroz, NETO, José Vicente Ferreira, WANDERLEY, Perillo Rostan de Mendonça. e CAVALCANTE, Abel Tenório. Simulação Do Rebaixamento dos Sistemas Aquíferos em Área do Tabuleiro do Martins–Maceió–Alagoas–BR. In: I Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas,1, 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 2000.

SANTOS, V. D. dos. **Drenagem Urbana Em Áreas Especiais: O Caso Da Bacia Fechada Do Bairro De Oitizeiro, João Pessoa-PB**. 2006, 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Pós- Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa: 2006.

SCHECHI, R. G. **Avaliação Da Capacidade Potencial De Armazenamento De Água Da Bacia Hidrográfica Do Rio Pequeno – São José Dos Pinhais – PR.** 2012, 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Pós- Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR: 2012.

SCS - Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**, Section 4, Hydrology. Department of Agriculture, Washington, 1972. 127p.

SILVA, V. A.; AMORIM, R. R.; SANTOS FILHO, M. C. F. A utilização de técnicas de geoprocessamento para modelagem de cenários de uso e perda de solo na bacia hidrográfica do Rio Colônia no litoral sul da Bahia (BRASIL). VI Seminário Latino Americano de Geografia Física, 7, 2010, Coimbra. **Anais...** Coimbra, Portugal: SLAGF 2010.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, vol. 10. n°1, p. 5-23, jan./mar. 2005.

SLONECKER, E. T., JENNING, D.; GAROFALO, D. Remote sensing of impervious surface: A review. **Remote Sensing Reviews**, v. 20. p. 227–255, 2001.

SNSA - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org). **Águas Pluviais: planejamento setorial de drenagem urbana: guia do profissional em treinamento: nível.** Salvador: ReCESA, 2008. 95p

SOUZA, Christopher Freire; CRUZ, Marcus Aurélio Soares; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre – RS, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.

SOUZA, Íris de Marcelhas. **Sensoriamento Remoto Orbital Aplicado a Estudos Urbanos.** São José dos Campos: INPE, 2012

SOUZA, J. C. O; CONCEIÇÃO, J. Aplicação do geoprocessamento na análise da ocupação urbana da bacia do Tabuleiro do Martins, Maceió-Alagoas. In: III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 3, 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju: EMBRAPA, 2006.

SPIN, Anne Whiston. **O Jardim de Granito: A Natureza no Desenho da Cidade.** São Paulo: Editora da UFSP, 1995.

SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Manual de drenagem urbana–Região metropolitana de Curitiba/PR**, versão 1.0. Curitiba: SUDERHSA, 2002.

TASSI, Rutinéia; BASTOS, Cezar Augusto Burkert; MIRANDA, Talita Caroline. Aspectos metodológicos sobre o emprego do método do SCS com auxílio de ferramentas de geoprocessamento no projeto de estruturas de drenagem de uma rodovia. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. Rio Grande – RS, n.7, p.27-37, 2005.

TAVANTI, D. R.; BARBASSA, A. P. Contribuições do planejamento urbano às questões hidrológicas e ambientais. In: IV Congresso Luso Brasileiro para o Planejamento, Urbano, Regional, Integrado e Sustentável 4,2010, Faro. **Anais...**Faro, Portugal: 2010

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

_____. Águas Urbanas. In TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (org.). **Inundações Urbanas na América do Sul**, Porto Alegre: ABRH, 2003. p.11-44.

_____. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. 4. ed. Brasília: Ministério das Cidades. 2005. 194 p.

_____. Água no meio urbano. In: Rebouças, A. da C. et al (org.). **Águas doces no Brasil**. 3ª Ed. São Paulo: Escrituras, P.399-432. 2006.

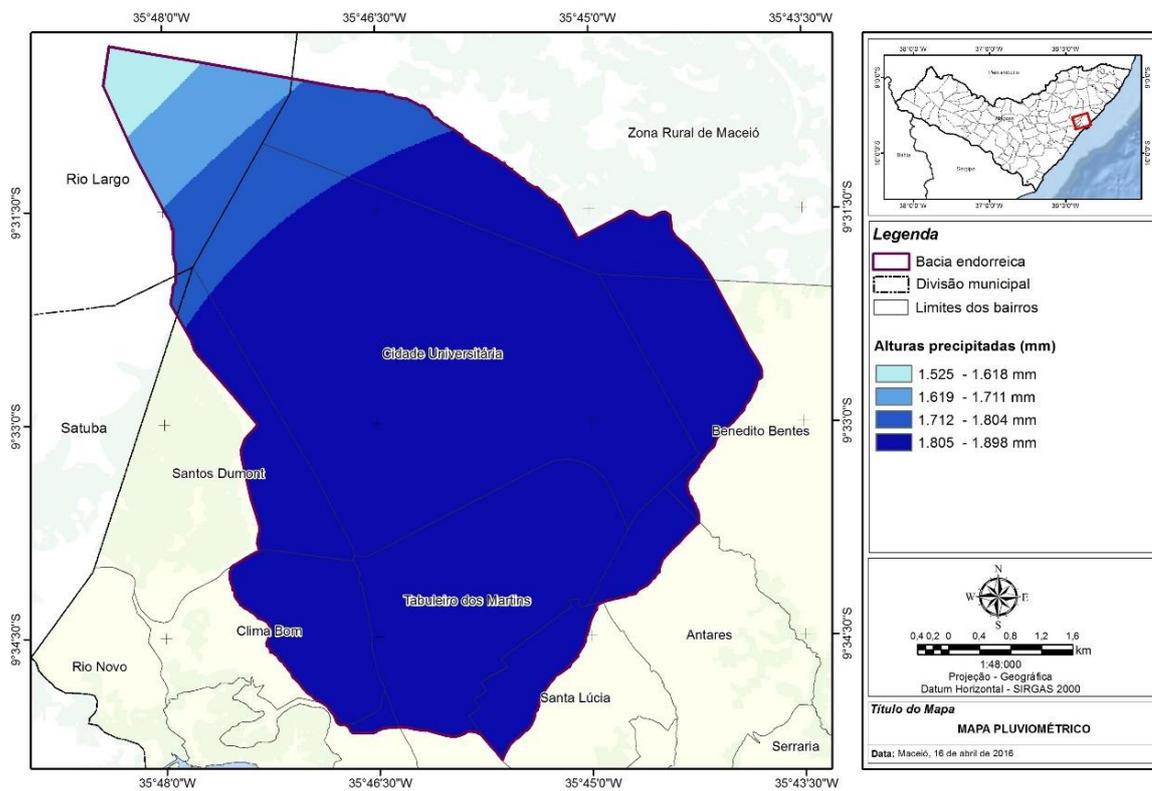
VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia Aplicada**, Ed. McGraw Hill, São Paulo, 1975, 245 p.

WISLER, C.D. & BRATER, E.F., **Hidrologia**. Rio de Janeiro: Aliança, 1964. 484 p.

XAVIER DA SILVA, J. **Geoprocessamento para Análise Ambiental**. Rio de Janeiro: edição do autor, 2001.

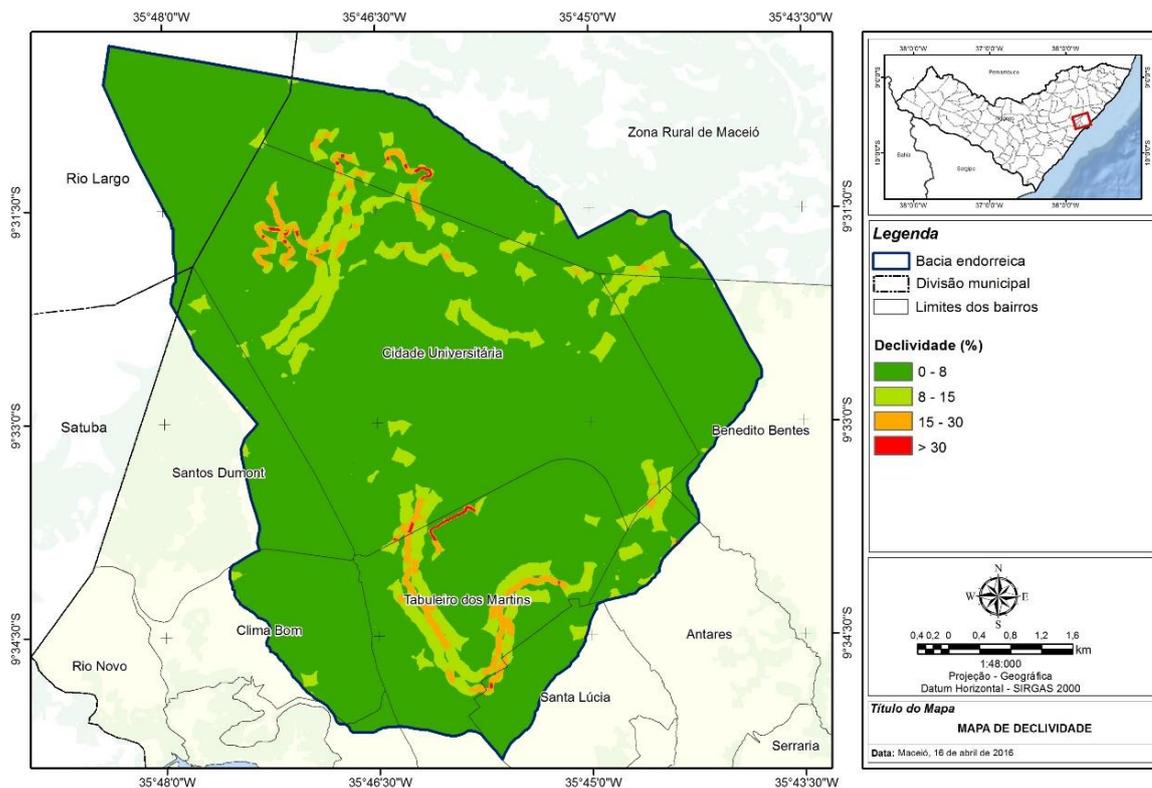
APÊNDICES

APÊNDICE A – Mapa de pluviosidade da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins



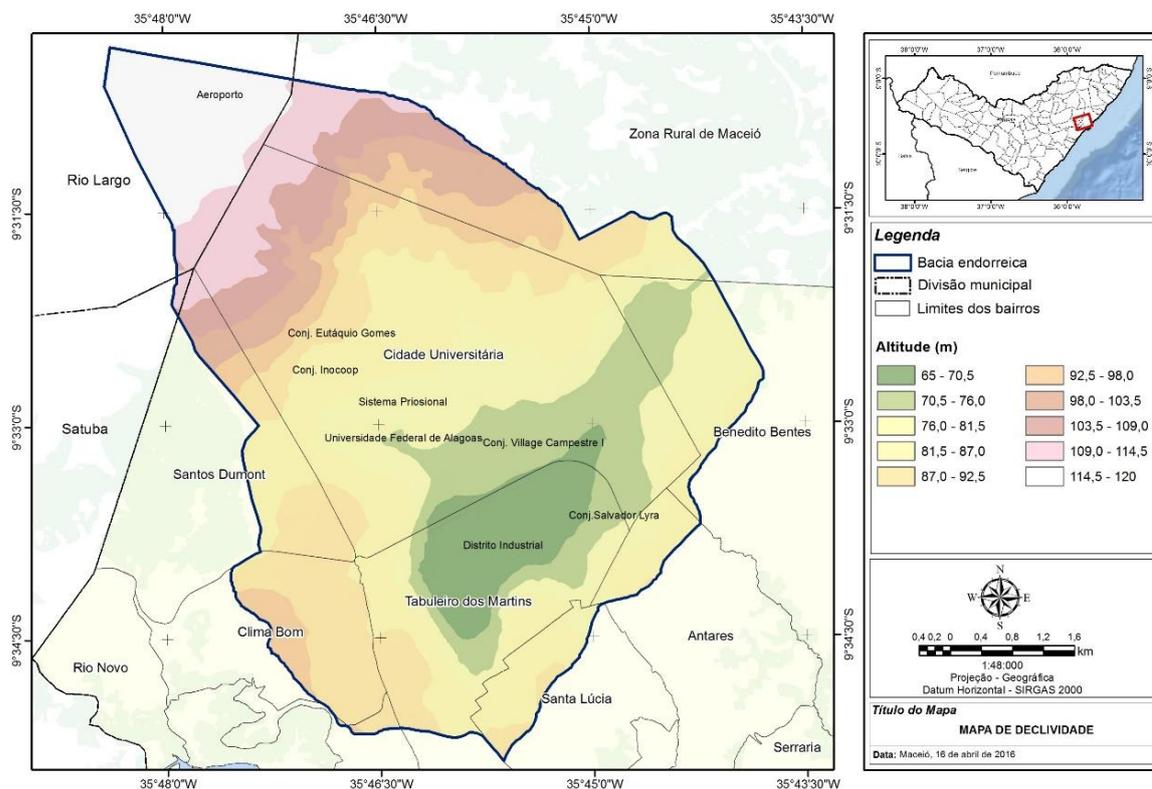
Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE B – Mapa de declividade da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins



Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE C – Mapa hipsométrico da bacia endorreica do Tabuleiro do Martins



Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE D

Quadro 1 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 1988 - TR5

Tempo	Hidrograma Unitário	Precipitação Efetiva													Hidrograma (m³/s)		
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,086	5,611	6,222	3,949	3,426	3,011	2,356	2,153	1,983			
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	2,362	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30	4,723	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
45	7,085	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60	9,446	0,000	0,000	0,000	0,203	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,203
75	8,097	0,000	0,000	0,000	0,406	13,251	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	13,657
90	6,747	0,000	0,000	0,000	0,609	26,501	14,694	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,805
105	5,398	0,000	0,000	0,000	0,813	39,752	29,388	9,325	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	79,278
120	4,048	0,000	0,000	0,000	0,696	53,002	44,083	18,651	8,090	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	124,522
135	2,699	0,000	0,000	0,000	0,580	45,431	58,777	27,976	16,180	7,111	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	156,055
150	1,349	0,000	0,000	0,000	0,464	37,859	50,380	37,302	24,269	14,223	5,564	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	170,061
165	0,000	0,000	0,000	0,000	0,348	30,287	41,983	31,973	32,359	21,334	11,129	5,083	0,000	0,000	0,000	0,000	174,497
180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,232	22,715	33,587	26,644	27,736	28,446	16,693	10,167	4,682	0,000	0,000	0,000	170,902
195	0,000	0,000	0,000	0,000	0,116	15,144	25,190	21,315	23,114	24,382	22,258	15,250	9,364	0,000	0,000	0,000	156,133
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,572	16,793	15,986	18,491	20,318	19,078	20,334	14,046	0,000	0,000	0,000	132,619
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,397	10,658	13,868	16,255	15,898	17,429	18,729	0,000	0,000	0,000	101,233
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,329	9,245	12,191	12,719	14,524	16,053	0,000	0,000	0,000	70,061
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,623	8,127	9,539	11,619	13,378	0,000	0,000	0,000	47,286
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,064	6,359	8,714	10,702	0,000	0,000	0,000	29,839
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,180	5,810	8,027	0,000	0,000	0,000	17,016
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,905	5,351	0,000	0,000	0,000	8,256
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,676	0,000	0,000	0,000	2,676
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE E

Quadro 2 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 1988 - TR10

Tempo	Hidrograma Unitário	Precipitação Efetiva										Hidrograma (m³/s)					
		0,000	0,000	0,000	0,2818	7,6199	7,7605	4,8264	4,1488	3,6247	2,8241		2,5720	2,3629			
0	0,000	0,000	0,000	0,000													0,000
15	2,362	0,000	0,000														0,000
30	4,723	0,000	0,000	0,000													0,000
45	7,085	0,000	0,000	0,000	0												0,000
60	9,446	0,000	0,000	0,000	0,666	0,000											0,666
75	8,097	0,000	0,000	0,000	1,331	17,995	0,000										19,326
90	6,747	0,000	0,000	0,000	1,997	35,989	18,327	0,000									56,313
105	5,398	0,000	0,000	0,000	2,662	53,984	36,653	11,398	0,000								104,698
120	4,048	0,000	0,000	0,000	2,282	71,979	54,980	22,795	9,798	0,000							161,834
135	2,699	0,000	0,000	0,000	1,902	61,696	73,307	34,193	19,595	8,560	0,000						199,252
150	1,349	0,000	0,000	0,000	1,521	51,414	62,834	45,591	29,393	17,120	6,669	0,000					214,541
165	0,000	0,000	0,000	0,000	1,141	41,131	52,362	39,078	39,190	25,680	13,339	6,074	0,000				217,994
180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,761	30,848	41,889	32,565	33,592	34,240	20,008	12,148	5,580				211,630
195	0,000	0,000	0,000	0,000	0,380	20,565	31,417	26,052	27,993	29,348	26,677	18,222	11,160				191,815
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,283	20,945	19,539	22,394	24,457	22,866	24,296	16,741				161,520
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,472	13,026	16,796	19,565	19,055	20,825	22,321				122,060
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,513	11,197	14,674	15,244	17,354	19,132				84,114
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,599	9,783	11,433	13,883	15,943				56,641
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,891	7,622	10,412	12,755				35,681
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,811	6,942	9,566				20,319
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,471	6,377				9,848
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,189				3,189
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE F

Quadro 3 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 1988 - TR25

Tempo	Hidrograma Unitário	Precipitação Efetiva										Hidrograma (m³/s)					
		0,000	0,000	0,000	0,7767	10,938	10,194	6,1971	5,2720	4,5738	3,5463		3,2182	2,9480			
0	0,000	0,000															0,000
15	2,362	0,000	0,000														0,000
30	4,723	0,000	0,000	0,000													0,000
45	7,085	0,000	0,000	0,000	0												0,000
60	9,446	0,000	0,000	0,000	1,834	0,000											1,834
75	8,097	0,000	0,000	0,000	3,669	25,832	0,000										29,500
90	6,747	0,000	0,000	0,000	5,503	51,664	24,074	0,000									81,240
105	5,398	0,000	0,000	0,000	7,337	77,495	48,148	14,635	0,000								147,615
120	4,048	0,000	0,000	0,000	6,289	103,327	72,222	29,269	12,450	0,000							223,557
135	2,699	0,000	0,000	0,000	5,241	88,566	96,295	43,904	24,900	10,801	0,000						269,707
150	1,349	0,000	0,000	0,000	4,193	73,805	82,539	58,538	37,350	21,602	8,375	0,000					286,402
165	0,000	0,000	0,000	0,000	3,145	59,044	68,782	50,176	49,800	32,403	16,749	7,600	0,000				287,699
180	0,000	0,000	0,000	0,000	2,096	44,283	55,026	41,813	42,686	43,205	25,124	15,200	6,962				276,395
195	0,000	0,000	0,000	0,000	1,048	29,522	41,269	33,450	35,571	37,033	33,499	22,800	13,924				248,117
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,761	27,513	25,088	28,457	30,860	28,713	30,400	20,886				206,679
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	13,756	16,725	21,343	24,688	23,928	26,057	27,848				154,346
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,363	14,229	18,516	19,142	21,714	23,869				105,833
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,114	12,344	14,357	17,372	19,891				71,078
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,172	9,571	13,029	15,913				44,685
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,786	8,686	11,935				25,406
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,343	7,956				12,299
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,978				3,978
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE G

Quadro 4 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 2002- TR5

Tempo	Hidrograma Unitário	Precipitação Efetiva										Hidrograma (m³/s)				
		0,000	0,000	0,000	0,6803	7,9565	7,3723	4,4957	3,2096	2,8510	2,5645	2,3316				
0	0,000	0,000														0,000
15	3,105	0,000	0,000													0,000
30	6,211	0,000	0,000	0,000												0,000
45	9,316	0,000	0,000	0,000	0,000											0,000
60	12,422	0,000	0,000	0,000	2,113	0,000										2,113
75	10,351	0,000	0,000	0,000	4,226	24,709	0,000									28,934
90	8,281	0,000	0,000	0,000	6,338	49,417	22,894	0,000								78,650
105	6,211	0,000	0,000	0,000	8,451	74,126	45,789	13,961	0,000							142,327
120	4,141	0,000	0,000	0,000	7,043	98,834	68,683	27,923	9,967	0,000						212,450
135	2,070	0,000	0,000	0,000	5,634	82,362	91,578	41,884	19,935	8,854	0,000					250,246
150	0,000	0,000	0,000	0,000	4,226	65,889	76,315	55,845	29,902	17,708	7,964	0,000				257,848
165	0,000	0,000	0,000	0,000	2,817	49,417	61,052	46,538	39,869	26,561	15,928	7,241				249,423
180	0,000	0,000	0,000	0,000	1,409	32,945	45,789	37,230	33,224	35,415	23,892	14,482				224,386
195	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	16,472	30,526	27,923	26,579	29,513	31,857	21,722				184,592
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	15,263	18,615	19,935	23,610	26,547	28,963				132,933
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,308	13,290	17,708	21,238	24,136				85,679
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,645	11,805	15,928	19,309				53,687
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,903	10,619	14,482				31,003
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,309	9,654				14,964
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,827				4,827
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE H

Quadro 5 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 2002- TR10

Tempo	Hidrograma Unitário	Precipitação Efetiva										Hidrograma (m³/s)				
		0,00	0,00	0,000	1,1975	10,2461	8,98942	5,39945	3,82956	3,38765	3,03756		2,75467			
0	0,000	0,00	0,000													0,000
15	3,105	0,000	0,000													0,000
30	6,211	0,000	0,000	0,000												0,000
45	9,316	0,000	0,000	0,000	0,000											0,000
60	12,422	0,000	0,000	0,000	3,719	0,000										3,719
75	10,351	0,000	0,000	0,000	7,438	31,819	0,000									39,257
90	8,281	0,000	0,000	0,000	11,157	63,638	27,916	0,000								102,711
105	6,211	0,000	0,000	0,000	14,876	95,456	55,832	16,768	0,000							182,932
120	4,141	0,000	0,000	0,000	12,397	127,275	83,748	33,535	11,892	0,000						268,848
135	2,070	0,000	0,000	0,000	9,917	106,063	111,664	50,303	23,785	10,520	0,000					312,252
150	0,000	0,000	0,000	0,000	7,438	84,850	93,054	67,071	35,677	21,040	9,433	0,000				318,563
165	0,000	0,000	0,000	0,000	4,959	63,638	74,443	55,892	47,570	31,560	18,866	8,554				305,482
180	0,000	0,000	0,000	0,000	2,479	42,425	55,832	44,714	39,642	42,081	28,299	17,109				272,580
195	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,213	37,221	33,535	31,713	35,067	37,732	25,663				222,145
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	18,611	22,357	23,785	28,054	31,443	34,218				158,467
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	11,178	15,857	21,040	25,155	28,515				101,745
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,928	14,027	18,866	22,812				63,633
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,013	12,577	17,109				36,700
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,289	11,406				17,695
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,703				5,703
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				3,978
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE I

Quadro 6 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 2002- TR25

Tempo	Hidrograma Unitário	Precipitação Efetiva														Hidrograma (m³/s)		
		0,00	0,00	0,00456	2,21162	13,9391	11,5119	6,79601	4,7841	4,2119	3,7629	3,40266						
0	0,000	0,000																0,000
15	3,105	0,000																0,000
30	6,211	0,000	0,000															0,000
45	9,316	0,000	0,014	0,000														0,014
60	12,422	0,000	0,028	6,868	0,000													6,896
75	10,351	0,000	0,043	13,736	43,287	0,000												57,066
90	8,281	0,000	0,057	20,604	86,574	35,750	0,000											142,985
105	6,211	0,000	0,047	27,472	129,861	71,499	21,105	0,000										249,985
120	4,141	0,000	0,038	22,894	173,148	107,249	42,209	14,856	0,000									360,394
135	2,070	0,000	0,028	18,315	144,290	142,998	63,314	29,713	13,080	0,000								411,738
150	0,000	0,000	0,019	13,736	115,432	119,165	84,418	44,569	26,160	11,686	0,000							415,185
165	0,000	0,000	0,009	9,157	86,574	95,332	70,349	59,426	39,239	23,371	10,567							394,025
180	0,000	0,000	0,000	4,579	57,716	71,499	56,279	49,521	52,319	35,057	21,133							348,104
195	0,000	0,000	0,000	0,000	28,858	47,666	42,209	39,617	43,599	46,742	31,700							280,392
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	23,833	28,139	29,713	34,880	38,952	42,267							197,784
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	14,070	19,809	26,160	31,162	35,222							126,422
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,904	17,440	23,371	28,178							78,893
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,720	15,581	21,133							45,434
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,790	14,089							21,879
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,044							7,044
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000							0,000
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000							0,000
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000							0,000

APÊNDICE J

Quadro 7 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 2013 - TR5

Tempo	Hidrograma Unitário		Precipitação Efetiva										Hidrograma (m³/s)			
	0,000	0,000	0,14156	7,19437	7,42075	4,57445	3,90991	3,40105	3,00655	2,69448						
0	0,000	0,000														0,000
15	4,655	0,000														0,000
30	9,310	0,000	0,000													0,000
45	13,965	0,000	0,659	0,000												0,014
60	11,638	0,000	1,318	33,491	0,000											6,896
75	9,310	0,000	1,977	66,982	34,545	0,000										57,066
90	6,983	0,000	1,647	100,473	69,089	21,295	0,000									142,985
105	4,655	0,000	1,318	83,727	103,634	42,590	18,201	0,000								249,985
120	2,328	0,000	0,988	66,982	86,362	63,884	36,403	15,832	0,000							360,394
135	0,000	0,000	0,659	50,236	69,089	53,237	54,604	31,665	13,996	0,000						411,738
150	0,000	0,000	0,329	33,491	51,817	42,590	45,503	47,497	27,992	12,543						415,185
165	0,000	0,000	0,000	16,745	34,545	31,942	36,403	39,581	41,988	25,086						394,025
180	0,000	0,000	0,000	0,000	17,272	21,295	27,302	31,665	34,990	37,630						348,104
195	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,647	18,201	23,749	27,992	31,358						280,392
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,101	15,832	20,994	25,086						197,784
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,916	13,996	18,815						126,422
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,998	12,543						78,893
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,272						45,434
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						21,879
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						7,044
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						0,000
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						3,978
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						0,000

Fonte: Autor (2016)

APÊNDICE K

Quadro 8 - Ordenadas Hidrogramas – ano de 2013 - TR10

Tempo	Hidrograma Unitário	Precipitação Efetiva										Hidrograma (m³/s)			
		0,000	0,000	0,34815	9,38802	9,04005	5,48087	4,65005	4,0249	3,5453	3,16864				
0	0,000	0,000													0,000
15	4,655	0,000	0,000												0,000
30	9,310	0,000	0,000	0,000											0,000
45	13,965	0,000	0,000	1,621	0,000										1,621
60	11,638	0,000	0,000	3,241	43,703	0,000									46,944
75	9,310	0,000	0,000	4,862	87,405	42,083	0,000								134,350
90	6,983	0,000	0,000	4,052	131,108	84,166	25,514	0,000							244,839
105	4,655	0,000	0,000	3,241	109,257	126,248	51,029	21,647	0,000						311,422
120	2,328	0,000	0,000	2,431	87,405	105,207	76,543	43,293	18,737	0,000					333,616
135	0,000	0,000	0,000	1,621	65,554	84,166	63,786	64,940	37,473	16,504	0,000				334,043
150	0,000	0,000	0,000	0,810	43,703	63,124	51,029	54,117	56,210	33,008	14,750				316,751
165	0,000	0,000	0,000	0,000	21,851	42,083	38,271	43,293	46,841	49,512	29,501				271,353
180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	21,041	25,514	32,470	37,473	41,260	44,251				202,010
195	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,757	21,647	28,105	33,008	36,876				132,393
210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,823	18,737	24,756	29,501				83,817
225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	9,368	16,504	22,126				47,998
240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,252	14,750				23,002
255	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,375				7,375
270	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000
285	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				7,044
300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000
315	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				3,978
330	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				0,000

Fonte: Autor (2016)

