

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

FABRICIUS EDUARDO DANIELI FRITSCH

**INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS VAZÕES
DE PICO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO LIGEIRO,
PATO BRANCO – PR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2013

FABRICIUS EDUARDO DANIELI FRITSCH

**INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS VAZÕES DE
PICO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO LIGEIRO,
PATO BRANCO – PR.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Ney Lyzandro Tabalipa

PATO BRANCO

2013



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS VAZÕES DE PICO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO LIGEIRO, PATO BRANCO – PR

FABRICIUS EDUARDO FRITSCH

Aos 14 dias do mês de agosto do ano de 2013, às 8h15min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 19-TCC/2013.

Orientador: Prof. Dr. NEY LYZANDRO TABALIPA (DACOC / UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof^a. Dr^a. ANDREA SARTORI JABUR (DACOC / UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Msc. DANIEL C. GRANEMANN (DACOC / UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus por iluminar meus caminhos e me dar forças nas horas mais difíceis para que este trabalho pudesse ser concluído.

Agradeço a minha família, principalmente meus pais Ildo e Ledi e ao meu irmão Vinicius, por todo o apoio e compreensão. Agradeço aos meus amigos e colegas de turma pelas palavras de incentivo e as críticas construtivas que vieram a melhorar este trabalho. Sem vocês os resultados não seriam os mesmo.

Agradeço a todos os professores que passaram seus conhecimentos e contribuíram para a minha formação, bem como a UTFPR pela disponibilização da estrutura.

Agradeço ao meu orientador professor Doutor Ney Lyzandro Tabalipa, aos membros da banca examinadora, professor Mestre Daniel C. Granemann, pelo tempo disponibilizado e colaboração para as melhorias deste relatório, e em especial a professora Doutora Andrea Sartori Jabur por toda a ajuda e orientação.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o aumento da vazão da bacia do alto Rio Ligeiro, causada pelas áreas já urbanizadas e para futuros processos de impermeabilização considerando a atual condição urbana apresentada, e para futuros processos de impermeabilização. Para isso fez-se o uso de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas para a classificação e quantificação das áreas permeáveis e impermeáveis, e posterior confecção do mapa de coeficiente de escoamento superficial da bacia. Utilizou-se os dois métodos de cálculo de vazões: o Método Racional Modificado e I-Pai-Wu com o objetivo de comparação dos resultados obtidos. Para desenvolver os processos de cálculos se deu por necessário determinar os parâmetros hidrológicos envolvidos: a área da bacia, tempo de concentração, intensidade de chuva, coeficiente de escoamento superficial médio da bacia, coeficiente de abatimento de chuva, coeficiente de retardo em função da declividade, o comprimento do maior talvegue, os tipos de solos, entre outros. O método para a simulação de crescimento baseou-se na lei de zoneamento e no plano diretor da cidade de Pato Branco, onde os quais definem os locais com possibilidades de construção e o número máximo de pavimentos. Além disso, para a elaboração dos mapas, o processo exigiu uma nova classificação das áreas verdes e a utilização de cartas temáticas elaboradas para a bacia como: carta de vegetação nativa, de macrozoneamento, de zoneamento, e carta com o número máximo de pavimentos por zona e o mapa de escoamento superficial atual da bacia do alto Rio Ligeiro. Também foi realizada a verificação em campo das áreas permeáveis e impermeáveis classificadas no trabalho, fazendo a correlação com a realidade apresentada. Os resultados obtidos foram os mapas de escoamento superficial da bacia do alto Rio Ligeiro e as simulações de vazões de pico que apresentam diferenças entre os dois métodos utilizados, como por exemplo, com o tempo de concentração de 25,77 minutos e tempo de retorno de 1 ano a vazão de pico para o Método Racional Modificado apresentou um resultado $Q_1 = 62,7 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que com I-Pai-Wu obteve-se $Q_1 = 82,77 \text{ m}^3/\text{s}$, ambos para a situação atual de impermeabilização do solo. Essa diferença de valores de vazão é ainda maior entre os métodos quando utilizado um tempo de retorno de 10 anos, sendo $Q_{10} = 96,1 \text{ m}^3/\text{s}$ para o Modificado e $Q_{10} = 298,42 \text{ m}^3/\text{s}$ para o I-Pai-Wu. Para as simulações a vazão para um tempo de recorrência de 1 ano foi de $Q_1 = 74,91 \text{ m}^3/\text{s}$ para o caso I e $Q_1 = 83,63 \text{ m}^3/\text{s}$ para o caso II, comprovando assim o aumento das vazões conforme a superfície da bacia foi se impermeabilizando.

Palavras-chave: bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro; mapa de coeficiente de escoamento superficial; vazões de pico.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the increased flow of the basin of the upper Rio Sedan, caused by the already urbanized areas and for future proofing processes considering the current urban condition presented, and future proofing processes. To this made the use of remote sensing and geographic information systems for classification and quantification of permeable and impermeable areas, and subsequent preparation of the map of runoff coefficient of the basin. We used both methods of calculation of flows: the Rational Method and Modified I- Pai-Wu - with the aim of comparing the results obtained. To develop the processes necessary calculations are made by determining the hydrological parameters involved: the basin area, time of concentration, rainfall intensity, average runoff coefficient of the basin subsidence coefficient of rain, hysteresis depending on slope the length of the longest talvegue, soil types, among others. The method for simulating growth was based on the law of zoning and master plan of the city of Pato Branco, which define the locations with possibilities of construction and maximum number of decks. Furthermore, for the preparation of maps, the process required a new classification of the green areas and the use of thematic maps prepared for the basin as: letter of native vegetation, the macro-zoning, zoning, and chart with the maximum number of floors per zone map and runoff current Basin in the upper Rio Light. We also carried out field verification of permeable and impermeable areas classified at work, making the correlation with the reality presented. The results were maps runoff basin and the upper Rio Slight peak flow simulations show that differences between the two methods used, for example, the concentration time of 25.77 minutes and return time 1 year peak flow for the Modified Rational Method presented a result $Q_1 = 62.7 \text{ m}^3 / \text{s}$, whereas with I- Pai-Wu obtained $Q_1 = 82.77 \text{ m}^3 / \text{s}$, both for the current situation waterproofing soil. This difference in flow values is even greater among methods when using a turnaround time of 10 years, and $Q_{10} = 96.1 \text{ m}^3 / \text{s}$ for the Modified and $Q_{10} = 298.42 \text{ m}^3 / \text{s}$ for the I-Pai-Wu. For the simulations the flow for a time of recurrence at 1 year was $Q_1 = 74.91 \text{ m}^3 / \text{s}$ for the case I and $Q_1 = 83.63 \text{ m}^3 / \text{s}$ for the case II, thus proving the increased flows as surface basin was if waterproofing

Keywords: watershed of the upper Rio Light; map of runoff coefficient, peak flows.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coeficiente de distribuição espacial da chuva "K"	23
Figura 2 - Localização do município de Pato Branco	32
Figura 3 - Bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro.....	33
Figura 4 - Geologia da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro	35
Figura 5 - Solos da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro.....	36
Figura 6 - Hipsometria da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro.....	38
Figura 7 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizado no trabalho	40
Figura 8 - Declividade da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro	46
Figura 9 – Exemplo da imagem de satélite de parte da área em estudo	48
Figura 10 - Processo de georreferenciamento finalizado	49
Figura 11 – Classificação das áreas permeáveis e impermeáveis	50
Figura 12 - Classificação das áreas permeáveis e impermeáveis.....	51
Figura 13 - Carta temática de escoamento superficial da bacia do alto rio Ligeiro	52
Figura 14 - Processo de sobreposição de mapas	54
Figura 15 - Exemplo em campo de cobertura superficial do terreno: classe de edificações com muita superfície livre (5) e classe de matas e partes rurais (6).....	55
Figura 16 - Exemplo em campo de cobertura superficial do terreno: classe de edificações muito densa (1) e classe de edificações com pouca superfície livre (3)	55
Figura 17 - Exemplo do processo de sensoriamento remoto das classes de cobertura superficial e verificação em campo, classe de edificações muito densas.....	57
Figura 18 - Mapa de vegetação nativa da bacia do alto rio Ligeiro.....	59
Figura 19 - Mapa de macrozoneamento para a bacia do alto rio Ligeiro	60
Figura 20 - Mapa de zoneamento para a bacia do alto rio Ligeiro.....	61
Figura 21 - Número máximo de pavimentos por zona para a bacia do alto rio Ligeiro	62
Figura 22 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro na situação atual	64
Figura 23 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro, caso I.....	65
Figura 24 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro, caso II	66
Figura 25 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas.....	15
Quadro 2 - Coeficiente volumétrico "C2".....	23
Quadro 3 - Valores de coeficiente de escoamento superficial adotados para cidade de São Paulo	25
Quadro 4 - Coeficiente de escoamento superficial em função do tipo de solo, declividade e cobertura vegetal	26
Quadro 5 - Medidas não estruturais de prevenção á enchentes	30
Quadro 6 - Coordenadas UTM da área em estudo	34
Quadro 7 - Coeficientes de escoamento superficiais adotados para a bacia em estudo	44
Quadro 8 - Valores de C para áreas rurais	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual de cada zona temática para atual situação da bacia	67
Tabela 2 - Percentual de cada zona temática para o caso I.....	67
Tabela 3 - Percentual de cada zona temática para o caso II.....	67
Tabela 4 - Coeficiente de escoamento superficial médio para a bacia na atual situação	68
Tabela 5 - Coeficiente de escoamento superficial médio da bacia para o caso I.....	68
Tabela 6 - Coeficiente de escoamento superficial médio da bacia para o caso II.....	69
Tabela 7 - Tempo de concentração de chuva para a área em estudo.....	70
Tabela 8 - Intensidade de chuva para os tempos de retorno e concentração estipulados....	70
Tabela 9 - Coeficiente de retardo pelo efeito da declividade para a bacia do alto Rio Ligeiro	71
Tabela 10 - Vazões pelo Método Racional Modificado para a atual situação da bacia.....	71
Tabela 11 - Vazões pelo Método Racional Modificado para o caso I	71
Tabela 12 - Vazões pelo Método Racional Modificado para o caso II	71
Tabela 13 - Valores de "K" para a bacia em estudo	72
Tabela 14 - Vazões pelo Método I-Pai-Wu para a atual situação da bacia.....	72
Tabela 15 - Vazões pelo Método I-Pai-Wu para o caso I	73
Tabela 16 - Vazões pelo Método I-Pai-Wu para o caso II	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 IMPACTO URBANO NO SISTEMA HIDROLÓGICO	14
2.2 GEOCIÊNCIAS	15
2.2.1 Sensoriamento Remoto	15
2.2.2 Geoprocessamento.....	16
2.2.3 Sistema de Informações Geográficas (SIG).....	16
2.2.4 Noções Básicas de Cartografia.....	16
2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS	17
2.4 MODELOS HIDROLÓGICOS DE TRANSFORMAÇÃO DE CHUVA-VAZÃO.....	18
2.4.1 Método Racional.....	18
2.4.2 Método Racional Modificado.....	19
2.4.3 Método I-Pai-Wu.....	21
2.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL	24
2.5.2 Coeficientes de escoamento Superficial	24
2.6 INTENSIDADE DA CHUVA	26
2.7 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO	27
2.8 CONTROLE DE INUNDAÇÕES	28
2.8.1 Medidas Não Estruturais.....	29
3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	31
3.2 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL	34
3.2.1 Geologia	34
3.2.2 Solos.....	34
3.2.3 Clima	37
3.2.4 Hipsometria.....	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 MATERIAS UTILIZADOS.....	41
4.2 RACIONAL MODIFICADO	41
4.2.1 Intensidade da Chuva	42
4.2.2 Coeficiente de escoamento Superficial Médio	43

4.2.3 Coeficiente de Retardo Através do Efeito da Declividade (F).....	45
4.3 I-PAI-WU	47
4.4 CONFECÇÃO DO MAPA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA BACIA NA ATUAL SITUAÇÃO	47
4.5 SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO URBANO.....	53
4.6 CONTROLE DE CAMPO	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5.1 MAPAS DE VEGETAÇÃO NATIVA, MACROZONEAMENTO E ZONEAMENTO PARA A BACIA DO ALTO RIO LIGEIRO.....	58
5.2 MAPAS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL	63
5.3 VAZÕES	70
5.3.1 Cálculo das Vazões Através do Método Racional Modificado	70
5.3.2 Cálculo das Vazões Através do Método I-Pai-Wu	72
5.4 CONTROLE DE CAMPO	73
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
REFERÊNCIAS	78
ANEXOS.....	82
TABELA DE OCUPAÇÃO DO SOLO NAS MACROZONAS	83

1. INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado das cidades tem como característica a falta de planejamento, a ocupação incorreta do solo e o mau uso dos recursos hídricos. Isso acarreta modificações nas bacias hidrográficas e nos seus cursos naturais.

O impacto da urbanização influencia no regime hidrológico, sendo que inúmeras cidades registram problemas de inundações devido ao aumento do escoamento superficial. A causa deste problema é o revestimento das bacias de drenagem através da impermeabilização pelas obras de engenharia e construções.

A cidade de Pato Branco vem apresentando um registro de enchentes nos últimos anos, principalmente após a urbanização impermeabilizar grande parte da superfície da bacia do Rio Ligeiro. Como consequência deste processo, no ano de 2009 a cidade enfrentou enchentes de grandes proporções em sua área central, causando danos materiais à população e ao poder público.

Essa problemática de enchentes urbanas pode vir a piorar com a grande tendência de crescimento do município, e o destaque no cenário estadual e nacional como um polo industrial e universitário atraindo inúmeras pessoas para residir e trabalhar na cidade.

Para evitar novas enchentes o poder público vem adotando soluções através de obras estruturais de contenção, que têm como característica o alto custo, e nem sempre apresentam grande eficácia.

Com o objetivo de produzir mapas que auxiliaram nas medidas que serão tomadas pra minimizar os danos causados devido às inundações e também servir como orientação ao poder público para um futuro planejamento urbano e melhor manejo da ocupação do solo. Este trabalho faz um estudo da bacia hidrográfica do alto rio Ligeiro e as características que condicionam o seu ciclo hidrológico, além da análise dos problemas causados pelo processo de urbanização no sistema de drenagem.

Para isso foram utilizados modelos hidrológicos que transformam chuva em vazão, considerando principalmente a impermeabilização do solo e sua relação direta com o aumento das inundações urbanas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar o aumento da vazão da bacia do alto Rio Ligeiro, causada pelas áreas já urbanizadas e para futuros processos de impermeabilização, utilizando modelos hidrológicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Mapear o atual uso e ocupação do solo da bacia do alto rio Ligeiro;
- Utilizar técnicas de sistemas de informações geográficas (SIG) e sensoriamento remoto, para levantamento das áreas impermeáveis e permeáveis;
- Confeccionar mapas de índices de coeficientes de escoamento superficial através de imagens de satélite e simulações de crescimento urbano para a bacia do alto rio Ligeiro;
- Aplicar modelos hidrológicos para a determinação do aumento da vazão.

1.2 JUSTIFICATIVA

O município de Pato Branco apresenta uma problemática de enchentes urbanas causadas principalmente após a bacia do Rio Ligeiro ter sido impermeabilizada. Esse trabalho evidencia que com uma ocupação do solo incorreta esse problema só tende a aumentar, trazendo mais transtornos, custos e exposição ao risco a população e o poder público.

Devido ao alto custo de obras estruturais de contenção de enchentes e nem sempre eficientes como foram projetadas, busca-se resolver problemas de

inundações com um melhor planejamento urbano e conscientização sem custos elevados, ambientalmente corretos e que se tenha uma melhor eficiência, daí a importância deste estudo.

Essa pesquisa limitou-se em analisar o comportamento do escoamento superficial que é o principal causador de enchentes e é diretamente proporcional ao crescimento urbano, e a bacia do alto Rio Ligeiro onde se encontra inserido o perímetro urbano do município de Pato Branco, e ali que estão as superfícies mais impermeabilizadas. Além de mostrar a atual situação, foram feitas simulações de crescimento urbano e cálculo das vazões para estes estudos de caso, mostrando que sem um melhor planejamento urbano vai ocorrer aumento na vazão da bacia ocasionando novas enchentes.

Essa avaliação do crescimento urbano foi feita a partir do plano diretor e lei de zoneamento, e os cálculos de vazão através de modelos consagrados de transformação chuva-vazão o que garante a viabilidade do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IMPACTO URBANO NO SISTEMA HIDROLÓGICO

Nos últimos anos o homem tem participado com grande intensidade e acelerado as modificações no ciclo hidrológico das bacias hidrográficas.

Temos como exemplo destas modificações as enchentes urbanas que podem ser destacadas como um dos principais desastres ambientais no Brasil. Isso se deve ao rápido crescimento urbano, característico de países em desenvolvimento e índices pluviométricos altos.

A impermeabilização do solo aumenta o volume de escoamento superficial que é a principal causa de enchentes urbanas (NUNES, 2007).

Segundo Tucci e Collischonn (1998, p. 2) à medida que a cidade se urbaniza, em geral, ocorrem os seguintes impactos: aumentos das vazões máximas devido ao aumento da capacidade de escoamento através de condutos e canais e impermeabilização das superfícies, aumento da produção de sedimentos devido à desproteção das superfícies.

É observado que os problemas ocorrem devido ao mau planejamento das cidades, poluição e uso incorreto dos recursos hídricos.

O quadro 1 mostra a relação de causa e o efeito das atividades urbanas no sistema de drenagem.

Causas	Efeitos
Impermeabilização	Maiores picos e vazões
Redes de drenagem	Maiores picos e jusante
Lixos	Degradação da qualidade da água; Entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgotos deficientes	Degradação da qualidade da água; Molétias de veiculação hídrica; Inundações
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes; Mais erosão; Assoreamento em canais e galerias
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos; Maiores picos; Maiores custos de utilidades públicas

Quadro 1 - Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas

Fonte: TUCCI *et al* (2009, p. 807).

2.2 GEOCIÊNCIAS

2.2.1 Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto é definido como a utilização em conjunto de equipamentos processadores de dados, sensores e equipamentos de transmissão de dados a bordo de aeronaves, ou outras plataformas, tendo como objetivo estudar processos, eventos e fenômenos na superfície terrestre, através de interações entre radiação eletromagnética e as propriedades dos objetos, sem ocorrer contato físico com eles (NOVO, 2010).

2.2.2 Geoprocessamento

Rocha (2000) elucida que o geoprocessamento é a integração de vários programas, entidades, dados, disciplinas, equipamentos, metodologias e pessoas para a coleta, tratamento, análise e apresentação de informações para mapas digitais georreferenciados.

Segundo Tabalipa (2002) o geoprocessamento é a ferramenta que consegue diminuir os erros acumulados através da fragmentação das ciências. Problemas complexos da ocupação urbana e de planejamento urbano requerem uma mudança de visão, onde devem ser analisados todos os fatores envolvidos juntamente e não isoladamente.

2.2.3 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Segundo Florenzano (2007) o SIG utiliza técnicas computacionais e matemáticas para tratamento de dados geográficos. Esse sistema permite o armazenamento e integração de informação em diferentes fontes e escalas, sendo que as localizações geográficas são definidas através de coordenadas. O sistema de informações geográficas tem grande utilidade para o planejamento de cidades, estudo e monitoramento do meio ambiente.

2.2.4 Noções Básicas de Cartografia

Segundo Gaspar (2005) um sistema de coordenadas referencia posições no espaço através de medidas de comprimento, ângulo, ou ambos, tomando de início um ponto conhecido. Temos como exemplo deste sistema as latitudes e longitudes, porém não são as únicas formas de referenciar posições na superfície terrestre. Outra forma são as grades geográficas que se baseiam na rede de meridianos e paralelos e as grades cartesianas que estabelecem um sistema de coordenadas

retangulares sobre projeções cartográficas. O sistema UTM (*Universal Transverse Mercator*) é um exemplo de união de grades geográficas e quadricula cartográfica. Nesse sistema a Terra é dividida em 60 fusos de 6° de amplitude longitudinal, onde cada fuso é numerado de 1 a 60 a partir do semimeridiano inferior de Greenwich e são representados na projeção cilíndrica de Mercator Traversa. As referências de posição do sistema UTM são feitas através de duas coordenadas retangulares, X e Y, e a designação do fuso que pertencem.

2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

A hidrologia se volta para os problemas que envolvem a utilização e preservação dos recursos hídricos, baseando-se na observação do meio ambiente e analisando os fenômenos naturais que influenciam no sistema hidrológico. Estes fenômenos tais como as precipitações, evapotranspiração, infiltração, escoamentos superficiais, escoamentos subterrâneos e deflúvios, são relacionados para estabelecer a capacidade de armazenamento de água de uma bacia. Como se tem inúmeros processos envolvidos há diversos modelos hidrológicos (NUNES, 2007).

Segundo Enomoto (2004, p.18) modelo hidrológico pode ser considerado como uma ferramenta desenvolvida para representar o comportamento da bacia hidrográfica, prever condições futuras e/ou similar situações hipotéticas no intuito de avaliar impactos de alterações. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física das bacias e dos processos envolvidos, o que tem muito contribuído para o desenvolvimento de um grande número de modelos.

Como existe um grande número de elementos envolvidos na utilização de um modelo hidrológico, a escolha do modelo para Tucci (2005) deve ter os seguintes aspectos:

- **Objetivo do estudo:** o modelo hidrológico deve atender o objetivo para o qual é utilizado, pois há modelos com muitos parâmetros que se tornam ineficientes quando não se tem a necessidade de um grande detalhamento;
- **Características da bacia e do rio:** como há diferença nas características físicas e climáticas de uma bacia para outra, um mesmo modelo dificilmente atenderá todos os sistemas;

- **Disponibilidade de dados:** existem metodologias sofisticadas que necessitam de muitas informações e são inviabilizadas de se utilizar por falta de parâmetros conhecidos da bacia. Em contra partida há outros modelos que se utilizam de poucos parâmetros e podem ser úteis para resolver alguns problemas.
- **Familiaridade com o modelo:** o melhor modelo é aquele em que o usuário tem mais prática ou que mais se identifica dentro dos que podem ser aplicados a determinado problema.

2.4 MODELOS HIDROLÓGICOS DE TRANSFORMAÇÃO DE CHUVA-VAZÃO

Os modelos precipitação-vazão segundo Tucci (2005) devem descrever o ciclo hidrológico da bacia, ou seja, a distribuição espacial da chuva, as perdas por interceptação, evapotranspiração, infiltração da água no solo, percolação, água subterrânea, escoamento superficial e sub-superficial.

Carvalho e Da Silva (2006) elucidam que os modelos de transformação chuva-vazão que podem vir a ser utilizados em projetos de obras hidráulicas são os modelos calibrados baseados no hidrograma unitário e que apresentam uma boa precisão, e os não calibrados que tem média precisão e são baseados nos método racional.

2.4.1 Método Racional

Um dos métodos mais utilizados para estimativa de vazão máxima, pois une todos os processos em um coeficiente, simplificando a sua fórmula.

É utilizado para o estudo de cheias em bacias de pequeno porte (menores que 0,5 km²), sendo a vazão de pico determinada em função da precipitação e da área da bacia. Na Equação 1 é apresentado o método racional:

$$Q = \frac{C.i.A}{3,6} \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão de pico, em m³/s;

i = intensidade máxima de chuva, em mm/h;

C = coeficiente de escoamento superficial ou deflúvio, adimensional;

A = área da bacia, em km².

2.4.2 Método Racional Modificado

O método racional foi desenvolvido originalmente para determinar as vazões de pico em bacias hidrográficas menores, porém com algumas modificações deste método é possível determinar a vazão máxima para bacias de médio porte.

Segundo a Norma DE 01/HID-002 do Departamento de estradas de rodagem do estado de São Paulo - DER (2001), a metodologia de cálculos hidrológicos para determinação das vazões de projeto será definida em função das áreas das bacias hidrográficas, conforme a seguir indicadas:

- Método Racional, áreas < 50 ha;
- Método Racional Modificado, 50 ha ≤ áreas ≤ 100 ha;
- Método de Ven Te Chow ou U.S Soil Conservation Service, áreas > 100 ha.

Segundo Franco (2004) a prefeitura de Porto Alegre – RS adota um modelo semelhante usando na fórmula do método racional um coeficiente de abatimento embutido na área da bacia. Fazendo $A^{0,95}$ para áreas de 30 até 50 há, e $A^{0,90}$ para áreas de 50 até 150 há, que equivalem aos fatores de ajuste de $f = A^{-0,05}$ e $f = A^{-0,10}$, respectivamente.

Incorporando o coeficiente de retardo é obtida uma melhor estimativa da vazão de máxima de escoamento superficial. Este coeficiente é apresentado de duas formas por Pinto et al. (1976, p 124), nas Equações 2 e 3 respectivamente:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt[10]{100A}} \quad (2)$$

Onde:

A = área da bacia, em km^2 ;

n = coeficiente em função da declividade da bacia, sendo:

$n = 4$: para bacias de declividade inferior a $5/1000$;

$n = 5$: para declividades até $1/100$;

$n = 6$: para declividades maiores que $1/100$.

e também:

$$\varphi = \frac{1}{n\sqrt{10L}} \quad (3)$$

Onde:

L = comprimento do talvegue, em km ;

n = coeficiente em função da declividade da bacia, sendo:

$n = 3,5$: para declividades fortes;

$n = 3$: para declividades médias;

$n = 2,5$: para declividades fracas.

Assim a fórmula do Método Racional Modificado, segundo Pinto et al. (1976, p. 123), é definida pela Equação 4 como:

$$Q = \frac{C.i.A}{3,6} \varphi \quad (4)$$

Onde:

Q = vazão máxima, em m^3/s ;

i = intensidade máxima de chuva, em mm/h ;

C = coeficiente de escoamento superficial médio ou deflúvio, adimensional;

A = área da bacia, em km^2 .

f = coeficiente de ajuste de distribuição da chuva, adimensional;

φ = coeficiente de retardo, adimensional.

2.4.3 Método I-Pai-Wu

Este método é derivado do Método Racional e possui um maior aprimoramento para ser aplicado em bacias com área de até 200 km².

Segundo a norma DP- H06 (1999) do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE/SP os fatores que vão interferir no cálculo da vazão de pico da bacia através deste método são:

- Forma, área e declividade da bacia;
- Intensidade e distribuição da chuva crítica;
- Características da superfície da bacia (impermeabilização e utilização e grau de saturação do solo, depressões ou bacias de acumulação que diminuem os picos de cheias);
- Tempo de escoamento superficial;
- Tempo de concentração;
- Tempo de pico.

Desta forma a Expressão 5 mostra o Método I-Pai-Wu.

$$Q = (0,278 \cdot C \cdot I \cdot A^{0,9}) \cdot K \quad (5)$$

Sendo:

Q = vazão de pico, em m³/s;

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

I = intensidade de chuva, em mm/h;

A = área da bacia, em km²;

K = coeficiente de distribuição espacial da chuva, adimensional.

O coeficiente de escoamento superficial “C” é dado pela Fórmula 6.

$$C = \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{2}{1+F} \quad (6)$$

Onde:

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

C_1 = coeficiente de forma, adimensional;

C_2 = coeficiente volumétrico de escoamento, adimensional;

F = fator de forma da bacia, adimensional.

Ao contrário do Método Racional que admite o tempo de duração igual ao tempo de concentração em uma chuva crítica, o I-Pai-Wu considera que bacias de forma alongada podem apresentar tempo de concentração maior que o tempo de pico. Assim deve se levado em consideração o efeito da forma da bacia, que é calculado através do coeficiente de forma que é exposto na Equação 7.

$$C_1 = \frac{t_p}{t_c} \quad (7)$$

Sendo:

t_p = tempo de pico;

t_c = tempo de concentração.

Para bacias alongadas " C_1 " deve ser menor que um, no Método Racional admite-se $C_1 = 1$.

Outra forma de calcular o coeficiente de forma é através da Expressão 8.

$$C_1 = \frac{4}{2+F} \quad (8)$$

Onde:

F = fator de forma da bacia, adimensional.

O fator de forma da bacia " F " é dado pela Equação 9.

$$F = \frac{L}{2\left(\frac{A}{\pi}\right)^{0,5}} \quad (9)$$

Sendo:

L = comprimento do talvegue, em km;

A = área da bacia, em km^2 .

O coeficiente volumétrico " C_2 " é obtido em função do grau de impermeabilização da superfície. O quadro 2 apresenta os valores do coeficiente " C_2 ".

Grau de impermeabilidade da superfície	Coeficiente volumétrico de escoamento C_2
Baixo	0,3
Médio	0,5
Alto	0,8

Quadro 2 - Coeficiente volumétrico " C_2 "

Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (1994)

O coeficiente " K " é encontrado através do ábaco conforme Figura 3.

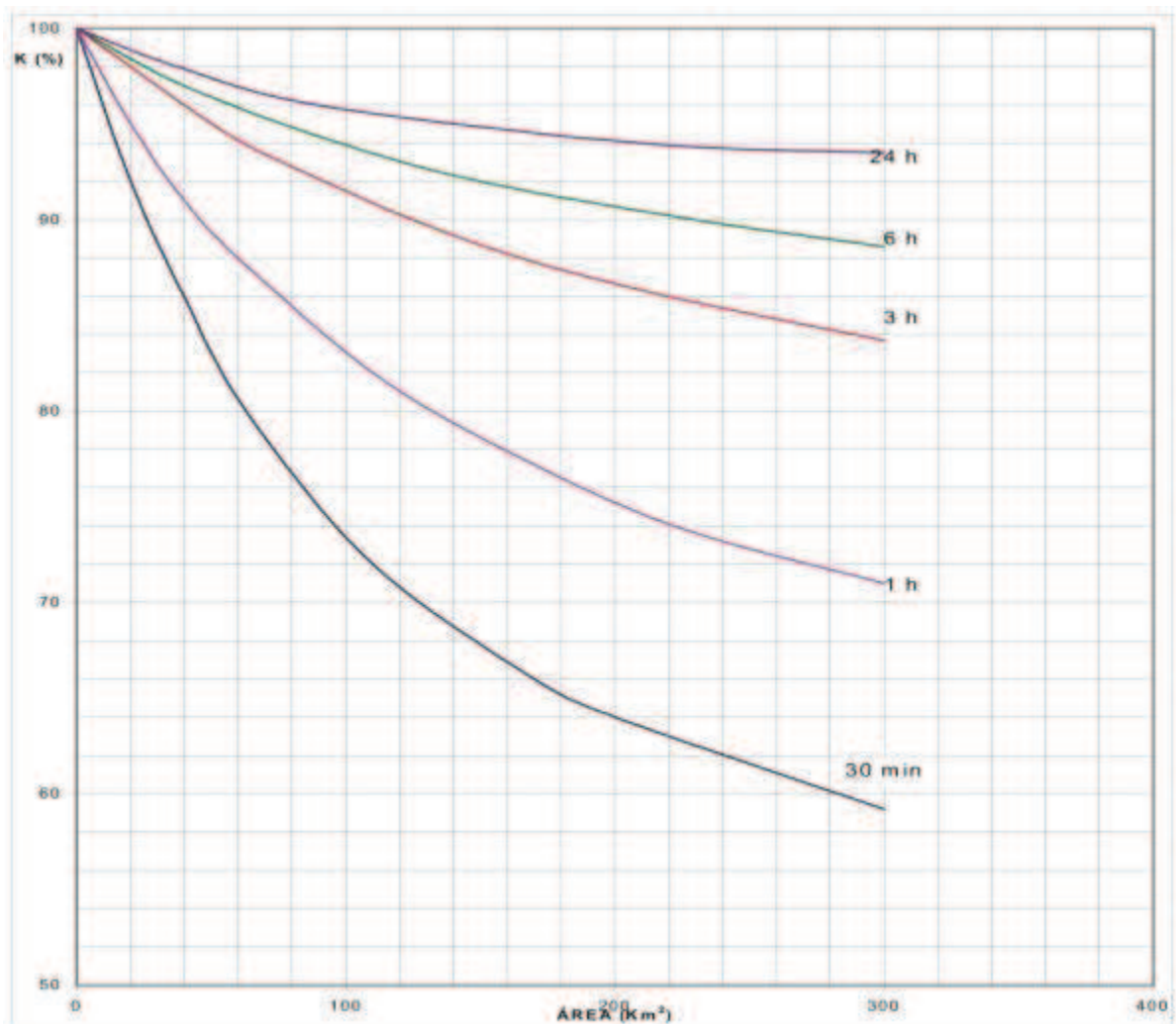


Figura 1 - Coeficiente de distribuição espacial da chuva " K "

Fonte: Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (1994)

2.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial é o segmento do ciclo hidrológico que estuda o movimento da água a partir de uma parcela de chuva que cai sobre um determinado solo e escoar pela superfície (PINTO, 1976).

Segundo Jabur (2010) é de fundamental importância conhecer o escoamento superficial, pois em bacias impermeabilizadas de pequeno porte ele é responsável por vazões de cheia.

Carvalho e Da Silva (2006) explanam que as características climáticas e físicas da bacia são fatores de interferência no escoamento superficial. Nos fatores climáticos se destacam a intensidade e duração da chuva. Pois quanto mais intensa é a precipitação, mais rápido o solo fica saturado, provocando o escoamento da água na superfície. A duração também é diretamente proporcional ao aumento do escoamento superficial, já que quanto mais tempo durar uma chuva, maior é a oportunidade de o solo saturar e se ter chuva excedente.

Ainda segundo os autores os fatores físicos que mais influenciam o escoamento superficial são a área, a forma, a permeabilidade e capacidade de infiltração, e a topografia da bacia.

A influência da área é visível, porque sua dimensão é relacionada com sua maior ou menor capacidade de deter água, ou seja, quanto maior for a bacia, mais água será captada.

Outro fator é a permeabilidade do solo que influencia na infiltração, sendo que solos mais impermeáveis infiltram uma quantidade inferior de água, aumentando o excesso de precipitação.

2.5.2 Coeficientes de Escoamento Superficial

O coeficiente de escoamento superficial geralmente é obtido em função do uso superficial e ocupação do solo e pode ser encontrado em literaturas específicas.

A cidade de São Paulo usa a tabela elaborada por Wilken (1978) e utiliza um período de retorno de 5 a 10 anos.

No quadro 3 se ilustra os coeficientes de escoamento superficial adotados pela cidade de São Paulo e elaborados por Wilken (1978).

Zonas	C
Edificação muito densa: partes centrais, densamente construídas, de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas.	0,70 - 0,95
Edificação não muito densa: partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitação, mas com ruas e calçadas pavimentadas.	0,60 - 0,70
Edificações com poucas superfícies livres: partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,50 - 0,60
Edificações com muitas superfícies livres: partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,25 - 0,50
Subúrbios com algumas edificações: partes de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção.	0,10 - 0,25
Matas, parques e campos de esportes: partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esporte sem pavimentação	0,05 - 0,20

Quadro 3 - Valores de coeficiente de escoamento superficial adotados para cidade de São Paulo
Fonte: Wilken (1978), adaptado.

O quadro 4 apresenta uma outra classificação do coeficiente de escoamento superficial através do tipo do solo, declividade e cobertura superficial.

Declividade (%)	Solo Arenoso	Solo Franco	Solo Argiloso
Florestas			
0 - 5	0,1	0,3	0,4
5 - 10	0,25	0,35	0,5
10 - 30	0,3	0,5	0,6
Pastagens			
0 - 5	0,1	0,3	0,4
5 - 10	0,15	0,35	0,55
10 - 30	0,2	0,4	0,6
Terras Cultiváveis			
0 - 5	0,3	0,5	0,6
5 - 10	0,4	0,6	0,7
10 - 30	0,5	0,7	0,8

Quadro 4 - Coeficiente de escoamento superficial em função do tipo de solo, declividade e cobertura vegetal

Fonte: Carvalho; Da Silva (2006).

2.6 INTENSIDADE DA CHUVA

A intensidade média da precipitação pluvial é obtida com base em dados de estações pluviométricas existentes em cada região. É feito um levantamento estatístico da intensidade da chuva, frequência e duração. Com isso é observado um intervalo de tempo, para um determinado período de retorno, resultando no valor médio de chuva.

Outra forma de se obter a intensidade da chuva é por meio de equações empíricas.

No período de retorno um evento deve no mínimo ser igualado ou superado, e esse período é o inverso da probabilidade de que pelo menos uma chuva com intensidade igual ou superior ocorra em qualquer ano de estudo.

Assim a intensidade de precipitação máxima é encontrada através da Equação 10 (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ).

$$i = \frac{a}{(t+c)^d} T r^b \quad (10)$$

Onde:

i = intensidade da chuva, em mm/h;

t = duração da precipitação, em minutos;

Tr = tempo de recorrência, em anos;

a, b, c, d = parâmetros determinados para cada estação pluviométrica.

2.7 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

O tempo de percurso da água do ponto mais afastado da bacia até a área em estudo é definido como tempo de concentração, e ele passa a ser contado a partir do instante inicial da precipitação. Para bacias urbanas a sua determinação deve ser criteriosa, já que a maioria das fórmulas foi desenvolvida empiricamente em bacias rurais. Outra análise cuidadosa a ser tomada quando na determinação do tempo de concentração, é a grande diferença de resultados obtidos pelos diversos métodos existentes que apresentam como consequência variações significativas nas vazões de picos em hidrogramas de projeto (CANHOLI, 2005).

Existem ábacos e inúmeras fórmulas empíricas que fornecem o tempo de concentração para uma bacia, sendo que as características físicas mais utilizadas são o comprimento e a declividade do talvegue principal. As Equações 11, 12 e 13 são exemplos de fórmulas utilizadas para calcular o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica (PINTO et al, 1976).

Formula de Picking

$$tc = 5,3 \left(\frac{L^2}{I} \right)^{1/3} \quad (11)$$

Sendo:

tc = tempo de concentração, em minutos;

L = distância horizontal do álveolo, em km;

I = declividade média da linha do fundo, em m/km.

Equação de Ven Te Chow:

$$tc = 25,20 \left(\frac{L}{I} \right) \quad (12)$$

Onde:

tc = tempo de concentração, em minutos;

L = extensão do talvegue principal, em km;

I = declividade média do talvegue principal, em m/km.

Fórmula do California Culverts Practice; California Highways and Public Works

$$tc = 53 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (13)$$

Sendo:

tc = tempo de concentração, em minutos;

L = extensão do talvegue, em km;

H = a diferença de nível entre o ponto mais afastado da bacia e o ponto considerado, em m.

Para o cálculo da vazão o tempo de concentração deve ser igual o tempo de duração da precipitação na equação que calcula a intensidade de chuva (PINTO et al, 1976).

2.8 CONTROLE DE INUNDAÇÕES

O controle de inundações tem como objetivo minimizar os prejuízos causados por inundações ao poder público e população, minimizar os riscos em que as pessoas correm nestas situações, fazendo com que ocorra um crescimento urbano mais correto, de forma harmônica, articulada e sustentável (ENEMOTO, 2004).

2.8.1 Medidas Não Estruturais

Geralmente as medidas estruturais não conseguem fornecer completa proteção, além de serem muitas vezes inviáveis economicamente. Elas também podem causar a falsa impressão de segurança, permitindo a ocupação de lugares propícios a inundações gerando sérios problemas futuros (CORDERO, 1999).

Segundo Enemoto (2004) as medidas não estruturais não alteram a bacia e não são projetadas para dar proteção completa, porém são tão importantes quanto as estruturais no combate as inundações. As ações não estruturais consistem em educação e conscientização da população, disciplinar o uso correto do solo urbano e gestão das inundações.

Quando essas ações trabalham em conjunto com as medidas estruturais há uma redução significativa dos problemas causados com um custo inferior.

No quadro 5 são expostas algumas medidas não estruturais.

Medidas	Características	Objetivos
Plano diretor	Planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas loteadas.	Evitar ocupação sem prevenção e previsão.
Zoneamento	Conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação. É incorporado ao plano diretor.	Visa à minimização de perdas materiais e humanas em face das grandes cheias.
Educação Ambiental	Para ser realizado junto à população. A conservação das margens dos arroios, sua vegetação típica e taludes são essenciais.	Conscientizar a população que sofre ou poderá sofrer com inundações.
Reassentamento	Reassentamento de residentes ilegais ocupantes das margens de rios, e de residentes legais nas áreas de enchente.	Retirar a população dos locais de risco.
Soluções de mitigação	Promover o aumento das áreas de infiltração e percolação e armazenamento temporário.	Aumentar a eficiência do sistema de drenagem à jusante e da capacidades de controle de enchentes dos sistemas.
Sistema de alerta	Sistema utilizado para prevenir a população com antecedência de curto prazo, em eventos mais raros.	Ajudar no controle das estruturas hidráulicas no sistema do rio, e evitar o pânico.
Construções a prova de enchentes	Pequenas adaptações nas construções.	Diminuir os prejuízos individuais causados pelas inundações.
Seguro contra enchentes	Proteção econômica contra inundações.	Diminuir os prejuízos individuais causados pelas inundações.
Sistemas hidrológicos	Histórico hidrológico da bacia e modelos que mostram o comportamento hidráulico e hidrológico do sistema do rio.	Fornecer subsídios para os estudos de comportamento da bacia, assim como previsão de cenários futuros.

Quadro 5 - Medidas não estruturais de prevenção á enchentes

Fonte: Enemoto (2004), adaptado.

3. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Ligeiro está localizada na cidade de Pato Branco, sudoeste do estado do Paraná, entre as coordenadas 26° 16' 57" e 26° 10' 23" latitude sul e 52° 43' 21" e 52° 37' 15" longitude a oeste do Meridiano de Greenwich.

Pato Branco faz divisa com os municípios de Bom Sucesso do Sul, Clevelândia, Coronel Vivida, Honório Serpa, Itapejara D'Oeste, Mariópolis, Renascença e Vitorino, e possui uma população de 72.370 habitantes.

Na figura 2 apresenta-se a localização do município de Pato Branco e seu perímetro urbano.

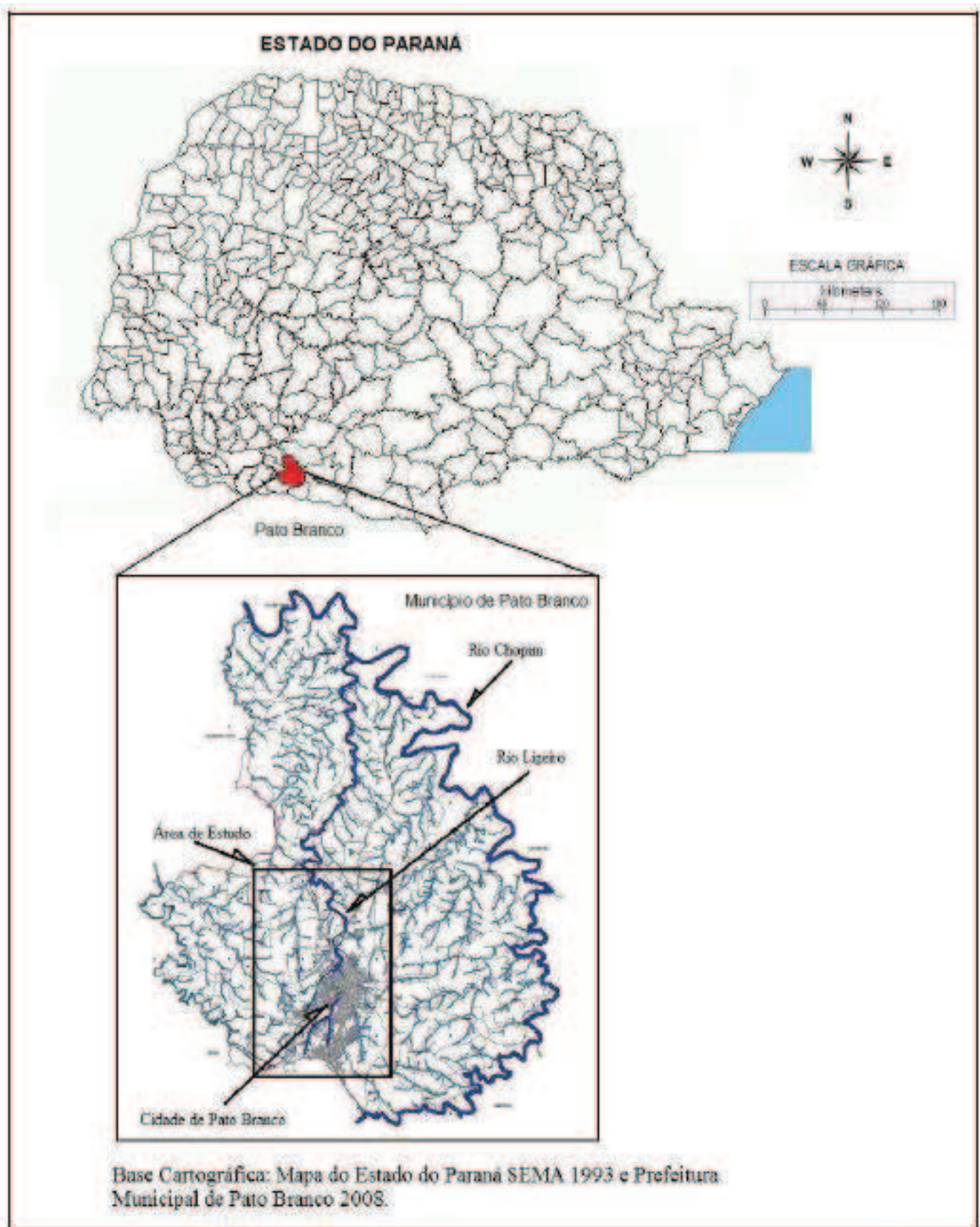


Figura 2 - Localização do município de Pato Branco
 Fonte: Jabur (2009)

A área total da bacia hidrográfica compreende em 175,87 km², porém a área de estudo (figura 3) refere-se ao alto do rio Ligeiro com 43,66 km². A nascente deste rio vai em direção ao norte desaguando na margem esquerda do rio Chopim, que é afluente do Rio Iguaçu.

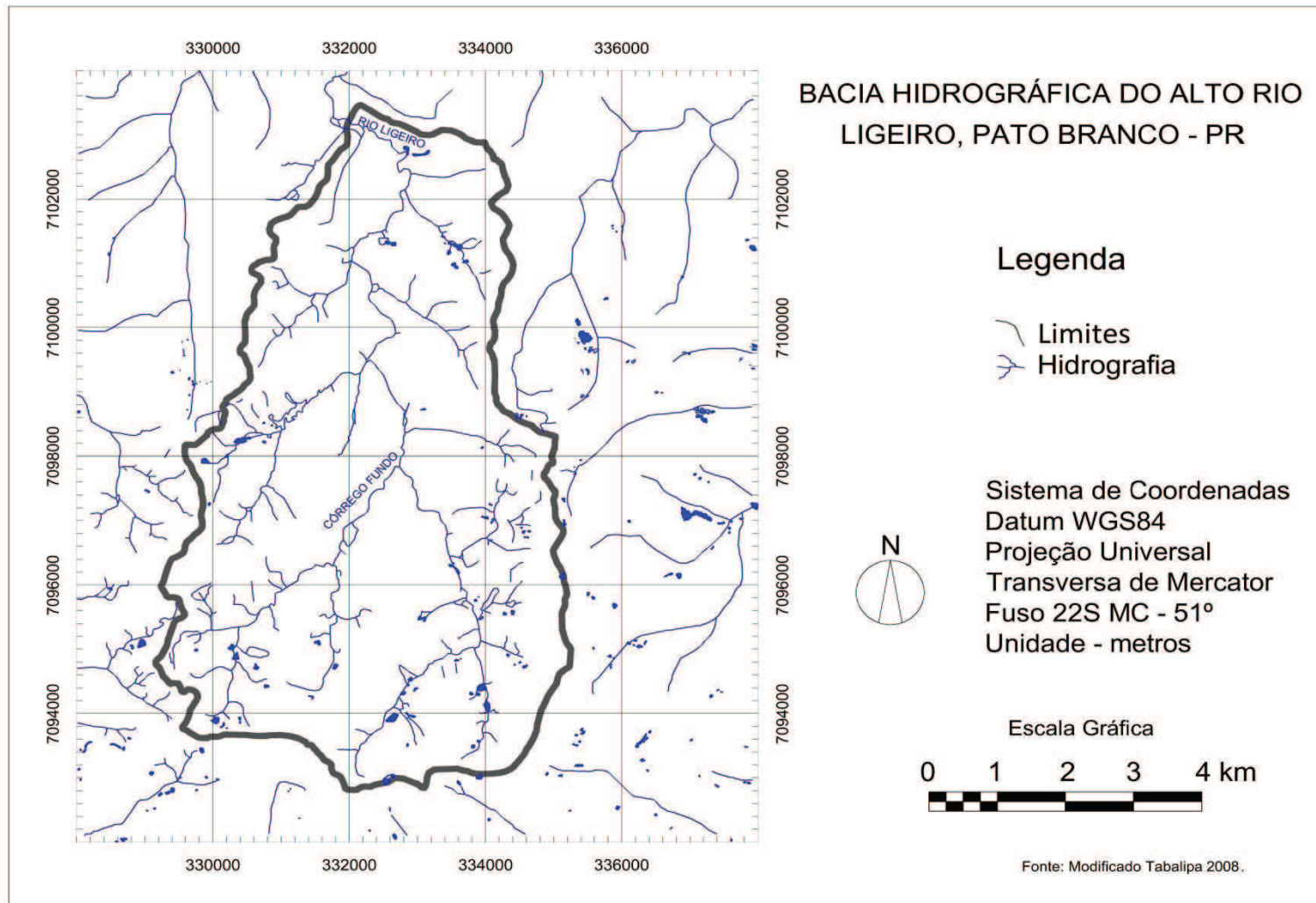


Figura 3 - Bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro

3.2 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

Com um histórico de inundações urbanas o rio Ligeiro vem sofrendo degradação ao longo dos anos pela ação dos habitantes da cidade de Pato Branco, sendo poluído e alterado fisicamente, comprometendo o seu curso natural.

A área de estudo compreende a um polígono com coordenadas UTM, que estão apresentadas no quadro 6.

Pontos	Coordenadas UTM	
	Eixo x (E)	Eixo y (S)
1	328.000	7.104.000
2	338.000	7.104.000
3	328.000	7.092.000
4	338.000	7.092.000

Quadro 6 - Coordenadas UTM da área em estudo

Fonte: **Autoria própria (2013)**

3.2.1 Geologia

A cidade de Pato Branco se localiza no Terceiro Planalto Paranaense e tem como característica a uniformidade geológica. Resultante de grande atividade vulcânica a região tem a formação de solos argilosos e seu substrato é constituído por rochas do Grupo São Bento, Formação Serra Geral, sendo o basalto a rocha característica de vulcanismo de fissura (TABALIPA, 2008). Na figura 4 é apresentado a geologia característica da área em estudo.

3.2.2 Solos

Os solos predominantes na área em estudo são **Neossolo**, **Nitossolo**, **Latossolo** e **Cambiossоло**.

A figura 5 mostra os solos encontrados na bacia hidrográfica do Rio Ligeiro.

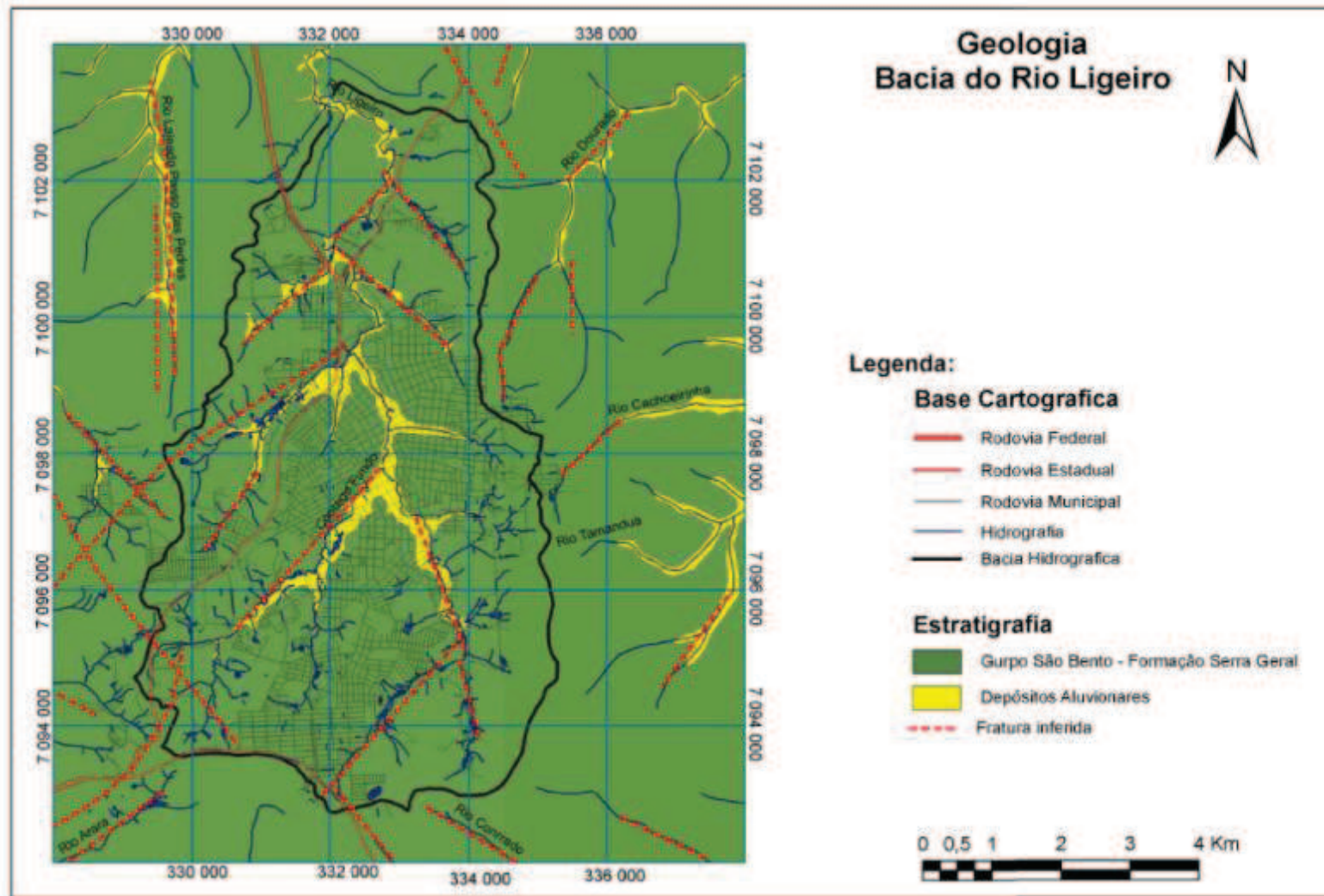
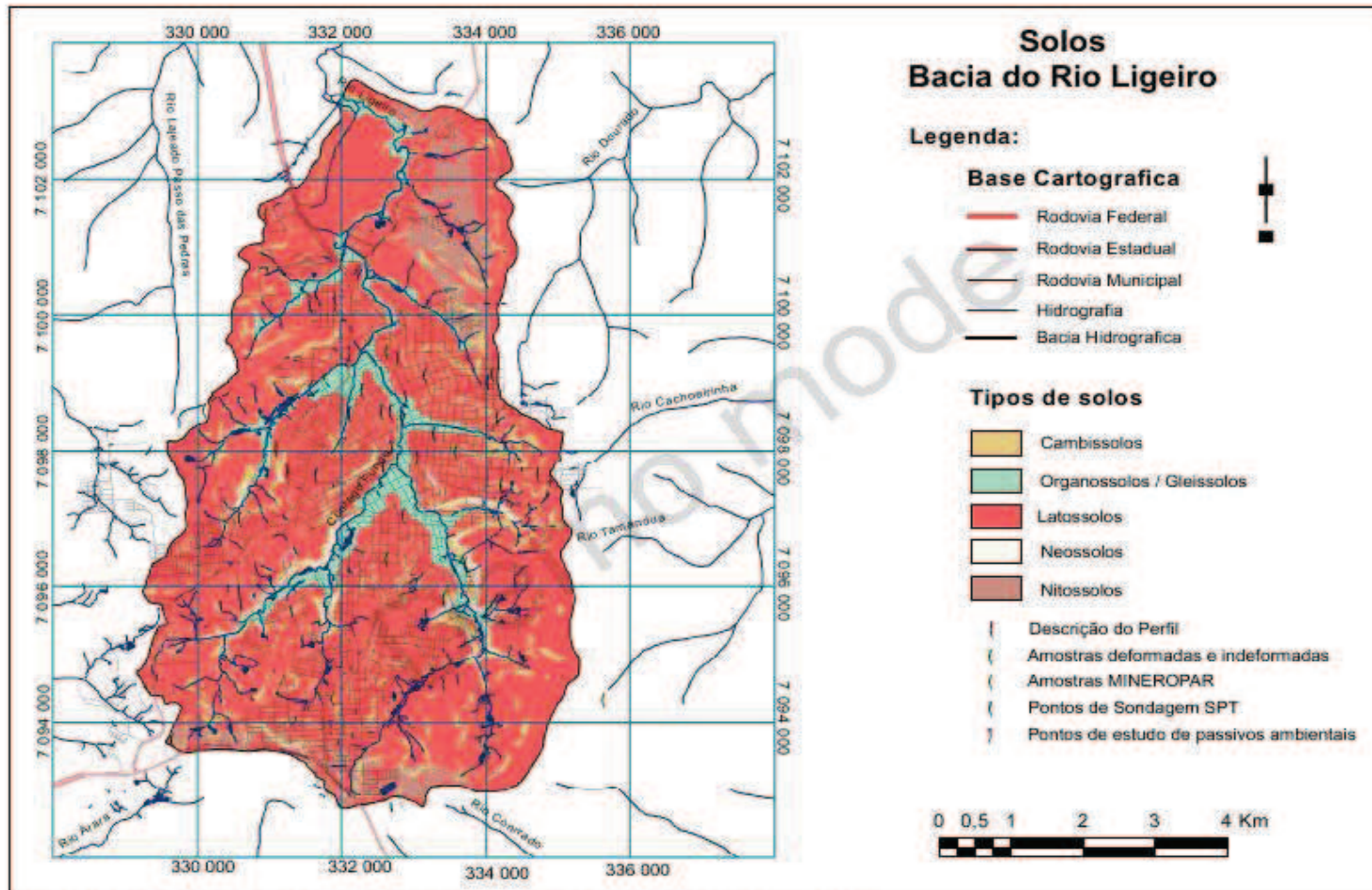


Figura 4 - Geologia da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro
Fonte: Tabalipa (2008)



Fonte: EMBRAPA & IAPAR - Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Sudoeste do Paraná - 1974

Figura 5 - Solos da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro

3.2.3 Clima

Segundo o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) a cidade de Pato Branco possui uma precipitação média anual de 2000 a 2500 mm e uma umidade relativa do ar de 70% até 75%.

A área de estudo está totalmente inserida no tipo climático Cfb – clima Subtropical Úmido Mesotérmico, classificação de Koeppen segundo Maack (2002), e tem como características geadas frequentes, ausência de secas e verões mais brandos.

Além disso, as temperaturas médias anuais não ultrapassam 22° C e 18° C, nos meses mais quente e mais frio respectivamente.

3.2.4 Hipsometria

O mapa hipsométrico de uma bacia hidrográfica representa a diferença de cotas entre as curvas de níveis encontradas na mesma. Através da figura 6 é possível observar essa variação na bacia do Alto rio Ligeiro.

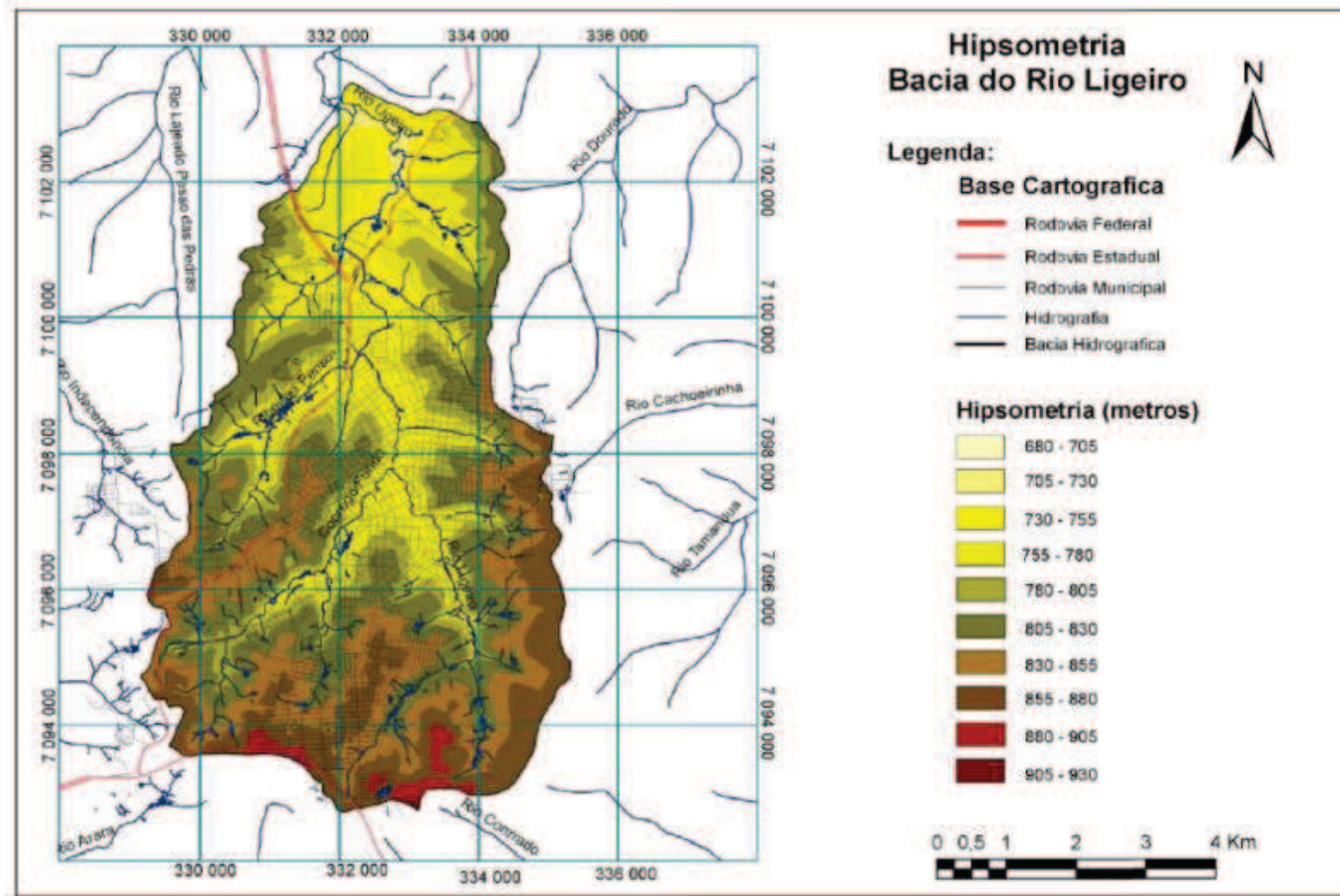


Figura 6 - Hipsometria da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro
 Fonte: Tabalipa (2008)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consiste no desenvolvimento de mapas de coeficiente de escoamento superficial e a utilização de modelos hidrológicos que representam o comportamento da bacia hidrográfica para cálculo da vazão de pico. Assim verificar as alterações causadas no sistema de drenagem e no ciclo hidrológico da bacia do alto rio Ligeiro devido os efeitos da urbanização.

Desta forma há a caracterização do terreno, identificando as áreas mais impermeáveis na atual situação da cidade e assim desenvolver o mapa de escoamento superficial. Além disso, fazer a simulação de crescimento urbano aumentando as áreas impermeáveis e conseqüentemente o escoamento superficial, mantendo apenas a vegetação nativa.

Através destas áreas obtidas com os mapas temáticos calculou-se o “Cmédio” da bacia utilizado nos modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão, os quais são o Método Racional Modificado e o Método do I-Pai-Wu adaptado às características da bacia.

Também para o cálculo das vazões de pico os parâmetros definidos são: as características físicas da bacia, a intensidade de chuva, o tempo de concentração, o coeficiente de retardo e coeficiente de ajuste de distribuição de chuva. Após estes procedimentos o resultado são os mapas de escoamento superficial e a análise dos picos de vazão.

Na figura 7 é exposto um ilustrativo das etapas do procedimento metodológico do trabalho.

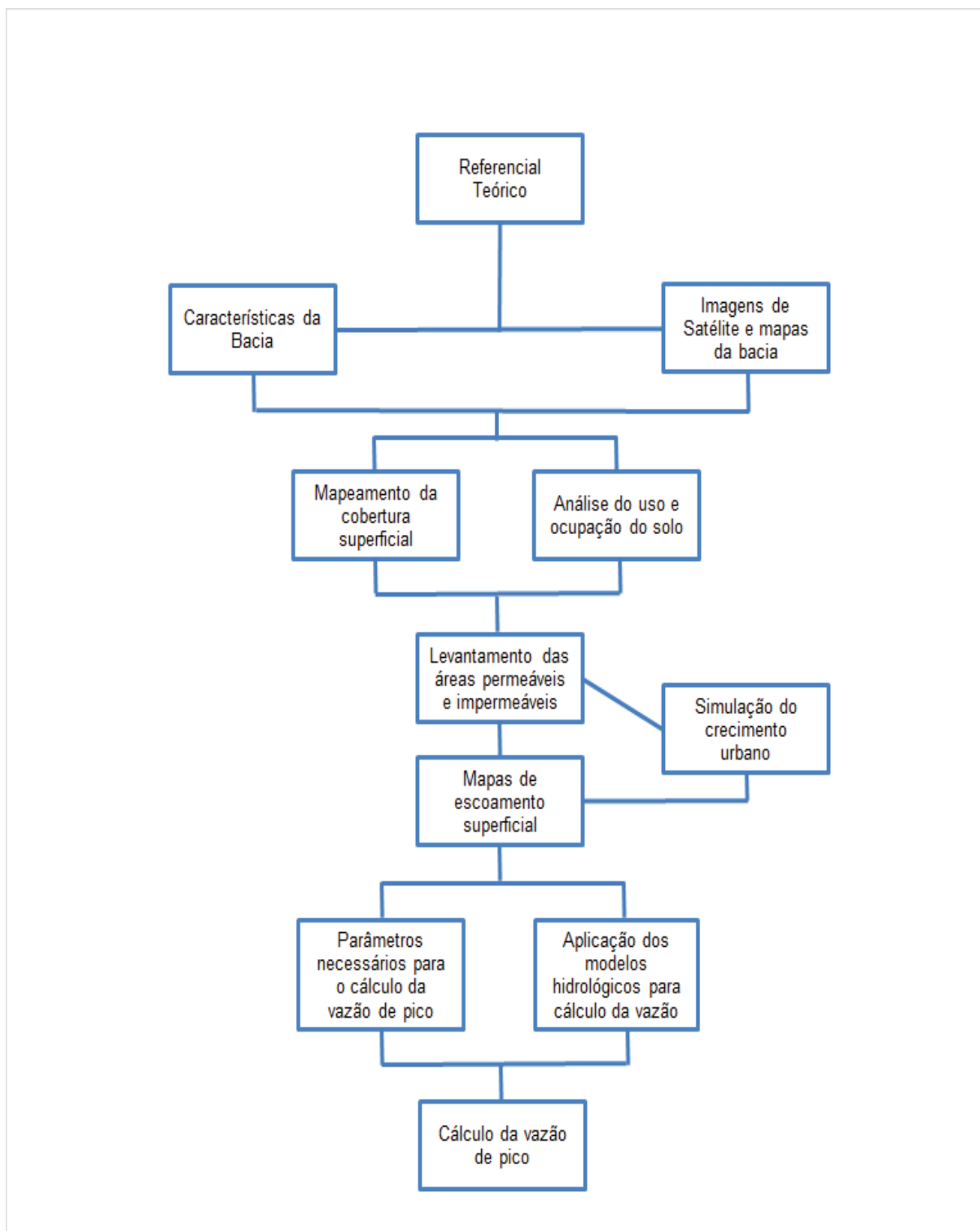


Figura 7 - Fluxograma do procedimento metodológico utilizado no trabalho
Fonte: Autoria própria (2013)

4.1 MATERIAS UTILIZADOS

Para a elaboração deste trabalho foram utilizados os seguintes documentos cartográficos:

- Imagens do satélite SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) do ano de 2012;
- Mapas para a bacia do Rio Ligeiro – Tabalipa (2008) na escala 1/1000.
- Mapa de Zoneamento Urbano da cidade de Pato Branco – IPPUPB na escala 1/16000.
- Mapa de Macrozoneamento do município de Pato Branco – IPPUPB na escala 1/50000.

Também se utilizaram da lei de zoneamento nº 2473/2005, o código de obras e o plano diretor vigente.

Para a realização do trabalho, obtenção e processamento de imagens os softwares utilizados foram:

- AutoCAD® Map 3D 2012, versão para Windows®;
- AutoCAD® 2012, versão para Windows®;
- WORD®, versão para Windows®;
- Google Earth®, versão para Windows®;
- EXCEL®, versão para Windows®.

4.2 RACIONAL MODIFICADO

Segundo Tucci *et al.* (2009) a bacia do rio Ligeiro pode ser considerada de médio porte, assim foi necessário modificar a fórmula racional através das equações de Pinto *et al.* (1976) para se obter resultados mais confiáveis. Essas expressões introduzem no método racional um coeficiente de retardo que reflete no

armazenamento de água, devido à declividade do terreno. Há também o ajuste da forma da bacia, para que seja possível se utilizar em áreas medianas.

Aplicando todas essas expressões e calculando todos os parâmetros envolvidos no método, a confiabilidade dos resultados obtidos se torna muito maior.

4.2.1 Intensidade da Chuva

Através de dados pluviométricos da estação meteorológica de Pato Branco, o Instituto das Águas do Estado do Paraná antiga SUDERHSA determinou a equação de intensidade da chuva. Assim a Equação 14 mostra a intensidade máxima da chuva para a cidade de Pato Branco

$$i = \frac{879,43}{(tc+9)^{0,732}} Tr^{0,152} \quad (14)$$

Onde:

i = intensidade da chuva, em mm/h;

tc = tempo de concentração, em minutos;

Tr = tempo de recorrência, em anos.

Os tempos de recorrência utilizados no trabalho que são de um, dois, cinco e dez anos são considerados baixos, porém são chuvas que tem uma grande probabilidade de acontecer. Segundo Pinto et al. (1976) uma chuva será mais rara quanto maior for a sua intensidade.

Desta forma um evento crítico pode ter um tempo de recorrência de cinquenta anos para acontecer, todavia se adotado um tempo tão alto haveria a fuga de foco do trabalho que é analisar o comportamento hidrológico da bacia nos próximos 10 anos.

Para calcular o tempo de concentração o autor escolheu a fórmula de Ven te Chow e ela está descrita conforme a Equação 12:

Para determinar a declividade média da bacia é feito a análise no mapa hipsométrico da diferença de cotas do talvegue principal. Essa variação é dividida pelo comprimento do talvegue. Aplicando assim na equação acima é encontrado o tempo de concentração para a bacia do alto Rio Ligeiro. Com o tempo de concentração (t_c) calculado e os tempos de recorrência adotados pelo autor obteve-se as intensidades de chuva.

4.2.2 Coeficiente de Escoamento Superficial Médio

Devido à cidade de Pato Branco possuir uma topografia acidentada e o solo ser predominantemente argiloso e o mesmo possuir característica de baixa infiltração, as zonas de matas e subúrbios tiveram seu coeficiente de escoamento superficial adaptado para o solo existente na região, assim aumentando a impermeabilização destes locais em comparação aos valores utilizados em São Paulo, já que aquela região é de solos arenosos. No quadro 7 estão expostas as modificações feitas na classificação de Carvalho e Da Silva (2006) e Wilken (1978).

Zonas	C
Edificação muito densa: partes centrais, densamente construídas, de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas.	0,70 - 0,95
Edificação não muito densa: partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitação, mas com ruas e calçadas pavimentadas.	0,60 - 0,70
Edificações com poucas superfícies livres: partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,50 - 0,60
Edificações com muitas superfícies livres: partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,25 - 0,50
Pequenas chácaras: partes de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção.	0,10 - 0,4*
Matas, parques e campos de esportes: partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esporte sem pavimentação	0,05 - 0,4*

Quadro 7 - Coeficientes de escoamento superficiais adotados para a bacia em estudo

Fonte: Modificado Wilken (1978), Carvalho; Da Silva (2006)

O quadro 8 mostra esta diferença no coeficiente de escoamento superficial para diferentes tipos de solos e declividade.

Tipo de Área	Valores de "C"
1 Topografia Terreno plano, declividade de 0,2 - 0,6 m/km	0,3
Terreno, declividade de 3 - 4 m/km Morros, declividade de 30 - 50 m/km	0,20 0,10
2 Solo Argila Impermeável Permeabilidade média Arenoso	0,40 0,20 0,10
3 Cobertura Área cultivadas Árvores	0,20 0,10

Quadro 8 - Valores de C para áreas rurais

Fonte: Tucci *et al* (2009)

Como o coeficiente de escoamento superficial geralmente é tabelado, e a classificação das áreas da bacia foi fundamentada no quadro 7 para que seja feita uma análise mais criteriosa. Para se utilizar desses parâmetros para determinação da vazão de projeto é calculado um coeficiente de escoamento superficial médio, que é obtido pela Equação 15, uso da média ponderada.

$$C_{m\u00e9dio} = \frac{\sum C.A}{A_t} \quad (15)$$

Onde:

$C_{m\u00e9dio}$ = coeficiente de escoamento superficial m\u00e9dio, adimensional;

C = coeficiente C em cada tipologia de uso do solo, adimensional;

A = \u00e1rea de cada zona, em m²;

A_t = \u00e1rea total da bacia, em m².

4.2.3 Coeficiente de Retardo Atrav\u00e9s do Efeito da Declividade (F)

A cidade de Pato Branco possui declividades que variam de 0\u00b0 a 40\u00b0 ou mais, por\u00e9m \u00e9 poss\u00edvel visualizar na figura 8 que h\u00e1 predomin\u00e2ncia de \u00e1reas com declividades variando entre 3\u00b0 a 15\u00b0.

Desta forma no trabalho foi adotado declividades m\u00e9dias para toda a bacia, assim atrav\u00e9s da Equa\u00e7\u00e3o 16 de Pinto et al. (1976, p 124) que \u00e9 apresentada abaixo e \u00e9 obtido o coeficiente de retardo.

$$\varphi = \frac{1}{n\sqrt{10L}} \quad (16)$$

Onde:

L = comprimento do talvegue, em km;

n = coeficiente em fun\u00e7\u00e3o da declividade da bacia, sendo:

n = 3,5: para declividades fortes;

n = 3: para declividades m\u00e9dias;

n = 2,5: para declividades fracas.

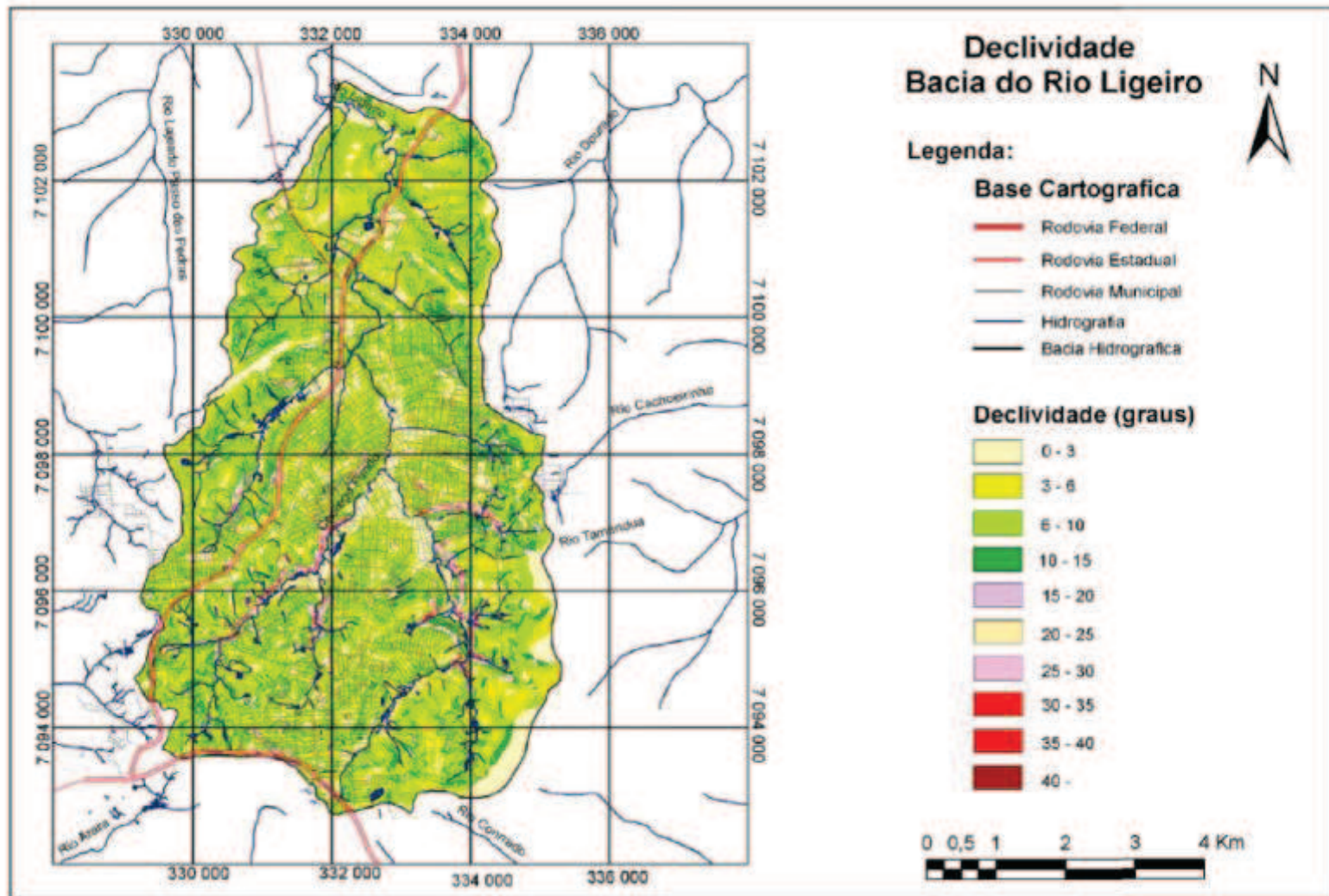


Figura 8 - Declividade da área de estudo, bacia do alto rio Ligeiro
 Fonte: Tabalipa (2008)

4.3 I-PAI-WU

O I-Pai-Wu foi escolhido devido a sua maior precisão dos resultados para bacias de médio porte, já que a área de estudo está dentro dos limites de 2km² até 200km². Sendo assim para encontrar as vazões de pico se utilizou da Equação 5, e tem como variáveis o $C_{\text{médio}}$, intensidade de chuva e o coeficiente “K”.

O coeficiente de escoamento superficial para este método é encontrado através de algumas expressões que consideram o tempo de concentração, pico da chuva, a forma da bacia e o grau de impermeabilização do solo. Porém o coeficiente de escoamento superficial médio utilizado foi calculado anteriormente pela Expressão 15, pois se queria uma análise mais criteriosa. A intensidade da chuva para o I-Pai-Wu foi obtida através da Equação 14, e é a mesma do Racional Modificado.

O coeficiente de distribuição espacial foi calculado através do ábaco da figura 1 elaborado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE do estado de São Paulo.

4.4 CONFECÇÃO DO MAPA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DA BACIA NA ATUAL SITUAÇÃO

Para o desenvolvimento do mapa de escoamento superficial foi necessário obter as imagens que compreende a área de estudo através do *software* Google Earth[®] versão beta 7.1.3.21.153. A fim de se ter uma boa precisão e visualização para fazer a caracterização do solo utilizaram-se de um zoom de 250 metros e coordenadas menores (figura 9) definidas a cada distância de 1000 metros na horizontal e 600 metros na vertical dentro da área de estudo, sendo esta dividida em um total de 200 imagens



Figura 9 – Exemplo da imagem de satélite de parte da área em estudo
Fonte: Google Earth® (2012)

Através do *software* AutoCAD® Map 3D foi realizado o georreferenciamento das imagens de satélite, onde cada figura foi colocada em escala através de uma referência horizontal de 1000 metros. Posteriormente as imagens foram orientadas para as coordenadas corretas, formando um mosaico da área em estudo. Também foi feito a delimitação da bacia e inserção dos rios, com a sobreposição do Mapa da bacia do alto Rio Ligeiro. A figura 10 mostra o processo de georreferenciamento finalizado e a formação do mosaico de imagens.

Com isso foi feita e a análise superficial do terreno identificando as áreas mais impermeáveis através da classificação apresentada na tabela 6. Os lagos e açudes visíveis também foram identificados e da mesma forma delimitados para constarem na carta temática e consequentemente no mapa de escoamento superficial. As figuras 11 e 12 apresentam o procedimento de classificação das áreas permeáveis e impermeáveis.

Depois de feita toda a classificação do uso e ocupação do solo foi obtida a carta temática de coeficiente de escoamento superficial para a bacia do alto Rio Ligeiro (figura 13).

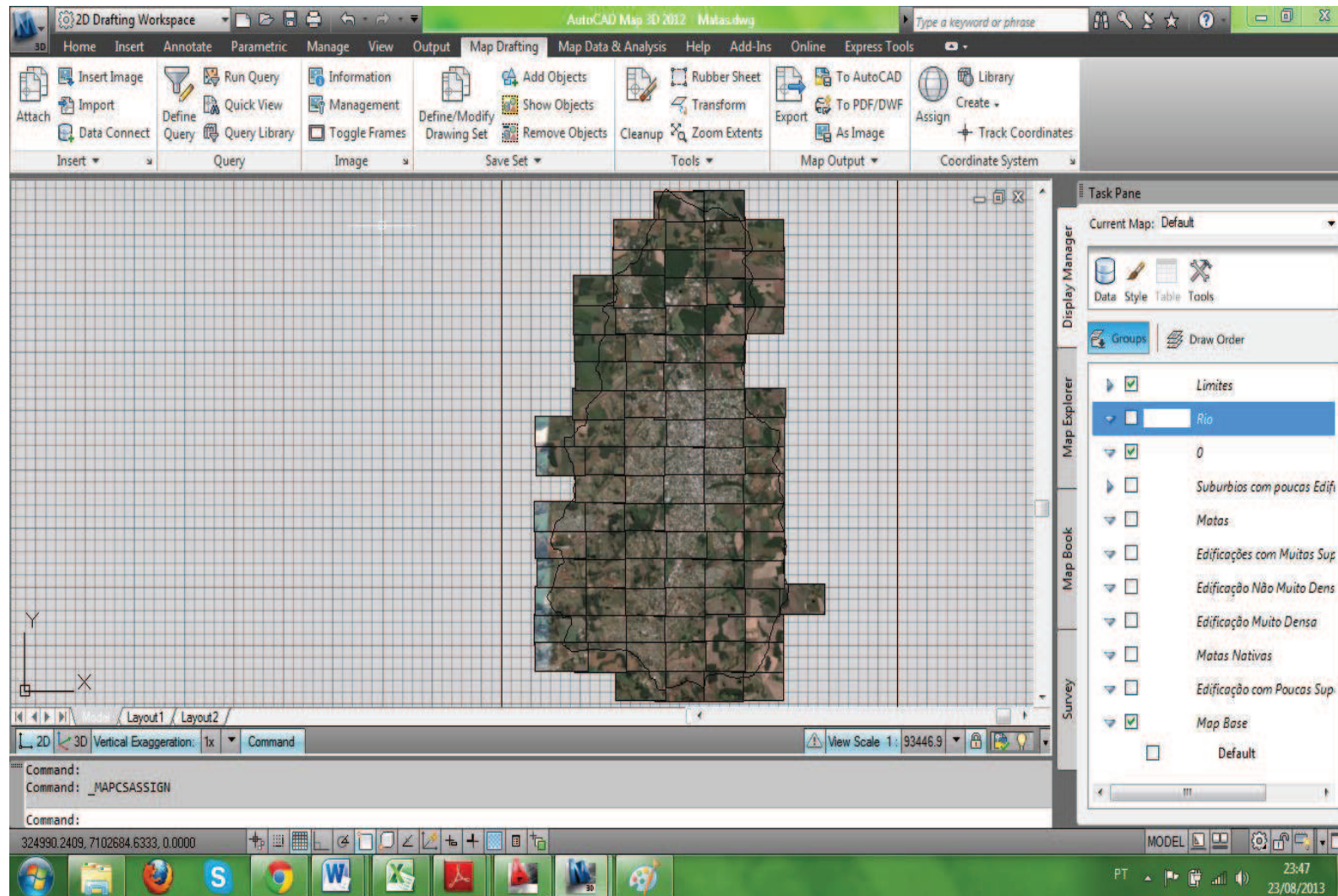


Figura 10 - Processo de georreferenciamento finalizado
Fonte: Google Earth (2012); AutoCad Map 3D (2012)

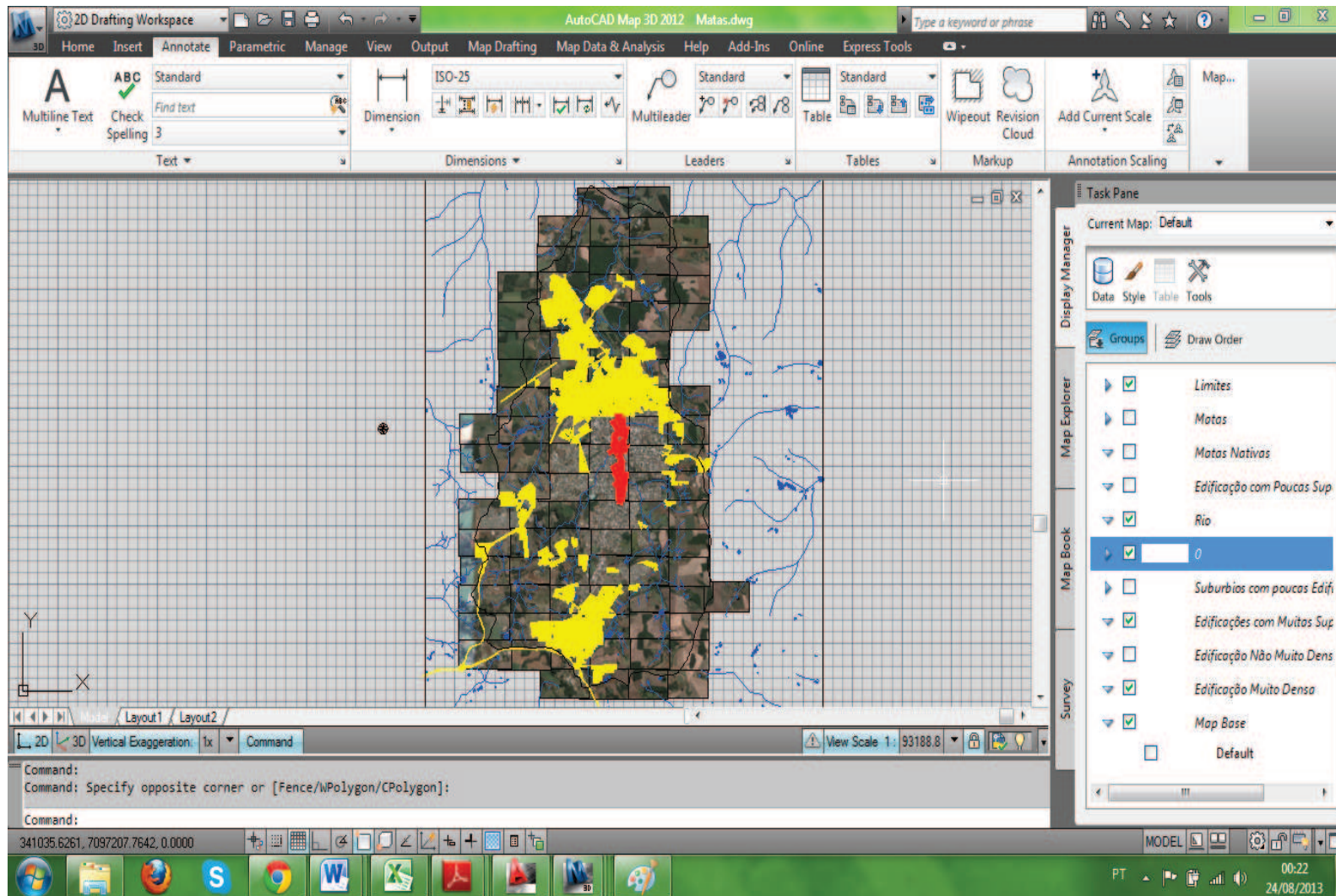


Figura 11 – Classificação das áreas permeáveis e impermeáveis
 Fonte: Google Earth (2012); AutoCad Map 3D (2012)

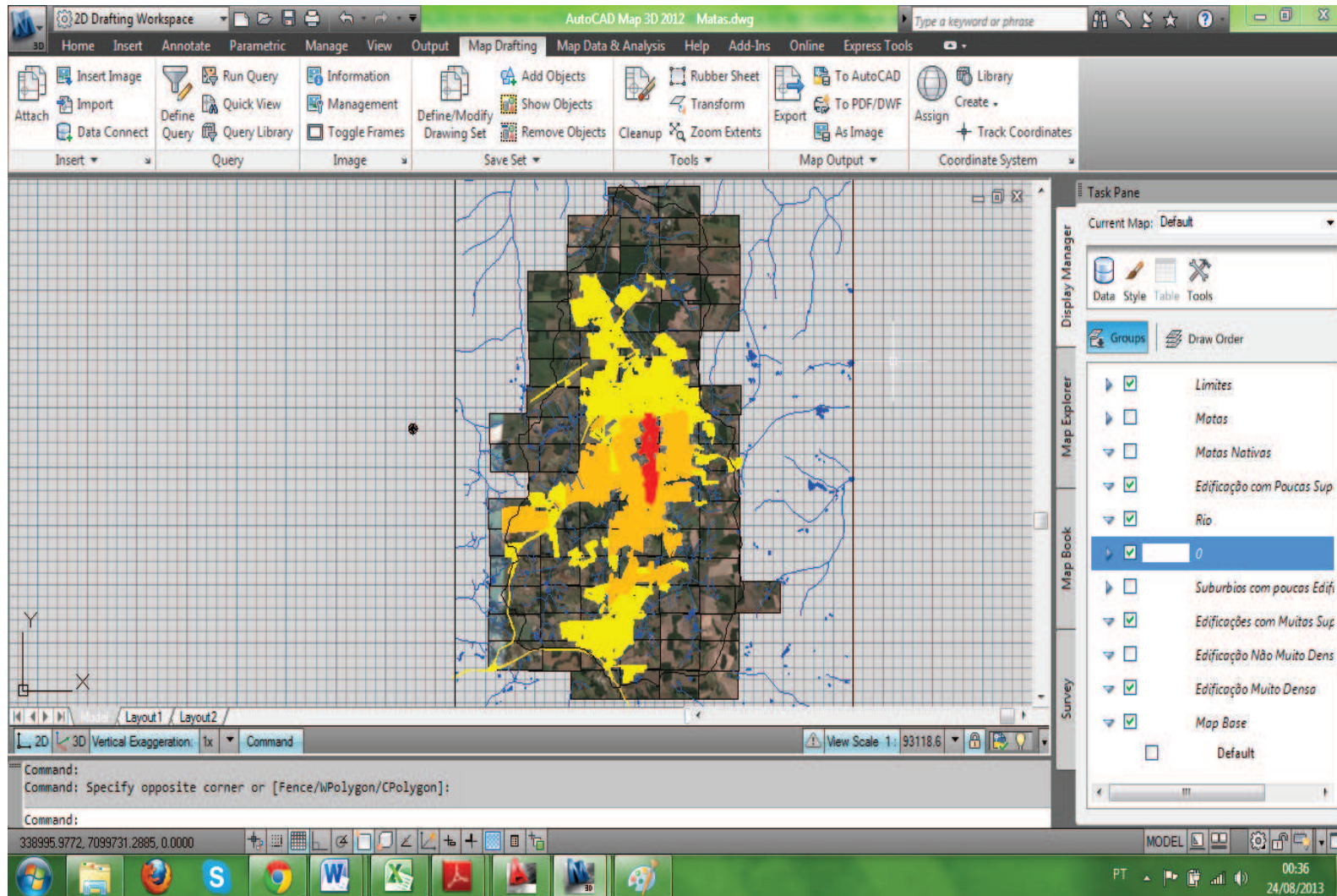


Figura 12 - Classificação das áreas permeáveis e impermeáveis
 Fonte: Google Earth (2012); AutoCad Map 3D (2012)

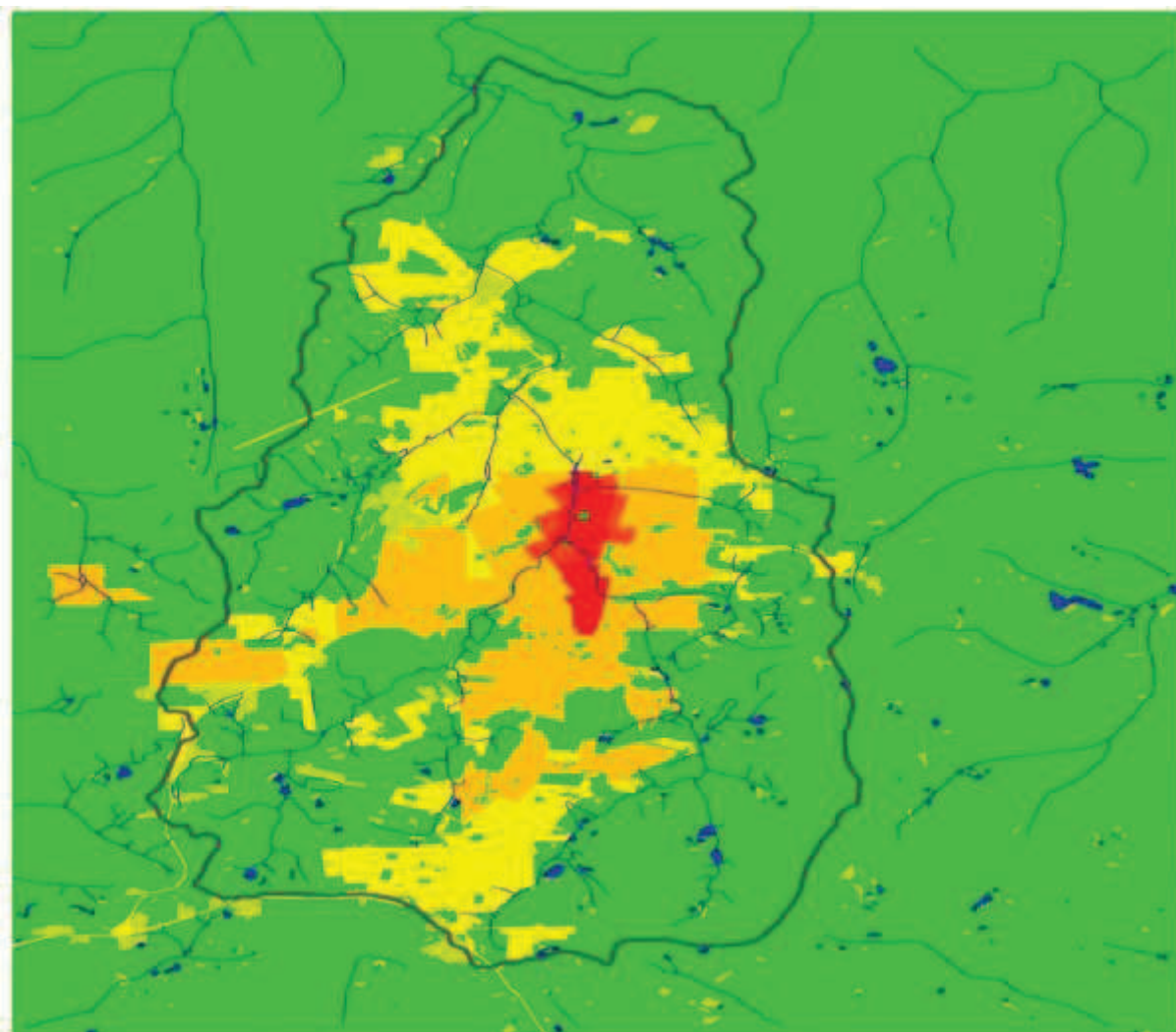


Figura 13 - Carta temática de escoamento superficial da bacia do alto rio Ligeiro

Fonte: Autoria própria (2013)

Na carta temática obtida foi atribuído o sistema de coordenadas UTM datum WGS 84 na projeção Universal Transversa de Mercator fuso 22S MC – 51°, introduzidas às legendas, escala gráfica, orientação e a grade de coordenadas.

Além disso, foram obtidas as áreas de todas as zonas temáticas que estão dentro da delimitação da bacia do alto Rio Ligeiro e assim aplicar aos modelos hidrológicos.

4.5 SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO URBANO

A proposta do trabalho para a simulação de crescimento foi que as áreas verdes, campos, agricultura e capoeiras sejam totalmente edificadas seguindo as definições do plano diretor e a lei de zoneamento. Assim as simulações foram divididas em duas situações, sendo o caso I a transformação das áreas verdes e rurais em loteamentos com algumas superfícies livres, e o caso II a pior situação de urbanização, onde todas essas áreas serão transformadas em loteamentos sem superfícies livres.

O primeiro passo para desenvolver a simulação de crescimento urbano foi uma nova classificação das áreas verdes, compreendendo agora apenas a vegetação nativa que não será alterada, já que por lei não podem ser cortadas.

Consultando o plano diretor do município de Pato Branco, o código de obras e a lei de zoneamento, foram verificadas quais regiões da cidade poderiam ser urbanizadas e qual seria o número máximo de pavimentos permitidos. Com isso identificar os locais que sofreriam maior urbanização e classifica-los segundo a tabela 6, obtendo assim o coeficiente de escoamento superficial para essas novas áreas. As informações contidas no plano diretor, lei de zoneamento e código de obras a respeito do planejamento de crescimento da cidade podem ser verificadas resumidamente no ANEXO A.

Dando continuidade ao procedimento, os mapas de macrozoneamento e zoneamento da cidade de Pato Branco foram modificados no *software* AutoCAD Map 3D®, considerando somente as zonas de interesse que estão dentro da bacia em estudo. Esses mapas são importantes para o processo de simulação, pois com eles é feito a projeção das zonas da cidade que vão ser urbanizadas, e o que é permitido construir nessas áreas.

Com o resumo da ocupação das macrozonas do município de Pato Branco e o mapa de zoneamento da bacia do alto Rio Ligeiro foi possível classificar o número de pavimentos que determinada edificação pode ter em cada ambiente da bacia, assim foi feito o mapa de número de pavimentos para cada região da bacia do alto Rio Ligeiro.

No mesmo *software* AutoCAD Map 3D® foi feito o processo de sobreposição dos mapas (figura 14) de vegetação nativa, macrozoneamento, zoneamento com o

número de pavimentos e de coeficiente de escoamento superficial da bacia do alto Rio Ligeiro. Com a produção do mapa foram obtidas as respectivas áreas de cada índice de escoamento superficial para efetuar o cálculo do coeficiente de escoamento superficial médio da bacia, e sucessivamente o cálculo das vazões.

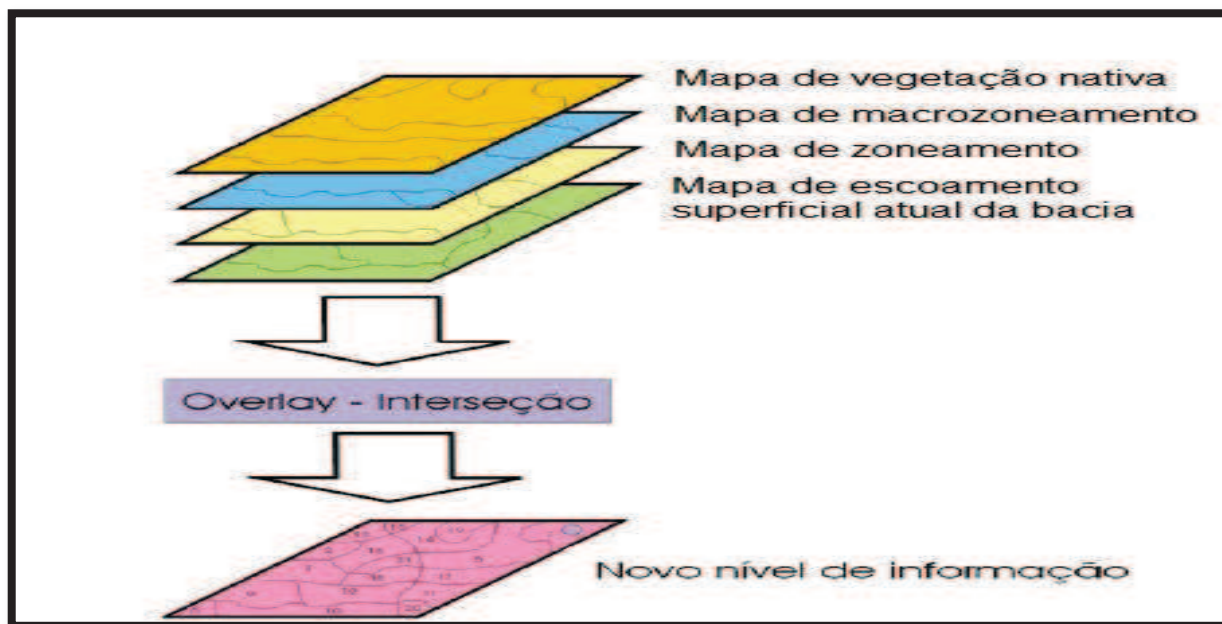


Figura 14 - Processo de sobreposição de mapas
Fonte: Modificado Tabalipa;Fiori (2008).

4.6 CONTROLE DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram realizados para conhecer a bacia em estudo e conferir se a classificação de uso e ocupação do solo adotada no trabalho está de acordo com a realidade da área de estudo. Desta forma foi analisada a localização do tipo de cobertura superficial e suas características.

As figuras 15 e 16 mostram alguns exemplos das classes de cobertura superficial analisadas nas imagens de satélite e conferidas nos trabalhos de campo.



Figura 15 - Exemplo em campo de cobertura superficial do terreno: classe de edificações com muita superfície livre (5) e classe de matas e partes rurais (6)
Fonte: Autoria própria (2013)

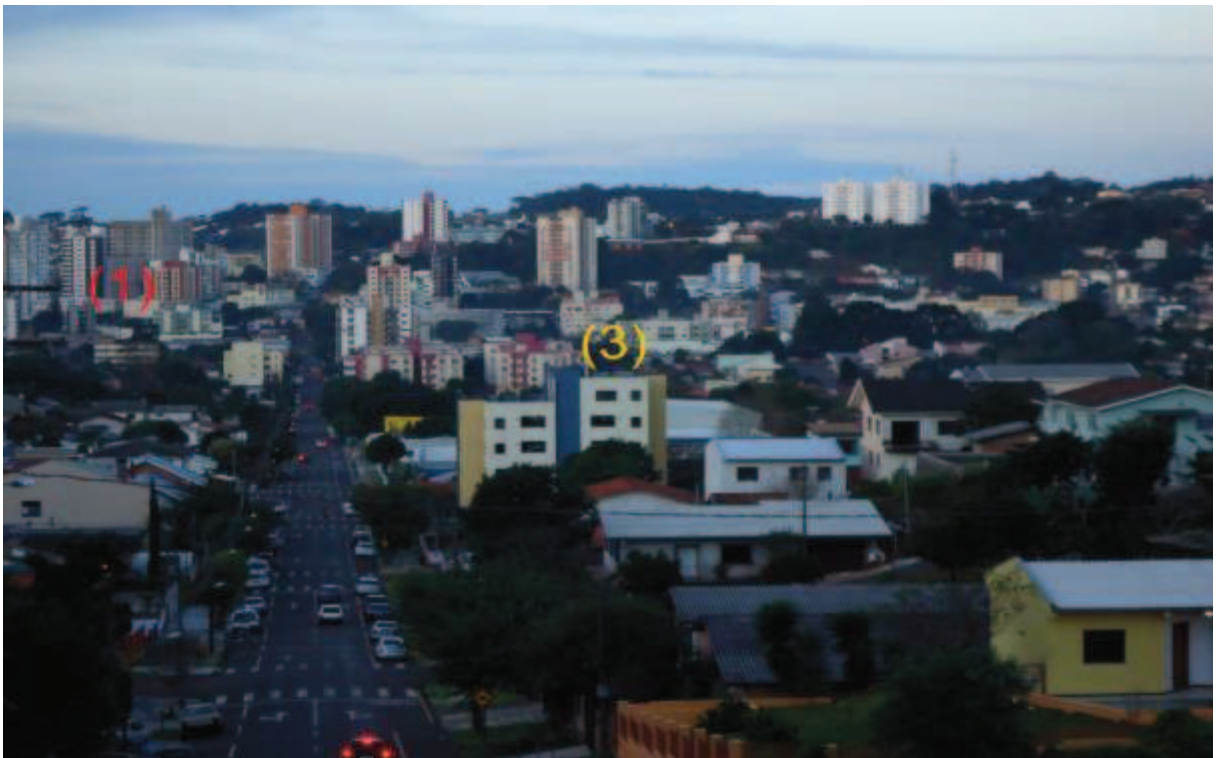


Figura 16 - Exemplo em campo de cobertura superficial do terreno: classe de edificações muito densa (1) e classe de edificações com pouca superfície livre (3)
Fonte: Autoria própria (2013)

Na figura 17 é mostrado a utilização de técnicas de sensoriamento remoto em imagens de satélite no software AutoCAD® 2012, classificação da zona temática de edificações muito densas, a análise dos pontos de referência da região central, sendo a igreja matriz e a Praça Getúlio Vargas e posterior verificação em campo da cobertura superficial do terreno.

Assim feito a verificação se as áreas classificadas correspondem com a realidade encontrada foi adicionado às zonas do mapa de escoamento superficial da bacia do alto rio Ligeiro fotos que caracterizam corretamente como é o uso e ocupação do solo daquela região para que o leitor do presente trabalho tenha uma melhor compreensão dos coeficientes de escoamento superficial de cada área.



Figura 17 - Exemplo do processo de sensoriamento remoto das classes de cobertura superficial e verificação em campo, classe de edificações muito densas
Fonte: Google Earth® (2012)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MAPAS DE VEGETAÇÃO NATIVA, MACROZONEAMENTO E ZONEAMENTO PARA A BACIA DO ALTO RIO LIGEIRO

Feito uma nova classificação das áreas verdes, campos, agricultura e capoeiras o resultado é o mapa de vegetação nativa da bacia do alto Rio Ligeiro, que é apresentado na figura 18.

Os mapas de macrozoneamento e zoneamento do município de Pato Branco, foram modificados para constarem apenas as informações referentes à bacia em estudo, com isso foram confeccionados os mapas de macrozoneamento e zoneamento para a bacia do alto Rio Ligeiro, que estão expostos nas figuras 19 e 20.

Através do ANEXO A que contém os dados de ocupação nas macrozonas do município de Pato Branco e do mapa de zoneamento da bacia em estudo foi confeccionado o mapa com o número de pavimentos por zona para a bacia do alto Rio Ligeiro e é exposto na figura 21.

Todos esses mapas foram necessários confeccionar para possibilitar a simulação de crescimento da bacia.

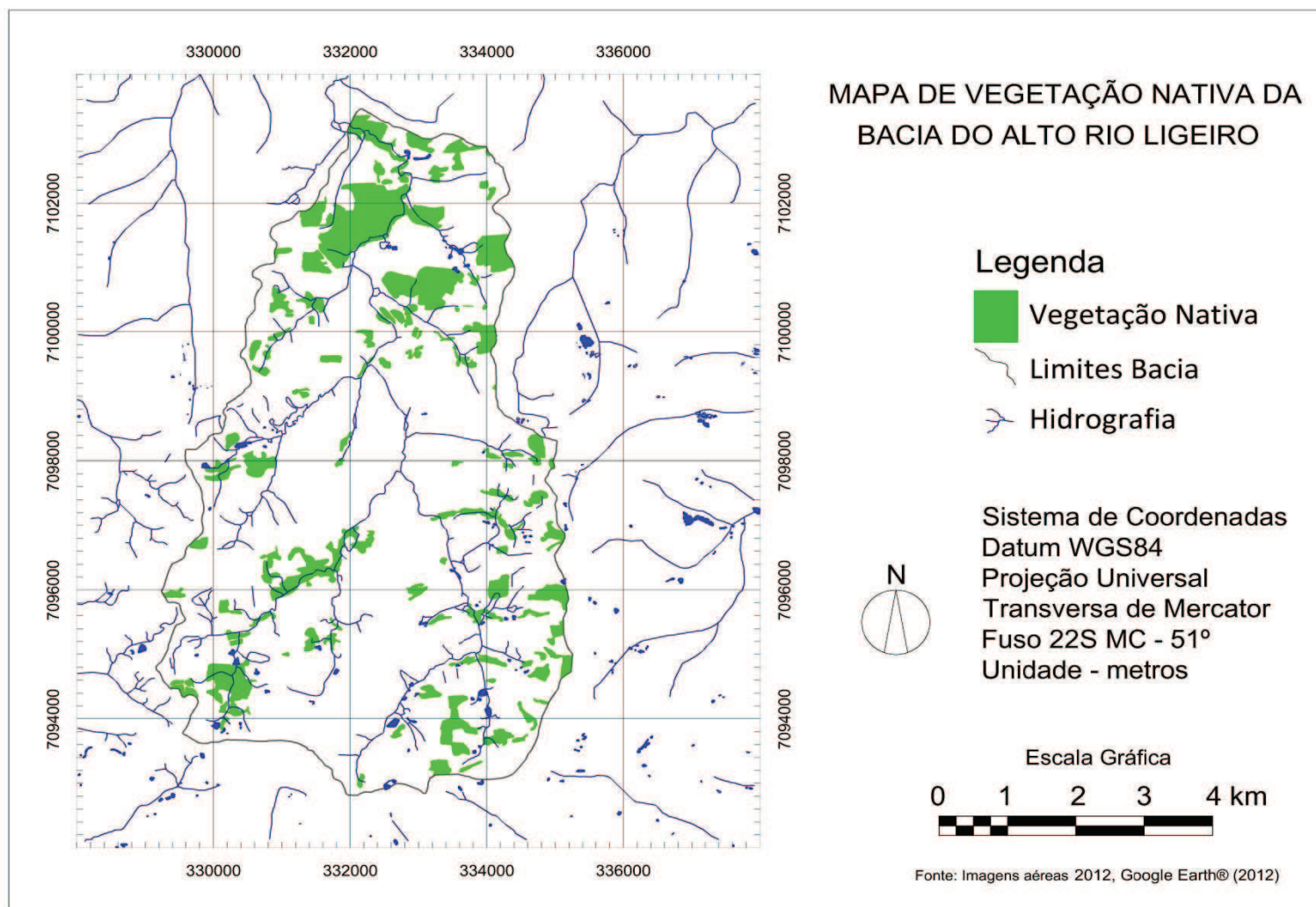


Figura 18 - Mapa de vegetação nativa da bacia do alto rio Ligeiro

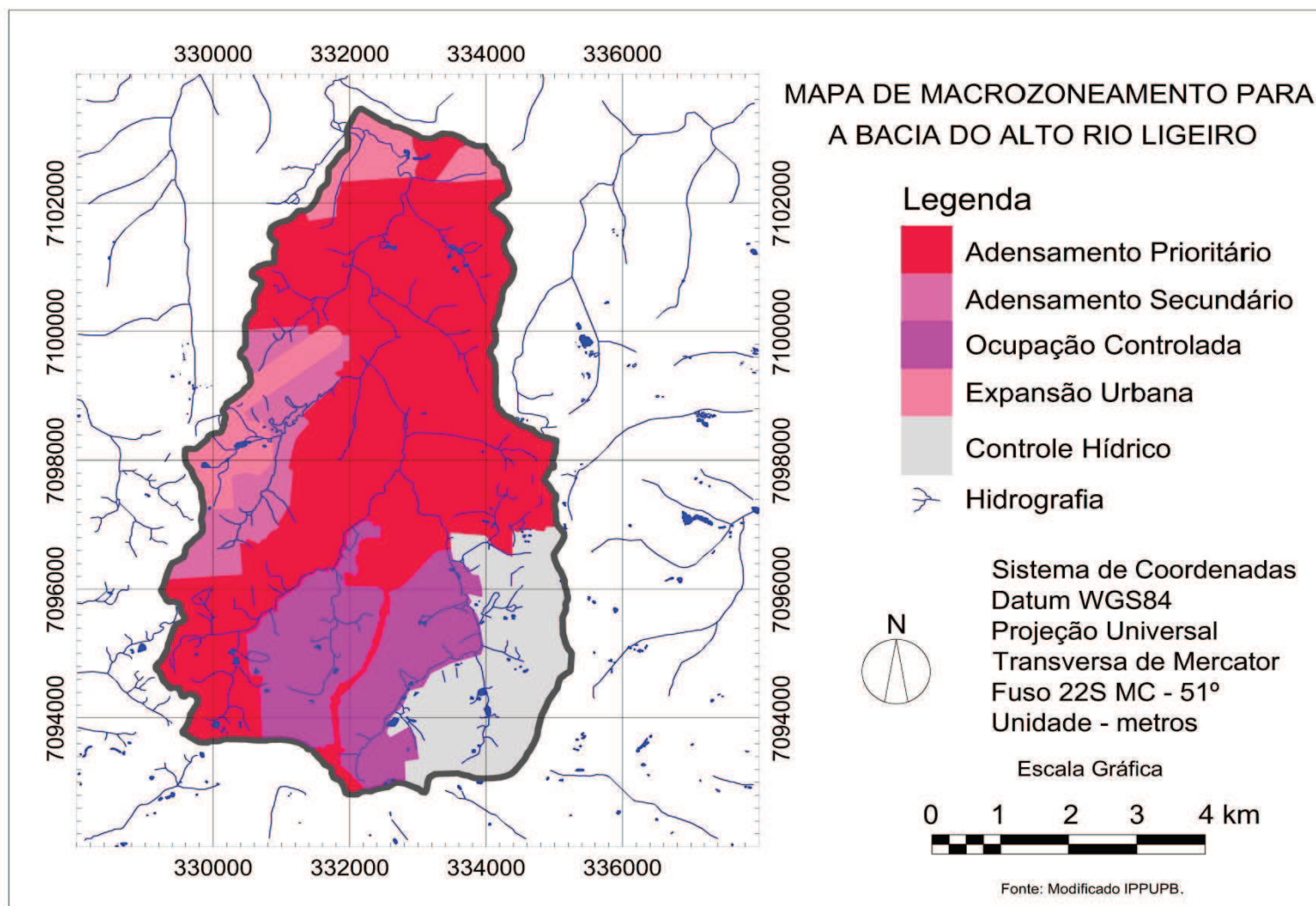


Figura 19 - Mapa de macrozoneamento para a bacia do alto rio Ligeiro

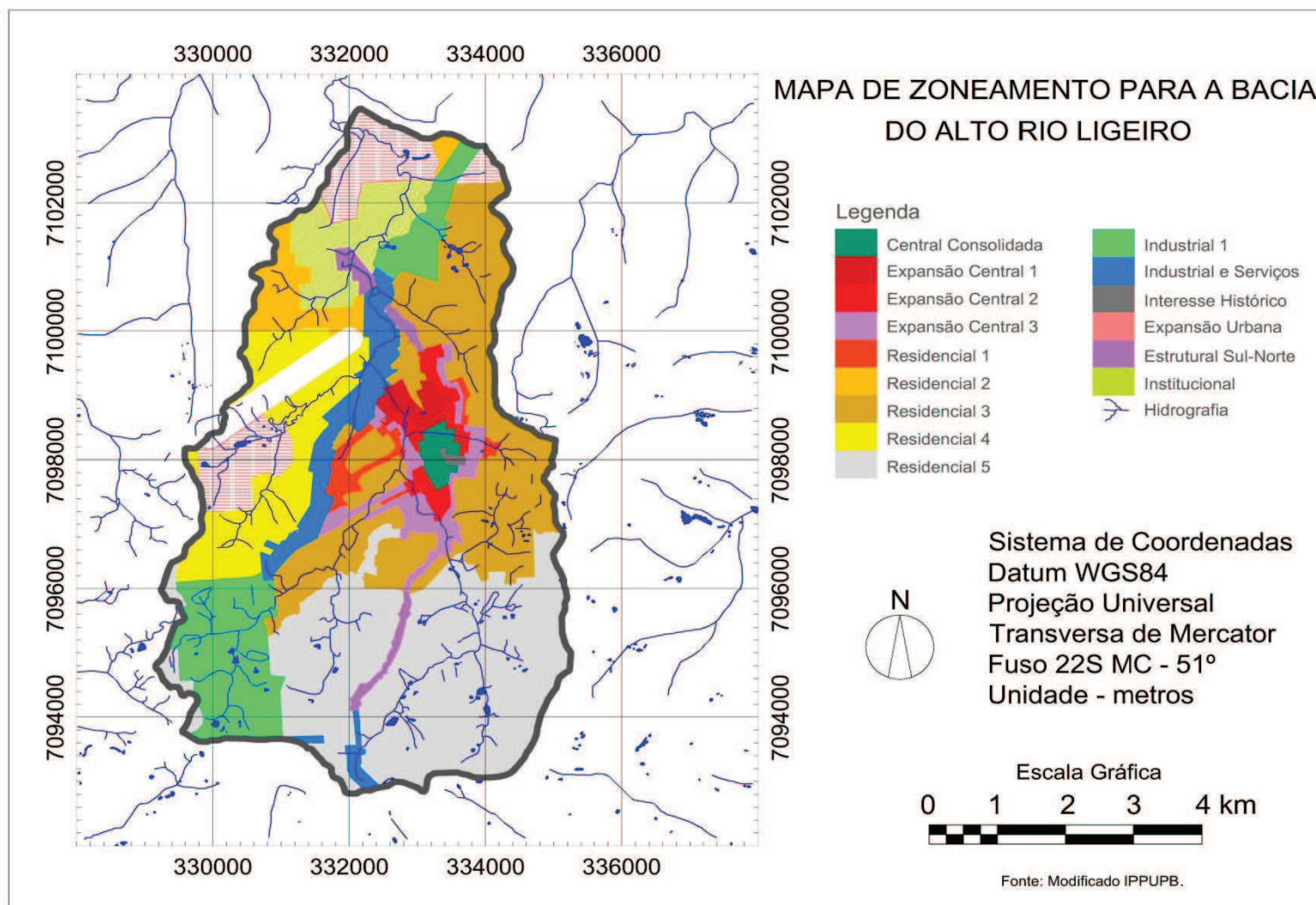


Figura 20 - Mapa de zoneamento para a bacia do alto rio Ligeiro

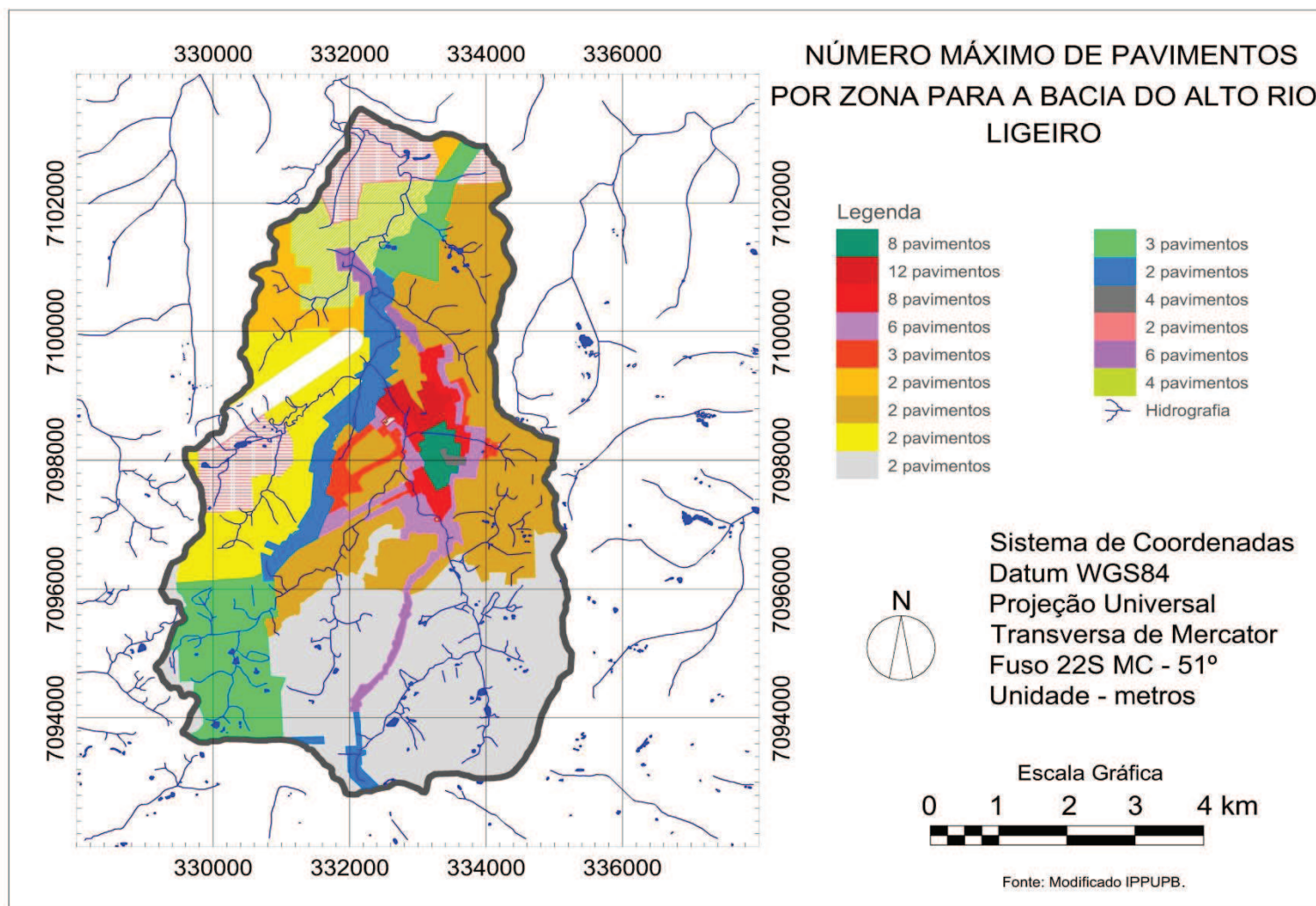


Figura 21 - Número máximo de pavimentos por zona para a bacia do alto rio Ligeiro

5.2 MAPAS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Após todo o processo de georreferenciamento das imagens de satélite, classificação das áreas impermeáveis e da sobreposição das cartas temáticas para os casos de simulação, o resultado são os mapas de escoamento superficial para a bacia do alto rio Ligeiro na sua atual situação (figura 22) e nas simulações considerando o caso I (figura 23) e o caso II (figura 24).

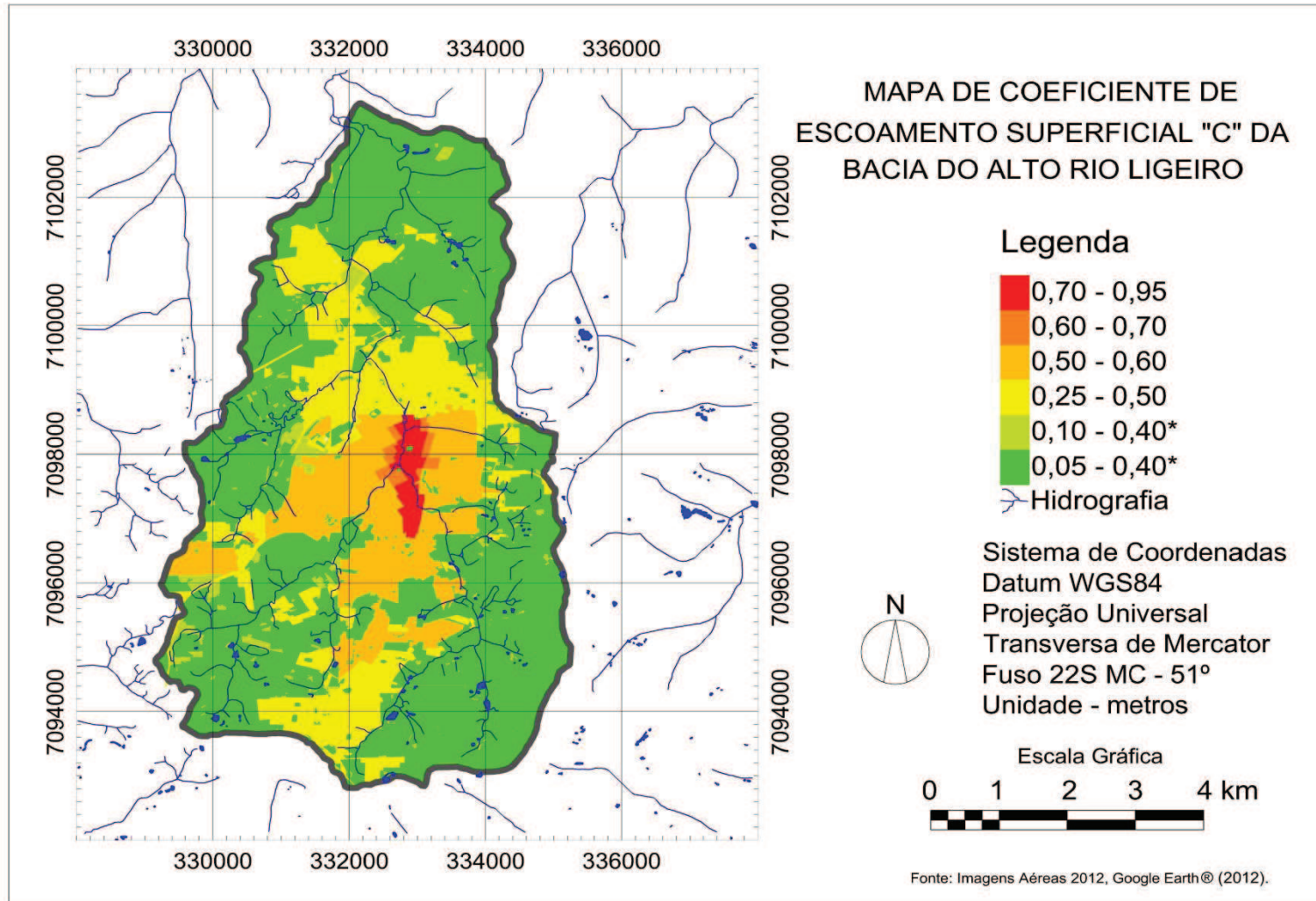


Figura 22 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro na situação atual

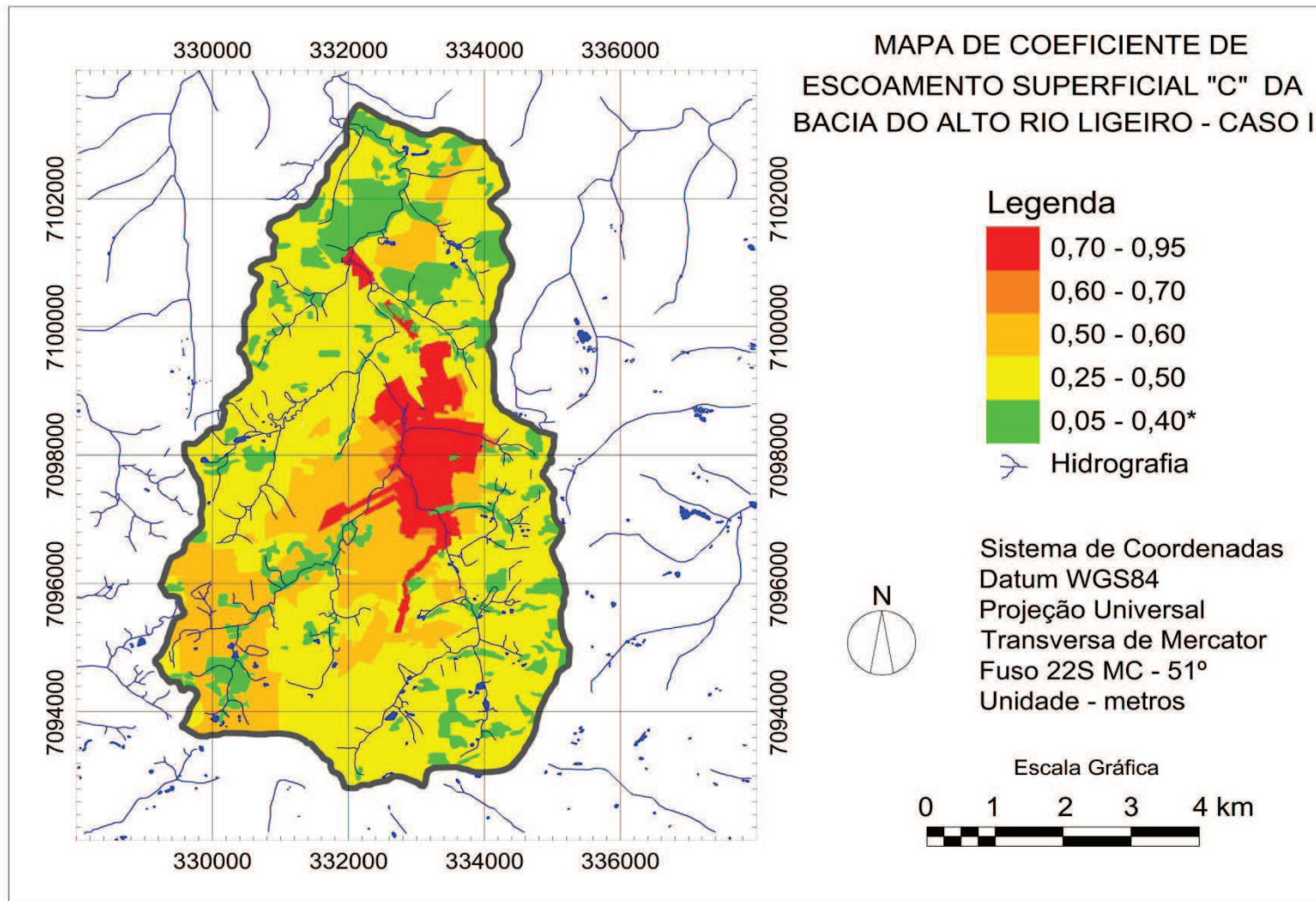


Figura 23 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro, caso I
Fonte: Autoria própria (2013)

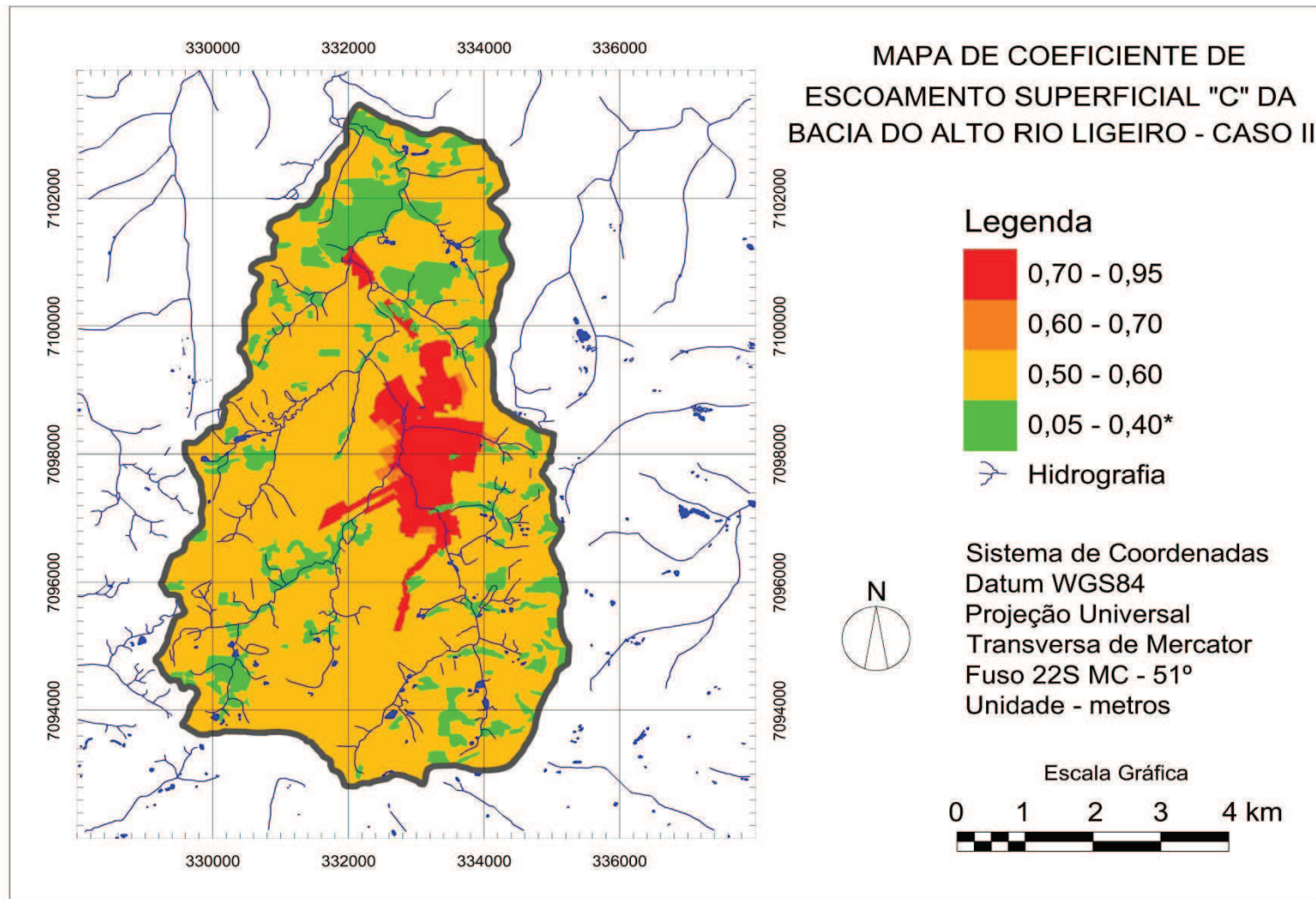


Figura 24 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro, caso II
Fonte: Autoria própria (2013)

Através dos mapas foi possível obter as áreas abrangentes de cada coeficiente de escoamento superficial e sua representação percentual dentro da bacia. As tabelas 1, 2 e 3 mostram esses dados.

Tabela 1 – Percentual de cada zona temática para atual situação da bacia

Zonas	"C"	Área (ha)	Percentual
Edificações muito densa	0,70 - 0,95	59,70	1,37
Edificações não muito densa	0,6 - 0,70	29,13	0,67
Edificações com poucas superfícies livres	0,5 - 0,6	629,21	14,41
Edificações com muitas superfícies livres	0,25 - 0,5	849,13	19,45
Pequenas chácaras	0,10 - 0,4	121,59	2,78
Matas, parques e áreas rurais	0,05 - 0,4	2677,05	61,32
Total		4365,80	100,00

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 2 - Percentual de cada zona temática para o caso I

Zonas	"C"	Área (ha)	Percentual
Edificações muito densa	0,70 - 0,95	347,42	7,96
Edificações não muito densa	0,6 - 0,70	35,37	0,81
Edificações com poucas superfícies livres	0,5 - 0,6	948,37	21,72
Edificações com muitas superfícies livres	0,25 - 0,5	2443,46	55,97
Pequenas chácaras	0,10 - 0,4	0,00	0,00
Mata Nativa	0,05 - 0,4	591,17	13,54
Total		4365,80	100,00

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 3 - Percentual de cada zona temática para o caso II

Zonas	"C"	Área (ha)	Percentual
Edificações muito densa	0,70 - 0,95	347,42	7,96
Edificações não muito densa	0,6 - 0,70	35,37	0,81
Edificações com poucas superfícies livres	0,5 - 0,6	3391,84	77,69
Edificações com muitas superfícies livres	0,25 - 0,5	0,00	0,00

(Continua)

Tabela 3 – Percentual de cada zona temática para o caso II

Zonas	"C"	Área (ha)	Percentual
Pequenas chácaras	0,10 - 0,4	0,00	0,00
Mata Nativa	0,05 - 0,4	591,17	13,54
Total		4365,80	100,00

(Conclusão)

Fonte: Aatoria própria (2013)

Com as áreas de cada zona temática também foi encontrado o $C_{médio}$ para as três situações. As tabelas 4, 5 e 6 apresentam esses valores.

Tabela 4 - Coeficiente de escoamento superficial médio para a bacia na atual situação

Zonas	"C"	Valores Adotados	Área (m ²)	$C_{médio}$
Edificações muito densa	0,70 - 0,95	0,85	597044	
Edificações não muito densa	0,6 - 0,70	0,65	291280	
Edificações com poucas superfícies livres	0,5 - 0,6	0,55	6292075	
Edificações com muitas superfícies livres	0,25 - 0,5	0,5	8491270	0,4489
Pequenas chácaras	0,10 - 0,4	0,4	1215869	
Matas, parques e áreas rurais	0,05 - 0,4	0,4	26770462	
Total			43658000	

Fonte: Aatoria própria (2013)

Tabela 5 - Coeficiente de escoamento superficial médio da bacia para o caso I

Zonas	"C"	Valores Adotados	Área (m ²)	$C_{médio}$
Edificações muito densa	0,70 - 0,95	0,85	3474242	
Edificações não muito densa	0,6 - 0,70	0,65	353744	
Edificações com poucas superfícies livres	0,5 - 0,6	0,55	9483713	
Edificações com muitas superfícies livres	0,25 - 0,5	0,5	24434646	0,5264
Pequenas chácaras	0,10 - 0,4	0,4	0	
Mata Nativa	0,05 - 0,4	0,4	5911655	
Total			43658000	

Fonte: Aatoria própria (2013)

Tabela 6 - Coeficiente de escoamento superficial médio da bacia para o caso II

Zonas	"C"	Média Ponderada	Área (m ²)	Cmédio
Edificações muito densa	0,70 - 0,95	0,85	3474242	
Edificações não muito densa	0,6 - 0,70	0,65	353744	
Edificações com poucas superfícies livres	0,5 - 0,6	0,55	33918359	
Edificações com muitas superfícies livres	0,25 - 0,5	0,5	0	0,5544
Subúrbios	0,10 - 0,4	0,4	0	
Mata Nativa	0,05 - 0,4	0,4	5911655	
Total			43658000	

Fonte: Autoria própria (2013)

Como pode ser visto a cima à bacia do alto rio Ligeiro têm como característica uma ocupação atual do solo com bairros residenciais, poucas áreas com edificações muito densas, pequenas chácaras de agricultura familiar e a predominância de áreas verdes, agricultura, campos e capoeira fazendo com que o coeficiente de escoamento superficial para a bacia não se constitua tão alto.

A partir do momento que é feita a simulação de crescimento para o caso I os pequenos sítios desapareceram, as áreas verdes e de agricultura antes predominantes agora só constituem de vegetação nativa, as áreas com grande concentração de edificações cresceram 582% e as partes residenciais ocupam praticamente toda a superfície da bacia.

Para o caso II a transformação considerada é a pior situação de crescimento da bacia do alto Rio Ligeiro, possuindo agora bairros e novos loteamentos totalmente urbanizados, restando apenas às áreas com vegetação nativa para contribuir na infiltração do solo.

Através dos mapas é possível analisar que a bacia atualmente possui áreas com edificações densas somente na área central e restringindo-se na direção da Avenida Tupi. Com o crescimento essas áreas vão se expandir pouco lateralmente devido ao relevo e vão continuar a aumentar no eixo estrutural sul-norte e ganharão em verticalidade. As superfícies com agricultura e campos serão transformadas em bairros residenciais e industriais.

5.3 VAZÕES

5.3.1 Cálculo das Vazões Através do Método Racional Modificado

Para o cálculo da vazão através deste método é necessário encontrar todos os parâmetros envolvidos como a intensidade da chuva, o coeficiente de escoamento superficial, o coeficiente de retardo e abatimento.

A fim de se calcular o a intensidade da chuva é necessário primeiramente conhecer o tempo de concentração que foi calculado através da Equação 15 e é apresentado na tabela 7

Tabela 7 - Tempo de concentração de chuva para a área em estudo

Maior Cota (m)	Menor Cota (m)	Diferença entre cotas (m)	Talvegue Principal (km)	Declividade Média (m/km)	tc (min)
880	680	200	14,3	13,99	25,77

Fonte: Autoria própria.

Com o tempo de concentração e os tempos de recorrência definidos, através da Fórmula 14 é calculada a intensidade de chuva e os valores são expostos na tabela 8

Tabela 8 - Intensidade de chuva para os tempos de retorno e concentração estipulados

Intensidade da chuva (mm/h)					
tr (anos)	tc (minutos)	i1 (mm/h)	i2 (mm/h)	i5 (mm/h)	i10 (mm/h)
1					
2					
5	25,77	65,47	72,74	83,61	92,91
10					

Fonte: Autoria própria

Os valores do coeficiente de escoamento superficiais médios obtidos através dos mapas temáticos já foram citados e se encontram nas tabelas 4, 5, e 6, sendo respectivamente para a situação atual da bacia, caso I e caso II.

Finalizando os cálculos dos parâmetros utilizados foi calculado o coeficiente de retardo através da equação 16, e é mostrado na tabela 9.

Tabela 9 - Coeficiente de retardo pelo efeito da declividade para a bacia do alto Rio Ligeiro

Coeficiente de declividade	Comprimento do talvegue principal (km)	φ
3,00	14,3	0,19

Fonte: A autoria própria (2013)

Assim os parâmetros são aplicados no modelo de transformação chuva/vazão da Equação 4, e as vazões obtidas são apresentadas nas tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 - Vazões pelo Método Racional Modificado para a atual situação da bacia

Vazões Método Racional Modificado - Situação Atual

cmédio	Q_1 (m ³ /s)	Q_2 (m ³ /s)	Q_5 (m ³ /s)	Q_{10} (m ³ /s)
0,44889	62,72	75,24	86,48	96,10

Fonte: A autoria própria (2013)

Tabela 11 - Vazões pelo Método Racional Modificado para o caso I

Vazões Método Racional Modificado -Caso I

cmédio	Q_1 (m ³ /s)	Q_2 (m ³ /s)	Q_5 (m ³ /s)	Q_{10} (m ³ /s)
0,52639	74,91	88,23	101,41	112,69

Fonte: A autoria própria (2013)

Tabela 12 - Vazões pelo Método Racional Modificado para o caso II

Vazões Método Racional Modificado - Caso II

cmédio	Q_1 (m ³ /s)	Q_2 (m ³ /s)	Q_5 (m ³ /s)	Q_{10} (m ³ /s)
0,55437	83,63	92,92	106,81	118,69

Fonte: A autoria própria (2013)

Ao fim do cálculo nota-se o aumento nas vazões da bacia causado pelo crescimento urbano, como era esperado. Seguindo essa tendência o trabalho mostra que quanto mais impermeabilizada a superfície, maior será a vazão.

5.3.2 Cálculo das Vazões Através do Método I-Pai-Wu

Este método também se utiliza do coeficiente de escoamento superficial médio da bacia e da intensidade de chuva que já foram calculados e estão nas tabelas 4, 5, 6 e 8 respectivamente. Além disso, para se determinar as vazões é necessário conhecer o coeficiente de distribuição espacial que é encontrado através da figura 1. Como tempo de concentração calculado foi de 25,77 minutos, utilizou-se a curva de 30 minutos do ábaco, assim com uma área de 43,66 km² o valor de "K" para a bacia em estudo é apresentado na tabela 13.

Tabela 13 - Valores de "K" para a bacia em estudo

tr (minutos)	Área da bacia (km ²)	Coeficiente de distribuição espacial "k"
30	43,66	0,86

Fonte: Autoria própria (2013)

Finalizando o processo é feito a aplicação do modelo de transformação chuva/vazão da Equação 5 e são encontradas as vazões da bacia que estão apresentadas nas tabelas 14, 15 e 16..

Tabela 14 - Vazões pelo Método I-Pai-Wu para a atual situação da bacia

Método I-Pai-Wu - Situação Atual				
k	Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)
0,86	82,77	210,28	232,60	298,42

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 15 - Vazões pelo Método I-Pai-Wu para o caso I

Método I-Pai-Wu - Caso I				
k	Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)
0,86	97,06	246,59	272,76	349,93

Fonte: Autoria própria (2013)

Tabela 16 - Vazões pelo Método I-Pai-Wu para o caso II

Método I-Pai-Wu - Caso II				
k	Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)
0,86	102,22	259,69	287,26	368,54

Fonte: Autoria própria (2013)

O I-Pai-Wu apresenta o mesmo comportamento de aumento de vazão da bacia, conforme a superfície vai se impermeabilizando. Mas o que chama a atenção é a grande diferença de resultado entre este método e o Racional Modificado.

Não é possível apontar qual método está mais correto, já que a bacia do alto rio Ligeiro não possui uma vazão de projeto calculada para tomarmos como base.

5.4 CONTROLE DE CAMPO

Com o trabalho de campo foi possível comprovar que as áreas mais densas estão na região central, na sequência da Avenida Tupi, e é composta por prédios, poucas árvores e superfície praticamente impermeabilizada com pavimentação asfáltica e calçadas com pavers desgastados. Se fixarmos o ponto de partida da Avenida Tupi e se deslocarmos três quadras para as laterais a paisagem urbana já se modifica bastante, apresentando um número maior de residências, árvores e lotes vagos.

Nota-se que as áreas adjacentes ao centro não se estendem mais que uma quadra, como foi visto nas imagens de satélite e por isso são minorias no mapa de escoamento superficial.

Também se verifica grandes áreas residências com superfície livre, áreas verdes e agricultura no entorno do município de Pato Branco. Em torno das estradas que dão acesso a cidade são notados sítios pequenos com agricultura de subsistência. Desta forma foi possível verificar e comprovar que a classificação adotada no trabalho corresponde com a realidade. Assim a figura 25 apresenta o mapa de escoamento superficial da bacia do alto Rio Ligeiro e a indicação através de imagens das características da bacia.

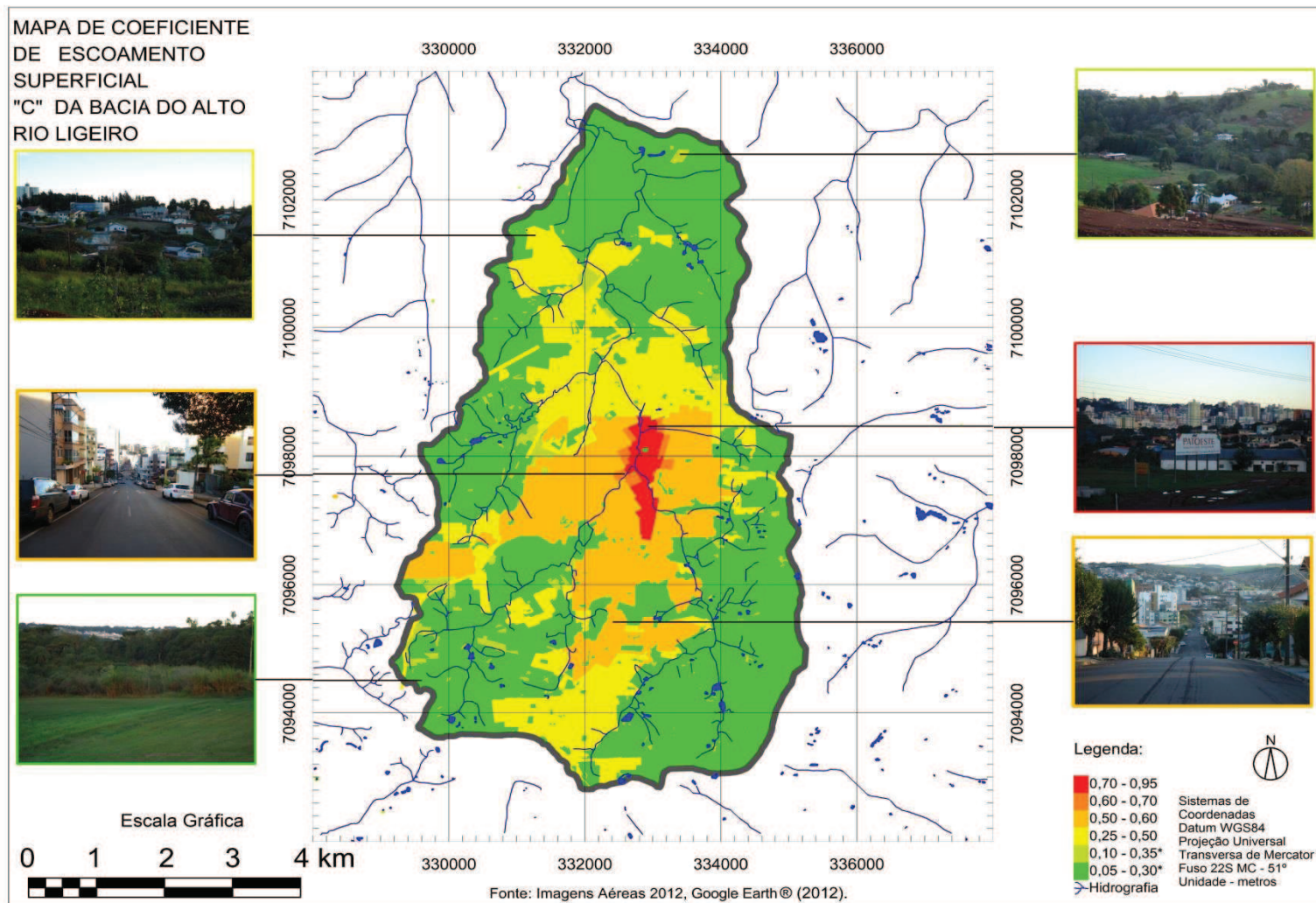


Figura 25 - Mapa de coeficiente de escoamento superficial "C" da bacia do alto rio Ligeiro

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográfica utilizadas no trabalho foram de grande importância para o mapeamento da bacia e classificação das áreas permeáveis e impermeáveis, obtendo o coeficiente de escoamento superficial médio.

O que se esperada da confecção destes mapas, é que eles sejam utilizados como ferramenta de apoio em obras não estruturais de contenção de enchente. Um exemplo disso é a utilização dos mapas de coeficiente de escoamento superficial para um melhor planejamento urbano e mudanças nas leis de macrozoneamento, zoneamento e no plano diretor. Essas alterações poderiam ser: diminuição do número de pavimentos em algumas áreas para evitar verticalidade, aumento da taxa de permeabilidade, utilização de parte do IPTU para melhores investimentos em drenagem urbana.

Os casos de simulações do crescimento urbano podem levar vários anos para acontecer ou provavelmente nem se concretizaram neste formato, mas sabe-se que há uma tendência de crescimento comprovado através de pesquisas realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A metodologia adotada para as simulações seguiram o que está determinado na lei de macrozoneamento da cidade, fazendo com que as zonas de ocupação controlada e de controle hídrico que se encontram mais ao sul da bacia fossem urbanizadas integralmente, porém a Sanepar coloca imposições para o crescimento nesses locais devido à presença do manancial Pato Branco, o qual faz o abastecimento do município. Assim havendo grande expansão urbana até essas áreas, a paisagem mudaria completamente, afetando o manancial que ali se encontra, comprometendo o abastecimento de água da cidade. Esse aumento urbano acarretaria também em problemas na distribuição de água a população já que a vazão ecológica do rio Pato Branco não seria respeitada. Outro serviço que seria afetado é o de saneamento básico que precisaria ser estruturado, ao mesmo tempo, a estação de tratamento de esgoto ficaria inserida dentro de áreas residenciais, provocando mau cheiro. Além disso, as novas áreas urbanizadas forçariam a canalização do restante do rio Ligeiro e em dias de chuva havendo

grande vazão, o mesmo não teria as áreas de várzeas para ocupar, ocasionando enchentes urbanas.

O controle de campo permitiu uma melhor visão das características da bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro, e ajudou a identificar cada tipologia de uso e ocupação do solo. Também foi possível ver a transformação da paisagem urbana, pois saindo da área central da cidade onde há concentração de edificações, e andando poucas quadras já se tem uma visão totalmente diferente apresentando mais casas e áreas livres.

Obtidas as vazões se comprovou que com a impermeabilização do solo provocada pela urbanização, há um aumento de vazão da bacia. Com os resultados alcançados não é possível fazer uma comparação entre os dois métodos, pois não se tem uma vazão de projeto calculada para a bacia, e também ambos os métodos são equações empíricas. Para uma análise mais criteriosa de cálculo da vazão, outra opção seria a instalação de postos fluviométricos ao longo do rio Ligeiro, ou se trabalhar com modelos calibrados de transformação chuva-vazão que são a curva número e hidrograma unitário.

Ao fim deste trabalho recomenda-se a utilização em projeto, as vazões obtidas pelo Método I-Pai-Wu, por apresentarem valores mais elevados.

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que o trabalho é viável por apresentar um mapa de coeficiente de escoamento superficial condizente com as características do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do alto Rio Ligeiro, uma metodologia de simulação de crescimento urbano baseada em um planejamento que já é esperado para a cidade de Pato Branco, incluindo a bacia em estudo e nos cálculos de transformação chuva/vazão se utilizou de métodos já consagrados, desta forma garantindo a eficácia deste trabalho como ferramenta de apoio para obras de contenção de enchentes, drenagem urbana e planejamento futuro da bacia.

REFERÊNCIAS

AUTODESK AUTOCAD complete board-level design system for Windows Vista/Seven/Eight. Versão F.51.0.0. U.S.A. Autodesk, Inc, 2011. 1 CD-ROM.

AUTODESK AUTOCAD MAP 3D complete board-level design system for Windows Vista/Seven/Eight. Versão F.51.0.0. U.S.A. Autodesk, Inc, 2011. 1 CD-ROM.

CANHOLI, Aluísio. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CARVALHO, Daniel da F; DA SILVA, Leonardo D. B. **Notas de Aulas Hidrologia: Escoamento Superficial**, 2006.

CORDERO, Ademar.; ALVES, Péricles M.; TERAN, Albanella. L. Medidas de Controle de Cheias e Erosão. **Revista de Estudos Ambientais**, Uberlândia, v. 1, n. 2, ago. 1999. Disponível em: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:uHpK23TUh28J:ceops.furb.br/index.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D5%26Itemid%3D27+%&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em 29 jul.2013, 11:18.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DE SÃO PAULO. **DP-H06**. Diretrizes de Projeto para Estudos Hidrológicos – Método de “I-Pai-Wu”. São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/NORMAS%20T%C3%89CNICAS%20INSTRU%C3%87%C3%95ES%20NOVAS/Hidr%C3%A1ulica%20e%20drenagem%20urbana/DH-H06.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2013, 11:25.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **DE 01/HID-002**. Projeto de Drenagem. São Paulo, 2001. Disponível em: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-H00-002_A.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2013, 11:03.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

ENEMOTO, Carolina. F. **Método para Elaboração de Mapas de Inundações: Estudo de Caso na Bahia do Rio Palmital, Paraná**. 2004, 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídrico e Ambiental) – Curso de Pós Graduação em Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2004. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/71853134/083-Carolina-Ferreira-Enomoto>>. Acesso em: 22 jun. 2012, 16:10.

FLORENZANO, Tereza G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FRANCO, Edu. J. **Dimensionamento de Bacias de Detenção das Águas Pluviais com Base no Método Racional**. 2004, 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídrico e Ambiental) – Curso de Pós Graduação em Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2004. Disponível em: <http://www.ppgerha.ufpr.br/dissertacoes/files/085-Edu_Jose_Franco.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2012, 15:30.

GASPAR, Joaquim A. **Cartas e Projeções Cartográficas**. 3. ed. Lisboa: Lidel, 2005.

GOOGLE EARTH. complete board-level design system for Windows Vista/Seven/Eight. Versão beta 7.1.3.21.153. U.S.A. Google Company, 2011.1.

JABUR, Andrea. S. **Alterações Hidrológicas Decorrentes de Mudança do Uso e Ocupação do Solo na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Ligeiro, Pato Branco – PR**. 2010, 175 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 2010. Disponível em: <http://www.floresta.ufpr.br/pos-graduacao/defesas/pdf_dr/2010/t285_0337-D.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2012, 15:10.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas Climáticas do Paraná**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em: 02 ago. 2012, 13:30.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. **Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu**. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br>>. Acesso em: 14 jun. 2012, 18:30.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE PATO BRANCO. **Lei de Zoneamento da Cidade de Pato Branco**. Disponível em: <<http://www.patobranco.pr.gov.br/downloads/LEIS%20DE%20ZONEAMENTO.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2013, 21:00

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE PATO BRANCO. **Mapas da Cidade de Pato Branco**. Disponível em: <http://ippupb-org-br.web02.webserverbr.net/digipb_mapas.php>. Acesso em: 25 jul. 2013, 20:57.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE PATO BRANCO. **Plano Diretor para a Cidade de Pato Branco**. Disponível em: < http://ippupb-org-br.web02.webserverbr.net/plano_diretor.php>. Acesso em: 25 jul. 2013, 20:54.

MAACK, Reinhard. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 3. ed. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002.

MICROSOFT WORD complete board-level design system for Windows Vista/Seven/Eight. Version Home. U.S.A: Microsoft Corporation, 2009.1 CD-ROM.

MICROSOFT EXCEL complete board-level design system for Windows Vista/Seven/Eight. Version Home. U.S.A: Microsoft Corporation, 2009.1 CD-ROM.

NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

NUNES, Fabrizia. G. **A Influência do Uso e Ocupação do Solo nas Vazões de Pico na Bacia Hidrográfica do Rio Atuba**. 2007, 175 f. Dissertação (Doutorado em Geologia Ambiental) – Curso de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2007. Disponível em: < <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/handle/1884/11164>>. Acesso em: 22 jun. 2012, 14:40.

PINTO Nelson. L. S et al. **Hidrologia Básica**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1976.

ROCHA, César. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora: ed. Do Autor, 2000.

TABALIPA, Ney. L. **Estudo da Estabilidade de Vertentes da Bacia do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná**. 2008 243 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Curso de Pós Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, 2008. Disponível em: < <http://dspace.c3sl.ufpr.br:8080/dspace/handle/1884/21252>>. Acesso em: 29 jul. 2013, 10:56.

TABALIPA, Ney. L; FIORI, Alberto. P. Influência do vento na estabilidade de taludes da bacia do rio Ligeiro, município de Pato Branco (PR). **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 9, n. 27, set. 2008. Disponível em: < http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-90822008000300008&nrm=iso>. Acesso em: 25 jul. 2012, 21:37.

TABALIPA, Ney. L. **Proposta para o Desenvolvimento Urbano do Município de Pato Branco, Paraná, Baseada em Critérios geológicos e Geomorfológicos.** 2002 137 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Curso de Pós Graduação em Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2002. Disponível em: <<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:3MLPUX97jf0J:ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/geociencias/article/download/4205/3401+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 25 jul. 2012, 10:31.

TUCCI, Carlos. E. M.; COLLISCHONN, Walter. **Drenagem Urbana e Controle de Erosão.** In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROÇÃO. Presidente Prudente: Sonopress, 1998.

TUCCI, Carlos. E. M et al. **Hidrologia: Ciência Aplicação.** 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009.

TUCCI, Carlos. E. M. **Modelos Hidrológicos.** 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

WILKEN, Paulo. S. **Engenharia de Drenagem Superficial.** Edição do autor. São Paulo: CETESB, 1978.

ANEXOS

ANEXO A

TABELA DE OCUPAÇÃO DO SOLO NAS MACROZONAS

TABELA DE OCUPAÇÃO DO SOLO NAS MACROZONAS - ANEXO XIV da Lei Complementar n.º 46 de 26 de maio de 2011													
MACROZONAS	ZONAS	sigla	coeficiente de aproveitamento básico	coeficiente de aproveitamento mínimo	coeficiente de aproveitamento máximo	taxa de ocupação %	taxa de permeabilidade %	número máximo de pavimentos	Altura máxima (m)	área mínima do lote (m²)	testada do lote (m)		
URBANAS	Macrozona de Expansão Urbana	Zona de Expansão Urbana	ZEX	0,1		0,1	10	90	2		10000	50	
		Zona Industrial -2	ZI2	1		*	60	20	3		2000		
	Macrozona de Adensamento Prioritário	Zona Interesse Histórico e Cultural	ZHC	2,0	0,2	*	60	15	4	21,5	360	12	
		Zona Central Consolidada	ZCC	4,0	0,2	5,0	50	15	8	33,5	360	12	
		Zona de Expansão Central -1	ZC1	6,0	0,2	*	55	10	12	42,5	360	12	
		Zona de Expansão Central -2	ZC2	4,0	0,2	5,0	60	10	8	33,5	200	12	
		Zona de Expansão Central -3	ZC3	3,0	0,2	*	50	10	6	27,5	360	12	
		Zona Residencial - 1	ZR1	1,5	0,2	*	50	30	3	14	360	12	
		Zona Residencial -2	ZR2	1,3	0,2	*	65	20	2	10	240	12	
		Zona Residencial -3	ZR3	1,0	0,2	*	50	40	2	10	360	12	
		Zona Industrial -1	ZI1	1,8	0,2	*	75	15	3	15	1000	20	
		Zona Industrial e Serviços	ZIS	1,4	0,2	*	70	10	2	10	500	20	
		Zona Institucional	ZIT	2,0	0,2	*	50	20	4	15	3000	50	
		Eixo Estrutural Sul-Norte	EE-SN	3,0	0,2	*	55	10	6	27,5	360	12	
	Macrozona de Adensamento Secundário	Zona Residencial -4	ZR4	1			50	30	2	10	360	12	
	Macrozona de Ocupação Controlada	Zona Residencial - 5	ZRS	0,6			30	60	2	10	450	15	
	Zonas Especiais	Zona Especial Vicinal	ZEV	definidos na Tabela para Ocupação do Solo nas Zonas Especiais - Anexo XV									
		Zona Especial de Int. Pais. e Ambiental	ZEPA										
Zona Especial de Interesse Social		ZEIS											
Zona Especial de Proteção do Aeródromo		ZEPAR											
RURAIS	MZ Agric. de Controle Hídrico	As zonas serão definidas nas glebas por aptidão de uso		0,2		*	20	80	2	10	10000		
	MZ Agric. de Prod. do Manancial												
	MZ Agroindustrial do Ligeiro												
	MZ Agric. do Rio Pato Branco	Agricultura; Pastagem; Silvicultura; Preservação da Fauna e da Flora; de Uso Comunitário, Industrial e Turístico Rural e em Conflito de Uso											
	MZ Agric. e Turística do Chopim												
	M Agric. da Bacia do Vitorino												

Fonte: Adaptado Instituto de Pesquisa e Planejamento de Pato Branco - IPPUPB (2013)

