



Rodrigo Jose Coelho Pereira

**Análise de Correlação entre Alterações na Cobertura
Vegetal e o Comportamento Hidrológico na Bacia
Hidrográfica do Rio Cachoeira - RJ**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rogério Ribeiro de Oliveira

Rio de Janeiro
Agosto de 2012



Rodrigo Jose Coelho Pereira

Análise de Correlação entre Alterações na Cobertura Vegetal e o Comportamento Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - RJ

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Rogério Ribeiro de Oliveira

Orientador
Departamento de Geografia – PUC-Rio

Prof. Luiz Felipe Guanaes Rego

Departamento de Geografia – PUC-Rio

Prof. Anderson Mululo Sato

UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Agosto de 2012.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Rodrigo Jose Coelho Pereira

Graduado em Engenharia Civil, com ênfase na área de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009/1). Atualmente é engenheiro de projetos atuando principalmente nas áreas de Hidrologia, Modelagem Hidrológica, Geoprocessamento e Obras Hidráulicas.

Ficha Catalográfica

Pereira, Rodrigo Jose Coelho

Análise de Correlação entre Alterações na Cobertura Vegetal e o Comportamento Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - RJ / Rodrigo Jose Coelho Pereira ; orientador: Rogério Ribeiro de Oliveira. – 2012.

86 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Engenharia urbana e ambiental. 3. Balanço hídrico. 4. Hidrologia florestal. 5. Evapotranspiração real. 6. Geoprocessamento. 7. Sensoriamento remoto. I. Oliveira, Rogério Ribeiro de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, em especial meus pais, Antonio e Vera, e meu avô, Arnaldo, por todo o apoio, compreensão e paciência concedida, não apenas durante o desenvolvimento do mestrado, mas ao longo dos meus 28 anos.

A minha namorada, Danyelle, pelo carinho, amor e incentivo, sempre me ajudando a passar por tudo.

Aos colegas de mestrado, que compartilharam comigo momentos importantes, tanto os difíceis quanto os de alegria, os quais me deixam lembranças inesquecíveis.

Ao meu professor e orientador, Rogério Ribeiro de Oliveira, pela oportunidade oferecida, suporte, críticas e sugestões fundamentais para a conclusão do estudo da presente dissertação e aprendizado.

Agradeço também àqueles aqui não mencionados, mas que guardo em meu coração, pela ajuda, pela amizade, pelo companheirismo, pelos ensinamentos e por compartilharem parte de suas vidas comigo.

Resumo

Pereira, Rodrigo Jose Coelho; Oliveira, Rogério Ribeiro de (Orientador). **Análise de Correlação entre Alterações na Cobertura Vegetal e o Comportamento Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira - RJ.** Rio de Janeiro, 2012. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho teve como unidade de estudo a bacia hidrográfica do rio Cachoeira, localizada na vertente sul do Maciço da Tijuca, município do Rio de Janeiro. O objetivo geral do estudo foi analisar os efeitos das alterações na cobertura vegetal dessa bacia sobre seu comportamento hidrológico. As componentes hidrológicas selecionadas para análise foram a evapotranspiração real e a vazão média na exutória da bacia. Através do método do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather, aplicado de forma sequencial, foi estimada uma série mensal de evapotranspirações reais da bacia. Foram utilizados nesse método de balanço hídrico dados de temperaturas médias do ar e totais precipitados na região. A série de vazões médias na exutória da bacia foi obtida utilizando-se como referência as estações fluviométricas Capela Mayrink e Itanhangá, ambas situadas no interior da bacia. Por meio de tecnologias de geoprocessamento e sensoriamento remoto foram mapeadas dez imagens do satélite Landsat-5/TM, estimando-se assim as alterações ocorridas na cobertura vegetal da bacia. Finalmente buscou-se estabelecer correlações entre as variações da cobertura vegetal e das componentes hidrológicas selecionadas. O resultado obtido para a evapotranspiração real foi satisfatório, indicando uma relação direta com a dinâmica da cobertura da bacia. Entretanto não foi possível estabelecer para a vazão média uma correlação de qualidade semelhante. Através desse estudo adquiriu-se um melhor entendimento sobre a influência da variação da cobertura vegetal no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Cachoeira.

Palavras-chave

Balanço hídrico; hidrologia florestal; evapotranspiração real; geoprocessamento; sensoriamento remoto.

Abstract

Pereira, Rodrigo Jose Coelho; Oliveira, Rogério Ribeiro de (Advisor). **Correlation Analysis between Land Cover Changes and Hydrologic Behavior in River Cachoeira Watershed - RJ.** Rio de Janeiro, 2012. 86p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work had as unit of study the Cachoeira river watershed, located on the southern slope of the Tijuca Massif, city of Rio de Janeiro, between the parallels 22° 56' and 23° 00' of south latitude and the meridians 43° 15' and 43° 19' of west longitude. The watershed has a triangular shape, covering a drainage area of 21,7 km².

The general objective of the study was to analyze the effects of land cover changes on hydrological processes of the Cachoeira river watershed. The hydrological components selected for analysis were the real evapotranspiration and the mean flow at the exutory of the watershed. Through the Thornthwaite and Mather water balance method, applied sequentially to the period between 1997 and 2010, a monthly series of real evapotranspiration was established. The choice of this method was based on the compatibility of the data required by the method with the hydrometeorological available data.

Monthly series of average air temperatures and total precipitations was used to calculate the water balance of Thornthwaite and Mather. The average air temperature data were obtained from the pluviometric station Alto da Boa Vista, located around the watershed. In order to obtain a complete and consistent data series of average air temperatures, a correlation was established of these data with the data from the climatological station of the city of Rio de Janeiro. Through this correlation was possible to confirm the consistency of the series of air temperatures and fill any gaps from 1997 until the year 2010. In this period the monthly series of average air temperatures had a mean of 22,1 °C, ranging from a maximum of 27,5 °C and a minimum of 17,8 °C. The pluviometric data used as reference for the average rainfall over the Cachoeira river watershed, was recorded at the pluviometric station Capela Mayrink, located within the watershed. The consistency of this series has been verified before the other pluviometric stations around the watershed by the method of the double mass,

which could confirm the consistency because no deviations were found in the precipitation behavior over time. The average annual precipitation over the watershed was 2.181 mm.

The highest estimated values of real evapotranspiration were found in the rainy season, between December and March. The estimated average value of annual real evapotranspiration during the studied period was 1.056 mm, ranging between 1.007 mm and 1166 mm. This average value corresponds to approximately 50% of total annual precipitated, in other words, it is indicated that half of the precipitation over the watershed would return to the atmosphere by the processes of the hydrological cycle. Besides the real evapotranspiration, the water balance also provided an estimation of the water extract of the watershed, calculating components as water deficit, water surplus and soil water storage.

The mean monthly flow series at the exutory of the watershed was obtained by referencing the data recorded at the fluviometric stations Capela Mayrink and Itanhangá, both located within the watershed. The data from these stations have gone through a consistency analysis, where their fluviometric levels were verified together and their rating curves were elaborated to represent an adequate adjustment to their liquid discharge measurements. After the consistency analysis, the fluviometric levels data were transformed into flows, through the rating curves. The methodology adopted to generate the flow series at the exutory of the watershed consisted primarily in the extension of the flows series at Itanhangá station through correlation with the flows at Capela Mayrink station. Subsequently, the extended flow series at Itanhangá station was transferred to the exutory location by proportionality between drainage areas. Due to the lack of local data, it was not possible to obtain a mean monthly flow series without gaps.

The comparison of the flow data with the precipitation data, obtained for the Cachoeira river watershed, showed a coherent behavior over the years. The annual variation of rainfall in the watershed was accompanied by the flow.

It was possible to estimate the changes in land cover during the period from 1988 to 2010 using geoprocessing and remote sensing technologies, available at the extension Spatial Analyst Tool from the software ArcGIS 9.3. In order to obtain this data, a geographic information system was developed for the Cachoeira river watershed, composed by a digital terrain model, obtained from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), and by ten digital images obtained

from the satellite Landsat-5/TM, spaced in average every two years during the studied period.

The digital terrain model was used to generate the information grids of Flow direction and Flow accumulation. Through these grids, the watershed and the drainage areas of the fluvimetric stations could be automatically delineated. The delimitation of the fluvimetric stations drainage areas was done in order to verify the official areas mentioned in the inventory stations of the Brazilian National Water Agency. Although the calculated values did show differences in comparison with the official ones, they were used in the study, considering that the relative errors are minimized when using the same geographic basis.

Initially the application of digital processing techniques on satellite images consisted of a combination of bands 5, 4, 3, to form the color composite R, G, B. All images were georeferenced at the same control points in the UTM projection system, using the Datum WGS-84, Zone 23 South. Subsequently the images were classified using the supervised classification maximum likelihood. To characterize the dynamics of land cover over time, two thematic classes were chosen: Forest Area, which has forest cover and others natural features not modified by human activities and Non-Forest Area, which includes urbanized areas and most areas that original feature has been changed as a result of human activities and. The signature samples collected for each training were simple and spatially well distributed, within the region of the studied watershed.

Since the supervised classification was an automatic process, the thematic products generated showed errors, identified as isolated cells outside the context of the classes, which left the areas fragmented. In order to work around these errors and provide uniformity of the mapped classes a post-classification process was done on the images by applying a majority filter, which replaces isolated cells based on the majority of their contiguous neighboring cells. Even so, a small portion of the thematic products still showed classification errors, so they were manually edited to become more representative. Ten thematic maps of land cover for the Cachoeira river watershed were generated as products of these processes. The validation of each thematic map classification was verified through the confusion matrix. Considering that only two thematic classes with distinct characteristics were used, the performance of the confusion matrix was tendentious and insufficient to ensure the accuracy of the classification. In order

to evaluate the quality of the thematic maps obtained, the thematic map generated for 2010 was compared with the official one, provided by the Municipal Secretariat of Environmental of Rio de Janeiro (SMAC). This comparison could validate the consistency of the thematic map of 2010, believing that the other thematic maps also represent an estimate of the land cover reality from past period.

The ten thematic maps could estimate the history of land cover changes on the Cachoeira river watershed. It was observed at the maps that there were changes in the shape of the occupation of the watershed, however, in accordance with the estimated percentages, the evolution of land cover in the watershed had a steady behavior over the years. The consecutive differences found did not exceed the order of 3%.

Finally, correlations were established between the variation of the areas with forest coverage and the variation of the selected hydrological components. The result obtained at the real evapotranspiration correlation was satisfactory, which indicates a direct relationship between this hydrological component and the watershed land cover dynamic. However it was not possible to establish a correlation of similar quality with the mean flow.

This study could contribute as an exercise to aggregate knowledge about the influence of land cover on hydrological processes over time.

Keywords

Water balance; forest hydrology; real evapotranspiration; geoprocessing; remote sensing.

Sumário

1. Introdução.....	17
2. Objetivos.....	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3. Referencial Teórico.....	20
3.1 O Ciclo Hidrológico.....	20
3.2 Hidrologia Florestal	21
3.3 Estimativa da Evapotranspiração.....	23
3.3.1 O Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather	24
3.4 Sistemas de Informação Geográfica e Geoprocessamento	26
3.5 Sensoriamento Remoto.....	28
4. Material e Métodos	32
4.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica de Estudo.....	32
4.1.1 Caracterização Fisiográfica	32
4.1.2 Caracterização Climatológica	34
4.2 Seleção da Base de Dados.....	37
4.2.1 Seleção de Dados Geográficos	37
4.2.2 Seleção de Dados Hidrometeorológicos.....	38
4.2.3 Seleção de Dados de Satélite	42
4.3 Tratamento da Base de Dados	43
4.3.1 Tratamento dos Dados Geográficos	43
4.3.2 Tratamento dos Dados Hidrometeorológicos	45
4.3.3 Tratamento dos Dados de Satélite	55
5. Resultados e Discussões.....	59
5.1 Comportamento Hidrológico da Bacia.....	59
5.1.1 Análise da Relação Anual entre a Precipitação e a Vazão...59	

5.1.2	Estimativa da Evapotranspiração pelo Método do Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather.....	60
5.2	Dinâmica da Cobertura Vegetal	65
5.3	Correlações.....	68
6.	Conclusões e Recomendações	71
7.	Referências Bibliográficas	74
Apêndice A - Curvas Duplo-acumulativas das Estações Pluviométricas.....		
		78
Apêndice B - Precipitações Totais Mensais na Bacia do Rio Cachoeira (mm)		
		80
Apêndice C - Vazões Médias Mensais na Exutória da Bacia do Rio Cachoeira (m ³ /s)		
		81
Apêndice D – Temperaturas Médias do Ar na Estação Alto da Boa Vista (°C).....		
		82
Apêndice E – Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather para a Bacia do Rio Cachoeira		
		83

Lista de Figuras

Figura 3-1 - Ciclo Hidrológico	20
Figura 3-2 - Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica.....	26
Figura 3-3 - Representação das Três Entidades do Modelo Vetorial	27
Figura 3-4 - Representação das Três Entidades do Modelo Matricial	27
Figura 3-5 - O Espectro Eletromagnético e suas Principais Regiões	29
Figura 4-1 - Mapa de Localização da Bacia do Rio Cachoeira.....	32
Figura 4-2 - Perfil Longitudinal do Rio Cachoeira	33
Figura 4-3 - Características Climatológicas da Região – Temperaturas (1961 a 1990).....	35
Figura 4-4 - Características Climatológicas da Região – Evaporação e Umidade (1961 a 1990).....	35
Figura 4-5 - Características Pluviométricas da Bacia do Rio Cachoeira (1976 a 2010).....	37
Figura 4-6 - Localização das Estações Hidrometeorológicas	40
Figura 4-7 - Sequência de criação dos planos de informação.....	44
Figura 4-8 - Delimitação das Áreas de Drenagem dos Locais de Interesse.....	45
Figura 4-9 - Curva Duplo-acumulativa da Estação Pluviométrica Capela Mayrink	47
Figura 4-10 - Precipitação Total Mensal na Bacia do Rio Cachoeira	48
Figura 4-11 - Comparação entre as leituras de régua médias diárias das estações	49
Figura 4-12 - Curva-chave do Rio Cachoeira na Estação Capela Mayrink	50
Figura 4-13 - Curva-chave do Rio Cachoeira na Estação Itanhangá	51
Figura 4-14 - Correlação de Vazões Médias Mensais entre as Estações Capela Mayrink e Itanhangá (abril/1976 a abril/1981)	52
Figura 4-15 - Vazões Médias Mensais na Exutória da Bacia do Rio Cachoeira.....	52
Figura 4-16 - Correlação Mensal de Temperaturas Médias do Ar entre as Estações Rio de Janeiro e Alto da Boa Vista (fev/2003 a dez/2005)..	53

Figura 4-17 - Temperaturas Médias do Ar na Estação Alto da Boa Vista	54
Figura 4-18 - Registro da Imagem de 2010 Corrigida Geograficamente.....	56
Figura 5-1 - Comportamento Anual da Precipitação e da Vazão na Bacia	59
Figura 5-2 - Correlação Anual da Precipitação com a Vazão na Bacia ...	60
Figura 5-3 - Precipitação Total Mensal e Temperatura Média do Ar na Bacia do Rio Cachoeira entre 1997 e 2010.....	61
Figura 5-4 - Extrato do Balanço Hídrico Mensal para o Período de 1997 a 2010	62
Figura 5-5 - Variação Mensal do Armazenamento de Água no Solo entre 1997 e 2010	62
Figura 5-6 - Evapotranspiração Potencial e Evapotranspiração Real, entre 1997 e 2010	63
Figura 5-7 - Variação da Evapotranspiração Real e da Vazão (1997 a 2010)	64
Figura 5-8 - Variação da Evapotranspiração Real e da Precipitação (1997 a 2010).....	64
Figura 5-9 - Mapas de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira em Função das Classes “Área Florestal” e “Área Não Florestal”	66
Figura 5-10 - Quantificação do Mapeamento de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira.....	67
Figura 5-11 - Comparação dos Mapeamentos Temáticos de Cobertura Florestal - 2010	67
Figura 5-12 - Correlação entre a Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Evapotranspiração Real Estimada na Bacia do Rio Cachoeira	69
Figura 5-13 - Correlação entre a Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Vazão Média na Bacia do Rio Cachoeira	70

Lista de Tabelas

Tabela 3-1 - Classificação sobre a mudança e uso do solo.....	22
Tabela 3-2 - Características Espectrais e Espaciais do Sensor TM do Satélite Landsat-5	30
Tabela 3-3 - Principais características e aplicações das bandas do sensor TM do satélite Landsat-5	31
Tabela 4-1 - Índices Fluviomorfológicos da Bacia do Rio Cachoeira	33
Tabela 4-2 - Características Climatológicas da Região – Temperaturas, Evaporação e Umidade (1961 a 1990)	34
Tabela 4-3 - Características Pluviométricas da Bacia do Rio Cachoeira (1976 a 2010).....	36
Tabela 4-4 - Dados Geográficos Seleccionados.....	38
Tabela 4-5 - Estações Fluviométricas Seleccionadas	39
Tabela 4-6 - Estações Pluviométricas Seleccionadas	39
Tabela 4-7 - Estação Climatológica Seleccionada.....	39
Tabela 4-8 - Disponibilidade de Dados Fluviométricos	41
Tabela 4-9 - Disponibilidade de Dados Pluviométricos.....	41
Tabela 4-10 - Disponibilidade de Dados Climatológicos.....	41
Tabela 4-11 - Áreas de Drenagem Calculadas nos Locais de Interesse .	45
Tabela 5-1 - Valores Anuais da Precipitação e da Vazão na Bacia	59
Tabela 5-2 - Evapotranspiração Real Mensal Estimada (1997 a 2010)...	61
Tabela 5-3 - Quantificação do Mapeamento de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira.....	66
Tabela 5-4 - Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Evapotranspiração Real Estimada na Bacia do Rio Cachoeira.....	68
Tabela 5-5 - Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Vazão Média na Bacia do Rio Cachoeira	70

Lista de Abreviaturas

Agritempo	Sistema de Monitoramento Agrometeorológico
ANA	Agência Nacional de Águas
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DGI	Divisão de Geração de Imagens do INPE
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
GEORIO	Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro
Hidroweb	Sistema de informações hidrológicas da ANA
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INEA	Instituto Estadual de Ambiente
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPP-Rio	Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos
LabGis	Laboratório de Geoprocessamento da PUC-Rio
MDT	Modelo Digital do Terreno
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SMAC	Secretaria Municipal de Meio Ambiente
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UTM	Universal Transverso de Mercator
WGS-84	<i>World Geodetic System – 1984</i>

Lista de Símbolos

ARM	Armazenamento de água no solo (mm)
CAD	Capacidade de água disponível no solo (mm)
DEF	Deficiência hídrica (mm)
ETP	Evapotranspiração potencial (mm)
ETR	Evapotranspiração real (mm)
EXC	Excedente hídrico (mm)
h_o	Leitura de régua correspondente ao zero da régua (cm)
i	índice de calor
I_t	Índice anual de eficiência de temperatura
LR	Leitura de régua correspondente à vazão Q (cm)
m e n	Parâmetros de ajuste de curva-chave
N	Fotoperíodo (h)
ND	Número de dias no mês
Q	Vazão (m^3/s)
R^2	Coefficiente de determinação
$T_{méd}$	Temperatura média mensal do ar ($^{\circ}C$)

1. Introdução

A gestão dos recursos hídricos no Brasil é um assunto que vem ganhando cada vez mais relevância em estudos sobre o meio ambiente. Abrangendo medidas ambientais de controle, preservação e recuperação, os instrumentos de gestão são de fundamental importância na manutenção da qualidade e quantidade dos recursos hídricos, que por sua vez estão diretamente ligados ao desenvolvimento social e econômico de uma região.

Conforme a Lei N° 9.433/97, a Política Nacional de Recursos Hídricos estabelece como principal unidade hidrológica de uma região a bacia hidrográfica (Brasil, 1997). O monitoramento da bacia hidrográfica aliado ao conhecimento científico sobre hidrologia é essencial para a compreensão do comportamento hidrológico da mesma, ou seja, como funciona a circulação das águas em seu ecossistema solo-vegetação-atmosfera.

Apesar da crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, em diversas bacias hidrográficas brasileiras ainda temos a problemática da expansão da ocupação antrópica de forma desordenada, que normalmente acarreta para a região práticas como a remoção de cobertura vegetal e indevido uso do solo, modificando o sistema natural da bacia.

Diante desse quadro, temos como hipótese que alterações na cobertura vegetal e nas propriedades físicas do solo, impostas por processos antrópicos, interferem na dinâmica dos recursos hídricos com o ecossistema solo-vegetação-atmosfera, trazendo impactos negativos para a bacia. As consequências esperadas seriam a diminuição da infiltração do solo e das perdas por evapotranspiração, ocasionando um aumento do escoamento superficial e a degradação da qualidade das águas.

Pretendeu-se com o presente estudo analisar essa hipótese, contribuindo para um melhor entendimento sobre a influência da variação da cobertura vegetal no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Para tal foi escolhida como estudo de caso a bacia hidrográfica do rio Cachoeira, localizada na vertente sul do Maciço da Tijuca, município do Rio de Janeiro. Ressalta-se que não foram avaliadas questões relacionadas à qualidade das águas do rio Cachoeira.

Essa bacia foi escolhida como unidade de estudo, pois se constitui de uma área de expansão do município do Rio de Janeiro que apresenta ocupações urbanas formais e informais em limites de encostas sob área florestal conservada. Além disso, possui uma rede de monitoramento hidrometeorológico com informações disponíveis e suficientes para realização de um estudo hidrológico adequado.

Através da aplicação de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto foram gerados, ao longo do período de 1988 a 2010, mapeamentos temáticos que quantificassem as alterações ocorridas nas formas das áreas florestais na bacia do rio Cachoeira. O resultado dessa estimativa foi correlacionado às alterações do comportamento das componentes hidrológicas de evapotranspiração real e de vazão média da bacia.

Diante do apresentado ressalta-se a importância do trabalho aqui desenvolvido no âmbito de estudos ambientais e hidrológicos. Além disso, fica demonstrado o potencial da utilização de tecnologias inovadoras de geoprocessamento e sensoriamento remoto, aplicáveis não apenas em estudos de caráter ambiental, urbano e de recursos hídricos, mas também em outras áreas de conhecimento da engenharia.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente estudo é analisar os efeitos das alterações na cobertura vegetal da bacia do rio Cachoeira sobre a evapotranspiração real estimada. Além desta análise foi também avaliada a relação dessas alterações sobre as vazões médias da bacia. Assim, objetiva-se entender melhor a influência da cobertura vegetal no comportamento hidrológico dessa bacia.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos estabelecidos para se alcançar o objetivo geral descrito acima foram:

- Obter séries históricas consistentes de precipitações totais mensais, vazões médias mensais e temperaturas médias do ar para a bacia hidrográfica;
- Estimar a evapotranspiração real da bacia hidrográfica pelo método do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), aplicado de forma sequencial;
- Elaborar através de tecnologias de geoprocessamento e de sensoriamento remoto mapas temáticos ambientais de cobertura vegetal;
- Quantificar as alterações ocorridas na bacia hidrográfica para as áreas florestais, correlacionando-as com as séries históricas de evapotranspiração real e vazão média.

3. Referencial Teórico

3.1 O Ciclo Hidrológico

O fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação da terra, é chamado de ciclo hidrológico (Tucci, 1993). É um fenômeno contínuo, onde a água nunca se cria ou é eliminada, apenas se transforma entre os estados físicos da matéria.

De acordo com Kobiyama (1999), o ciclo hidrológico é o principal tema da hidrologia que envolve grande diversidade de processos hidrológicos. Estes podem ser divididos em processos verticais e horizontais. Como exemplos de processos verticais temos condensação, precipitação, evapotranspiração, infiltração e percolação, e como exemplos de processos horizontais temos os escoamentos superficial e subsuperficial. A Figura 3-1 ilustra uma representação do ciclo hidrológico e seus processos.

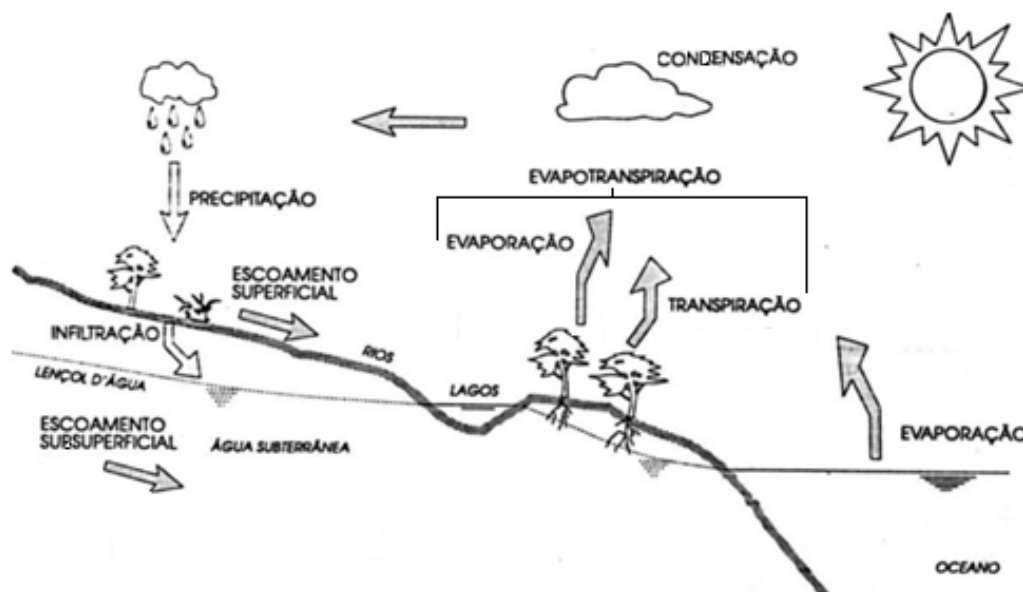


Figura 3-1 – Ciclo Hidrológico

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 1996.

O ciclo hidrológico pode ser descrito simplificado da seguinte forma: a energia transferida através da radiação solar faz com que a água da superfície evapore e nos vegetais ocorra a transpiração seguida da evaporação (evapotranspiração). O vapor de água é transportado pela circulação atmosférica e se condensa, formando nuvens, até que precipite sobre a superfície. Parte da água precipitada no solo se infiltra recarregando os lençóis freáticos e parte

escoa superficialmente ou em subsuperfície, até desaguar em rios, lagos ou oceanos reiniciando assim o ciclo hidrológico (Tucci, 1993).

Kobiyama et al. (2008) indicam que a variabilidade espacial e temporal dos recursos hídricos são devidas ao ciclo hidrológico. Isso significa que há regiões que possuem mais água do que outras, influenciadas pelo clima, vegetação e características próprias do local e que dependendo da época do ano, a quantidade de água também varia, tendo-se meses mais chuvosos do que outros.

3.2 Hidrologia Florestal

Desde o entendimento sobre os processos do ciclo hidrológico terrestre, o homem vem buscando entender qual é o papel exercido pelas florestas no ciclo hidrológico. Segundo Tucci e Clarke (1997), a vegetação tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água. A vegetação retém uma parcela inicial da precipitação, logo quanto maior for a superfície de folhagem, maior será a área de interceptação. A parcela da precipitação que chega ao solo pode atravessar a vegetação florestal ou ser conduzida através dos troncos, escoando ou infiltrando, de acordo com a capacidade de infiltração do solo.

Solos desprovidos de vegetação, com superfícies vulneráveis a compactação, apresentam reduzida capacidade de infiltração e conseqüentemente maior quantidade de escoamento superficial. A presença de vegetação florestal indica normalmente uma alta capacidade de infiltração do solo, o que traduz uma pequena quantidade de escoamento superficial. (Tucci e Clarke, 1997).

De acordo com Trimble et al. (1987 *apud* Balbinot et al., 2008), a pequena quantidade de escoamento superficial em bacias hidrográficas com cobertura florestal também ocorre em função do aumento das perdas da água devido à evapotranspiração. Segundo a revisão da literatura realizada por Balbinot et al. (2008), muitos estudos mostram que as perdas de água devido à evapotranspiração são mais significantes em bacias com floresta do que com outra cobertura vegetal.

Observa-se pelas descrições anteriores que as relações solo-vegetação-atmosfera são muito complexas, promovendo forte influência na dinâmica do

ciclo hidrológico das bacias hidrográficas. Além dos processos naturais pode-se incluir a ação humana, que interfere nos ecossistemas através de alterações quanto ao uso e manejo do solo (Tucci e Clarke, 1997).

Tucci e Clarke (1997) definem três classes de alterações humanas sobre o uso e manejo do solo de bacias hidrográficas: quanto ao tipo de mudança da superfície, ao tipo de uso da superfície ou ao método de alteração da superfície. A tabela 3-1 apresenta as principais alterações.

Tabela 3-1 – Classificação sobre a mudança e uso do solo

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Desmatamento • Reflorestamento • Impermeabilização
O uso da superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Urbanização • Reflorestamento para exploração sistemática • Desmatamento: extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas permanentes
Método de alteração da superfície	<ul style="list-style-type: none"> • Queimada • Manual • Equipamentos

Fonte: Tucci e Clarke, 1997.

Segundo Tucci e Clarke (1997), os primeiros estudos experimentais para avaliação dos impactos causados pelas modificações físicas em bacias hidrográficas tiveram início em 1911 nos Estados Unidos da América. Posteriormente foram realizados inúmeros estudos experimentais em diferentes locais do mundo. De modo a criar uma padronização desses estudos experimentais sobre o papel da floresta no ciclo hidrológico, McCulloch e Robinson (1993 *apud* Tucci e Clarke, 1997) classificaram os estudos em três principais grupos, conforme apresentado a seguir:

- I. Estudos de correlação: Onde são realizadas análises de correlação entre bacias de diferentes características climáticas, cobertura, uso do solo e morfologia;

- II. Estudos de uma única bacia: Onde se busca estabelecer uma relação entre as condições prévias e posteriores às mudanças de cobertura e uso do solo, examinando as relações hidrológicas; e
- III. Estudos com pares de bacias: Nesse estudo são selecionadas duas bacias com características similares particularmente em morfologia, clima, e uso do solo. Uma bacia é submetida à alteração do uso do solo enquanto a outra é mantida preservada.

O caso do estudo aqui apresentado se enquadra no segundo grupo, porém não foi realizado de forma experimental, mas sim analítica, através da utilização de séries históricas existentes e da evolução da cobertura vegetal documentada em imagens de satélite.

3.3 Estimativa da Evapotranspiração

É denominada evapotranspiração a ocorrência dos processos simultâneos de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água do solo e da vegetação úmida e por transpiração das plantas (Angelocci e Sentelhas, 2009).

A evaporação é um processo físico que corresponde à mudança do estado líquido para o estado gasoso e a transpiração é um processo biofísico pelo qual a água que passou pela planta, fazendo parte de seu metabolismo, é transferida para a atmosfera (Angelocci e Sentelhas, 2009).

A evapotranspiração é afetada por fatores climáticos e de cultura vegetal. Com relação aos componentes climáticos, a evapotranspiração depende de fatores como: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, chuva e pressão de vapor. Quanto à vegetação, a evapotranspiração depende principalmente dos fatores: área e arquitetura foliar, estágio de desenvolvimento e resistência do dossel (Medeiros, 2002).

Segundo Tucci (1993), é muito difícil estimar com exatidão essa componente do ciclo hidrológico, pois as informações confiáveis são escassas e de difícil obtenção, visto que demandam um longo histórico de observações e alto custo. Diante disso, a estimativa da evapotranspiração pode ser obtida a partir de diversos métodos baseados em leis físicas ou métodos empíricos, porém a maior parte deles exige parâmetros de difícil aquisição.

A estimativa da evapotranspiração foi realizada, no presente trabalho, através do método do Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), descrito no item seguinte. Essa escolha baseou-se na compatibilidade dos dados requeridos pelo método com os dados hidrometeorológicos disponíveis.

3.3.1 O Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather

Segundo Camargo e Camargo (2000), até o início da década de 40 a climatologia contava com técnicas insatisfatórias de medidas e que utilizavam diferentes unidades. Em 1941, Thornthwaite e Holzman concluíram que:

“Não existe ainda técnica satisfatória para medir a perda de umidade de superfícies naturais, como de campos e de bacias hidrográficas. Consequentemente a falta de dados de evaporação e transpiração tem atrasado bastante a análise e a solução de muitos problemas climáticos e hidrológicos. Espera-se que estudos de evaporação, em superfícies geográficas, dêem informações no sentido de esclarecer e solucionar a questão.” (Thornthwaite e Holzman, 1941 *apud* Camargo e Camargo, 2000)

Poucos anos depois, em 1944, Thornthwaite e Wilm trouxeram uma solução para este problema através do desenvolvimento e introdução dos conceitos de evapotranspiração potencial e evapotranspiração real, bem como dos métodos para quantificá-las por apenas uma unidade de medida, milímetros pluviométricos (Camargo e Camargo, 2000). Camargo e Camargo (2000) apresentam as seguintes definições para esses processos:

- Evapotranspiração potencial (ETP): processo de perda de água para a atmosfera por uma superfície natural gramada, sem restrição hídrica para atender as necessidades da evaporação do solo e da transpiração;

- Evapotranspiração real (ETR): processo de perda de água para a atmosfera por uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal.

A possibilidade de uso de apenas uma unidade de medida permitiria estimar a disponibilidade de água no solo, através de um simples balanço hídrico climático. Esse modelo ficou amplamente conhecido na época devido ao impacto causado nas ciências meteorológicas. Posteriormente, no ano de 1955, o modelo de balanço hídrico proposto por Thornthwaite foi incrementado por Mather, que ficou conhecido como “Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather” (Camargo e Camargo, 2000).

Esse método empírico de balanço hídrico pode ser empregado em nível mensal para qualquer capacidade de água disponível (CAD), necessitando apenas das coordenadas geográficas, dos dados de precipitação pluvial e da temperatura média do ar.

A estimativa mensal da evapotranspiração potencial (ETP), considerando a variação do número de dias em cada mês e do número de horas em cada dia (fotoperíodo), pode ser calculada pela equação de Thornthwaite (1948):

$$ETP = 16 \times \left(\frac{10 \times T_{Méd}}{I_t} \right)^a \times \frac{ND}{30} \times \frac{N}{12}$$

Onde $T_{Méd}$ é a temperatura média mensal do ar, em °C; a e I_t são índices obtidos a partir dessa temperatura; ND é o número de dias no mês; e N é o número de horas entre a alvorada e o ocaso do Sol (fotoperíodo).

O coeficiente a é calculado através da seguinte expressão:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \times I_t^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \times I_t^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \times I_t + 0,49239$$

O índice anual de eficiência de temperatura I_t , é obtido pela soma dos doze valores mensais de índice de calor i , como segue:

$$I_t = \sum_{1}^{12} i$$

$$i = \left(\frac{T_{Méd}}{5} \right)^{1,514}$$

Após a estimativa da evapotranspiração potencial o método calcula o extrato do balanço hídrico, fornecendo estimativas da evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e armazenamento de água no solo (ARM) (Camargo e Camargo, 1993).

Se a umidade no solo for suficiente, a evapotranspiração potencial dependerá apenas da energia solar para ocorrer. Caso ocorra deficiência hídrica, a evapotranspiração potencial ficará reduzida e deixará de ser potencial, sendo denominada então, evapotranspiração real (Camargo e Camargo, 2000).

3.4 Sistemas de Informação Geográfica e Geoprocessamento

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser definido como um sistema para introduzir, guardar, manipular, analisar e visualizar dados geográficos ou espaciais (Congalton, 1992). Os SIGs permitem incontáveis aplicações em várias áreas do conhecimento, permitindo a realização de análises complexas e integração de dados de diferentes fontes e diferentes escalas. O uso dessa ferramenta contribui para que melhor se conheça e compreenda os fenômenos relacionados à aplicação em questão (Câmara et al., 2005).

De acordo com Câmara et al. (1996), a ligação entre os dados geográficos e as funções de processamento do SIG é feita por mecanismos de seleção e consulta, definindo restrições sobre o conjunto de dados. Esta ligação é denominada geoprocessamento.

Câmara et al. (2005) ainda enfatiza que as funções utilizadas no geoprocessamento dependem do tipo dos dados envolvidos e das aplicações desejadas. Constituem-se como exemplos de funções de processamento o mapeamento de localização, o cruzamento de dados, medidas de distância e área, além do processamento digital de imagens e elaboração de modelos digitais de terreno.

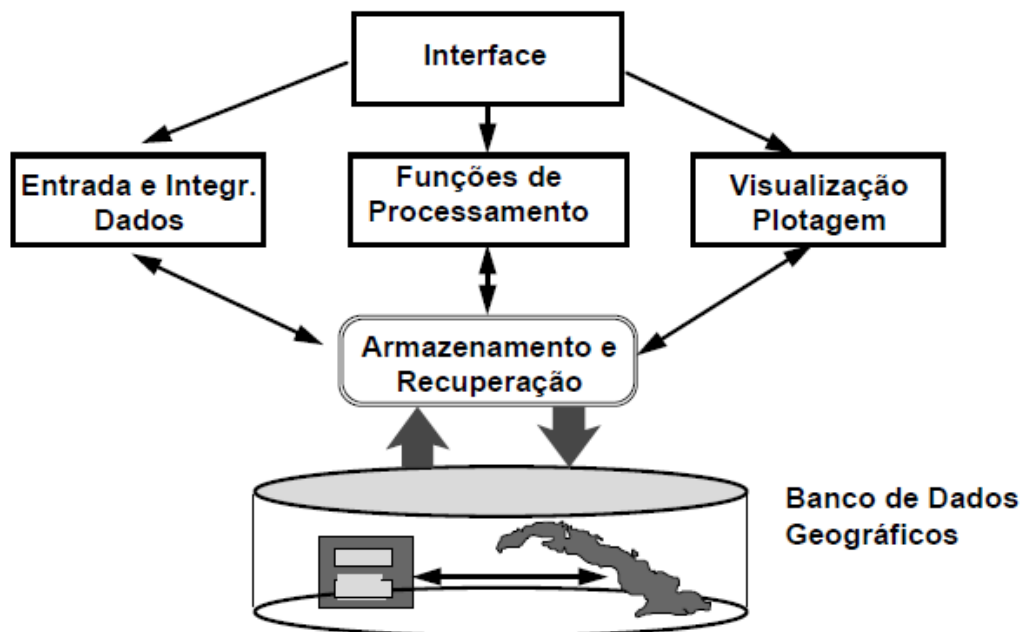


Figura 3-2 – Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica

Fonte: Câmara, 1996.

Os dados geográficos podem ser representados por dois formatos, modelo vetorial e modelo matricial. Ambos os modelos permitem a associação de elementos gráficos às informações alfanuméricas num dado sistema de referência de coordenadas (Câmara et al., 2005).

No modelo vetorial os dados são representadas por três entidades, pontos, linhas ou polígonos. Cada entidade pode ter associada uma grande quantidade de informação alfanumérica (Congalton, 1992).

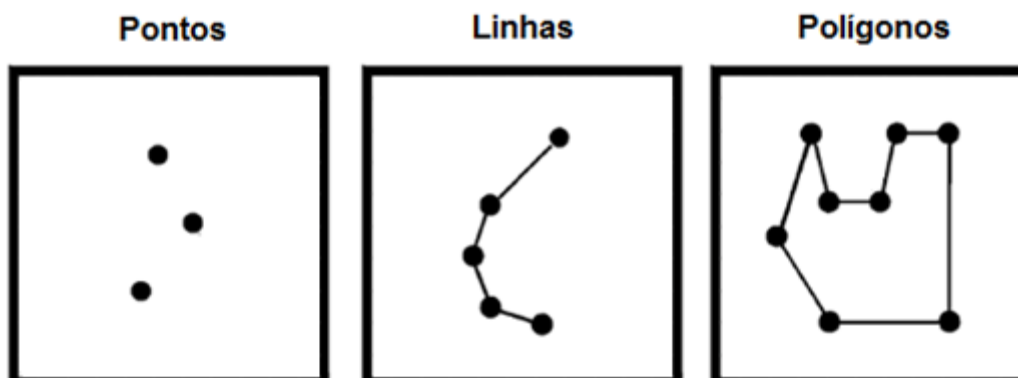


Figura 3-3 – Representação das Três Entidades do Modelo Vetorial

Fonte: Congalton, 1992.

No modelo matricial os dados são armazenados em uma grade de células. O tamanho das células é variável e determina a resolução espacial do dado. Apenas uma única informação é guardada em cada célula (Congalton, 1992).

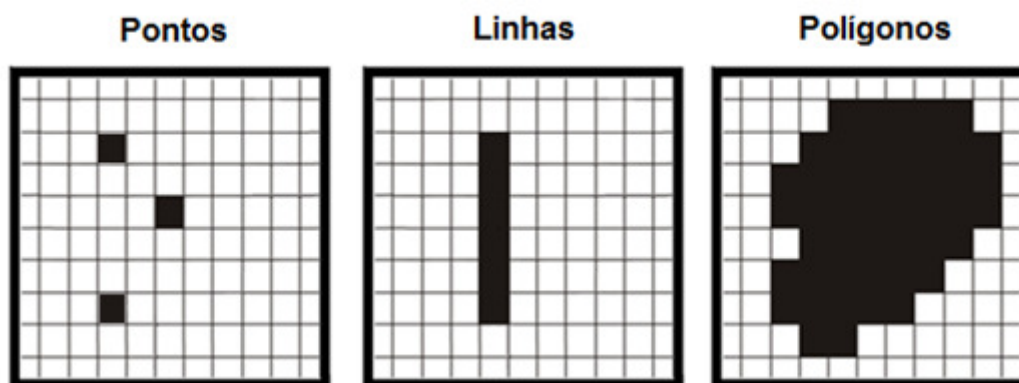


Figura 3-4 – Representação das Três Entidades do Modelo Matricial

Fonte: Adaptado de Congalton, 1992.

A eficiência nas funções de geoprocessamento depende da escolha do modelo a ser usado, que por sua vez se dá em função do produto desejado. Apesar dos modelos terem representações diferentes, não são segregados, mas complementares, passíveis de conversão (Câmara et al., 2005).

3.5 Sensoriamento Remoto

O termo sensoriamento remoto se refere a um conjunto de processos que permite a obtenção de informações de objetos que compõem a superfície terrestre sem haver contato direto entre os mesmos (Moraes, 2002). A obtenção dessas informações é realizada por sensores a bordo de satélites, sendo computacionalmente interpretadas, resultando em imagens digitais.

Atualmente temos ao redor da Terra vários satélites de sensoriamento remoto em órbita, cada qual com seu tipo de sensor. Segundo Rudorff (2006), os sensores se comparam aos nossos olhos. Se olharmos para uma floresta que está distante, enxergamos apenas uma mancha de árvores. À medida que nos aproximamos, começamos a identificar árvores isoladas e se nos aproximarmos ainda mais, podemos até ver os diferentes tipos de folhas.

Rudorff (2006) relembra ainda que antes do advento dos satélites de sensoriamento remoto na década de 70, era muito comum o uso de fotografias aéreas, tiradas a partir de câmeras aerofotográficas acopladas a aeronaves. Apesar de fotografias aéreas serem utilizadas até hoje em algumas aplicações, o avanço tecnológico faz com que percam espaço para as imagens digitais. O processamento digital das imagens de satélite é muito mais rápido e tem como vantagem interpretar informações que são impossíveis de ser percebidas pelo olho humano, visto que foram obtidas em diversas regiões do espectro eletromagnético.

O espectro eletromagnético está dividido em regiões ou bandas, sendo limitadas por comprimentos de onda (Rudorff, 2008). A região da luz visível situa-se na faixa de 0,4 a 0,7 μm , que por sua vez pode ser dividida em outras faixas que representam as cores. Observa-se na Figura 3-5 que seguindo as regiões do espectro no sentido para a direita, temos maiores comprimentos de onda, e conseqüentemente, menores frequências.

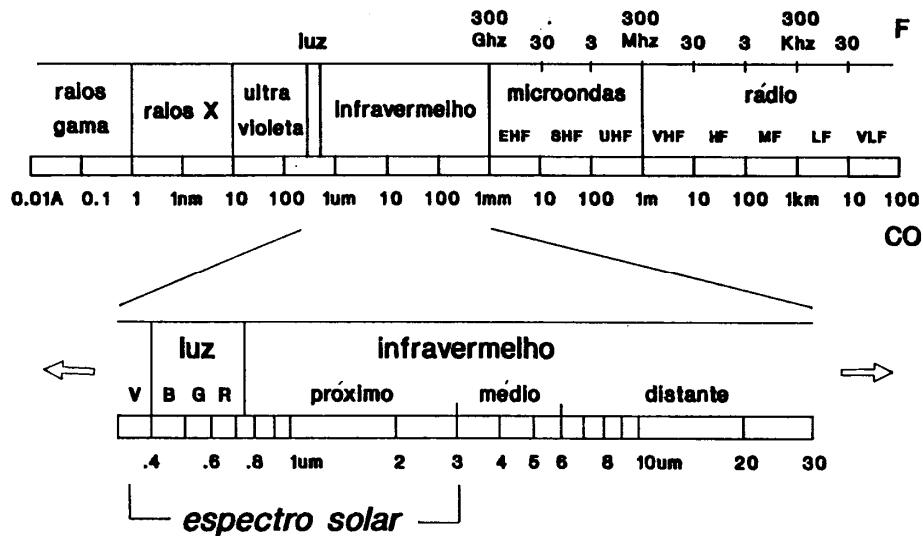


Figura 3-5 – O Espectro Eletromagnético e suas Principais Regiões

Fonte: Divisão de Geração de Imagens, INPE.

Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/cursos/sere/sr_aula2_arquivos/frame.htm

Rudorff (2006) apresenta o Sol como a principal fonte natural de radiação eletromagnética utilizada no sensoriamento remoto. A radiação solar se propaga para a Terra e ao incidir na superfície terrestre pode ser absorvida, transmitida ou refletida. A parte da radiação refletida pela Terra retorna para o espaço, onde pode ser detectada por um sensor remoto a bordo de um satélite.

Os sensores remotos são definidos por Moraes (2002) como dispositivos detectores de energia eletromagnética, sendo capazes de transformá-la em informações que descrevem feições dos objetos na superfície terrestre. Moraes (2002) acrescenta que as características que implicam na qualidade dos sensores estão relacionadas com a resolução espacial, espectral, temporal e radiométrica.

A resolução espacial representa a capacidade do sensor de distinguir objetos, ou seja, quanto maior a resolução, melhor se consegue diferenciar objetos próximos; A resolução espectral refere-se à quantidade e largura das bandas em que opera o sensor. Portanto, quanto maior for o número de medidas em um determinado intervalo de comprimento de onda, melhor será a resolução espectral da coleta; A resolução temporal indica o intervalo de tempo que o satélite leva para voltar a recobrir a área de interesse; e a resolução radiométrica define a eficiência do sistema em detectar e registrar pequenas diferenças na

energia refletida e/ou emitida pelos objetos da superfície terrestre (Moraes, 2002).

Como existem diversos tipos de sensores e no presente estudo foram utilizadas imagens obtidas pelo sistema sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat-5, optou-se nesta revisão por dar enfoque apenas a este sistema. A caracterização do sistema sensor TM é apresentada a seguir.

O sensor TM passou a fazer parte da série dos satélites Landsat a partir de 1984. Este sensor veio agregar melhorias em relação às resoluções espacial, espectral, temporal e radiométrica. O sensor TM opera em sete bandas do espectro eletromagnético. Três bandas na região do visível, três bandas na região do infravermelho refletido e uma banda na região termal (Moreira, 2001).

Tabela 3-2 – Características Espectrais e Espaciais do Sensor TM do Satélite Landsat-5

Banda	Faixa Espectral (μm)	Região do Espectro	Resolução Espacial (m x m)
1	0,45 – 0,52	Azul	30
2	0,52 – 0,60	Verde	30
3	0,63 – 0,69	Vermelho	30
4	0,76 – 0,90	IV Próximo	30
5	1,55 – 1,75	IV Médio	30
6	10,4 – 12,5	IV Termal	120
7	2,08 – 2,35	IV Distante	30

Fonte: Divisão de Geração de Imagens, INPE.

Disponível em: http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/ATUS_LandSat.php

Cada banda do sensor TM, apresentadas na tabela anterior, realça melhor determinados objetos imageados. Para cada uma das bandas do sensor TM são apresentadas a seguir as principais características e aplicações recomendadas pela Divisão de Geração de Imagens – DGI, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Tabela 3-3 – Principais características e aplicações das bandas do sensor TM do satélite Landsat-5

Banda	Intervalo espectral (μm)	Principais características e aplicações das bandas do sensor TM do satélite Landsat-5
1	0,45 a 0,52	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	0,52 a 0,60	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	0,63 a 0,69	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	0,76 a 0,90	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> . Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	1,55 a 1,75	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	10,4 a 12,5	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	2,08 a 2,35	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Fonte: Divisão de Geração de Imagens, INPE.

Disponível em: http://www.dgi.inpe.br/Suporte/files/Cameras-LANDSAT57_PT.php

4. Material e Métodos

4.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica de Estudo

4.1.1 Caracterização Fisiográfica

A bacia hidrográfica do rio Cachoeira se localiza na vertente sul do Maciço da Tijuca, município do Rio de Janeiro, entre os paralelos 22° 56' e 23° 00' de latitude sul e os meridianos 43° 15' e 43° 19' de longitude oeste.

A bacia tem forma triangular, abrangendo uma área de 21,7 km² e seu perímetro atinge aproximados 22,2 km. Aspectos gerais sobre geologia, pedologia e cobertura vegetal foram caracterizados por Coelho Netto (1979):

“A topografia é marcada por um relevo montanhoso onde sobressaem os pontões rochosos. Entre eles, destaca-se o pico da Tijuca (1.022 m), ponto central do Maciço da Tijuca, além do Pico do Papagaio (983 m), Pedra do Conde (821 m), Pedra do Elefante (863 m) e Pedra do Archer (800 m). [...]. O substrato rochoso, de idade pré-cambriana, é constituído predominantemente por gnaisses diversos e algumas intrusões de granitos. Em termos pedológicos, sobressai a ocorrência de grandes extensões de latossolos. [...]. A cobertura vegetal é formada por Mata Latifoliada Perene, onde se destaca a grande diversidade de espécies. Existem 3 estratos principais na mata (arbóreo, arbustivo e herbáceo), além da grande quantidade de epífitas, lianas (cipós) e escandentes (trepadeiras). As espécies encontram-se em estágio de recomposição florestal em função de diferentes usos submetidos ao solo até o fim do século XIX (1860).”

A Figura 4-1 a seguir ilustra a localização geográfica da bacia do rio Cachoeira na cidade do Rio de Janeiro.

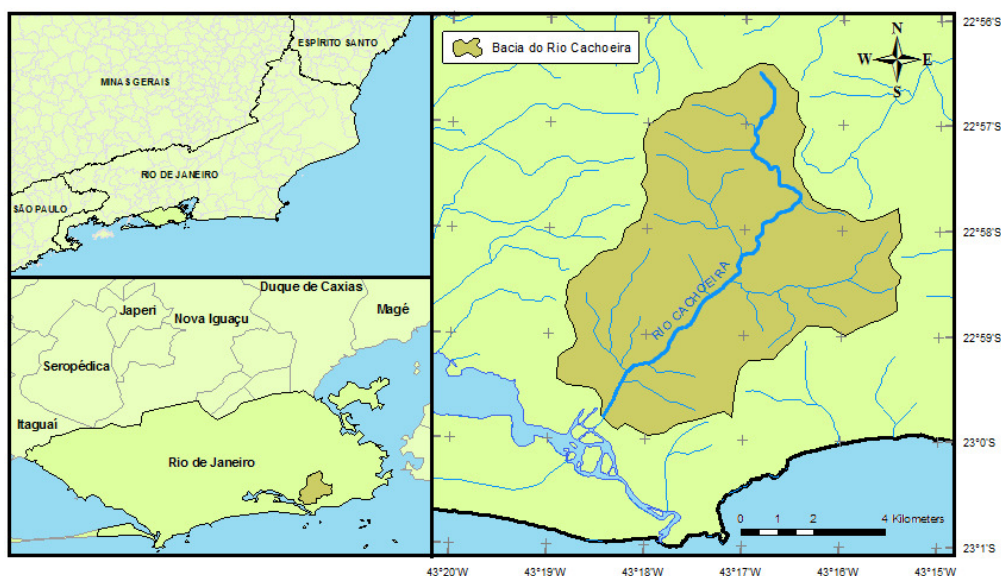


Figura 4-1 – Mapa de Localização da Bacia do Rio Cachoeira

Fonte: Elaboração própria.

O rio Cachoeira possui um percurso de aproximados 8,9 km de extensão, desaguando na Lagoa da Tijuca, em frente à Ilha da Gigóia. Como principais afluentes destacam-se pela margem direita o rio Solidão e pela margem esquerda o rio da Gávea Pequena.

A Figura 4-2 apresenta o perfil longitudinal do rio Cachoeira, indicando os locais onde ele recebe seus afluentes.

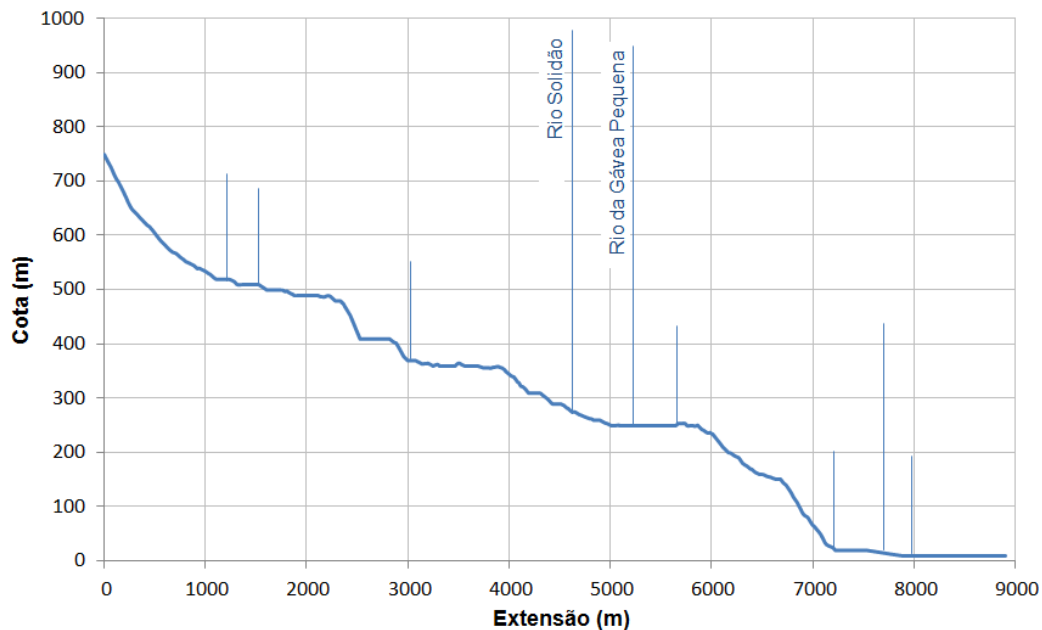


Figura 4-2 – Perfil Longitudinal do Rio Cachoeira

Fonte: Elaboração própria.

A partir das dimensões características da bacia hidrográfica do rio Cachoeira foram calculados alguns índices fluviomorfológicos. Esses índices constam apresentados na Tabela 4-1 a seguir.

Tabela 4-1 – Índices Fluviomorfológicos da Bacia do Rio Cachoeira

Índices Fluviomorfológicos	Valores Obtidos
Área de Drenagem	21,7 km ²
Perímetro	22,2 km
Comprimento	8,9 km
Desnível Médio	740 m
Índice de Compacidade	1,33
Índice de Conformação	0,27
Densidade de Drenagem	1,5 m/m ²
Declividade Média	8,3 %

4.1.2 Caracterização Climatológica

O clima predominante na região da bacia do rio Cachoeira, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, é Tropical, quente (média maior que 18°C em todos os meses) e superúmido com subseca no inverno. Os principais parâmetros climatológicos, que interferem na caracterização do clima na região, são apresentados na sequência, tomando por base os valores registrados na estação climatológica da cidade do Rio de Janeiro, extraídos da publicação Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992).

As temperaturas médias anuais da região oscilam entre 26,5°C e 21,3°C. Os meses mais frios são junho e julho, quando a temperatura média destes atinge 21,4°C e, os meses mais quentes são janeiro e fevereiro, época de maior insolação na região quando a temperatura média destes atinge os 26,4°C. A umidade relativa média mensal é de 79%, variando entre o mínimo de 77% e o máximo de 80%. A evaporação total anual é de 1198,5 mm, variando entre o mínimo de 84,2 mm em junho e o máximo de 111,8 mm em janeiro.

As médias climatológicas mensais para a região são apresentadas resumidamente na Tabela 4-2. As Figuras 4-3 e 4-4 ilustram graficamente esses valores.

Tabela 4-2 – Características Climatológicas da Região – Temperaturas, Evaporação e Umidade (1961 a 1990)

Mês	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Evaporação Total (mm)	Umidade Relativa (%)
Jan	26,2	23,3	29,4	111,8	79
Fev	26,5	23,5	30,2	103,0	79
Mar	26,0	23,3	29,4	104,8	80
Abr	24,5	21,9	27,8	92,2	80
Mai	23,0	20,4	26,4	90,6	80
Jun	21,5	18,7	25,2	84,2	79
Jul	21,3	18,4	25,3	103,2	77
Ago	21,8	18,9	25,6	102,6	77
Set	21,8	19,2	25,0	97,4	79
Out	22,8	20,2	26,0	98,2	80
Nov	24,2	21,4	27,4	104,0	79
Dez	25,2	22,4	28,6	106,5	80
Anual	23,7	21,0	27,2	1198,5	79

Fonte: Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992)

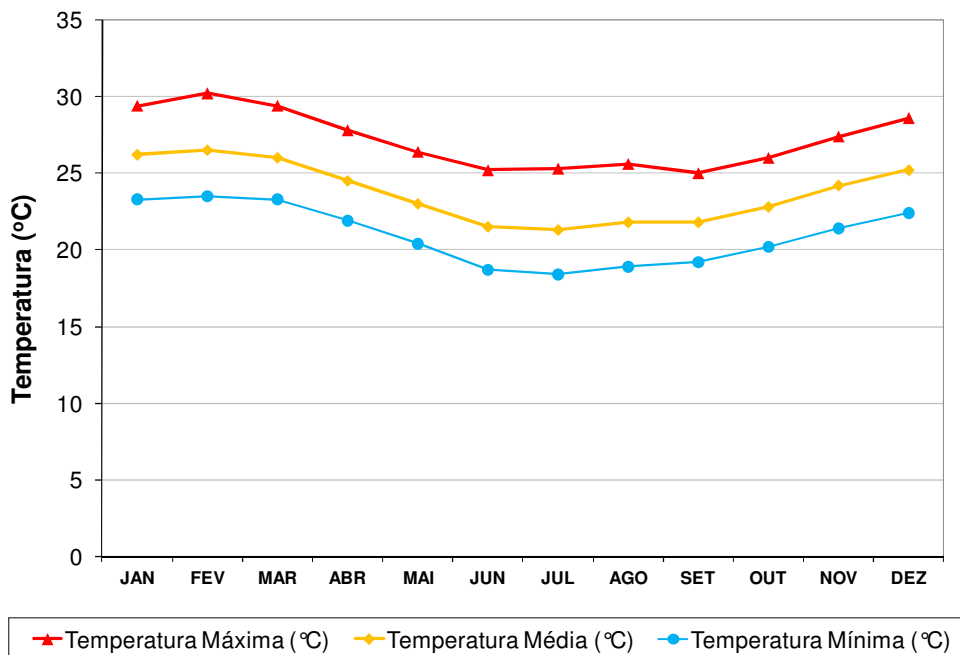


Figura 4-3 – Características Climatológicas da Região – Temperaturas (1961 a 1990)

Fonte: Elaborado a partir das Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992)

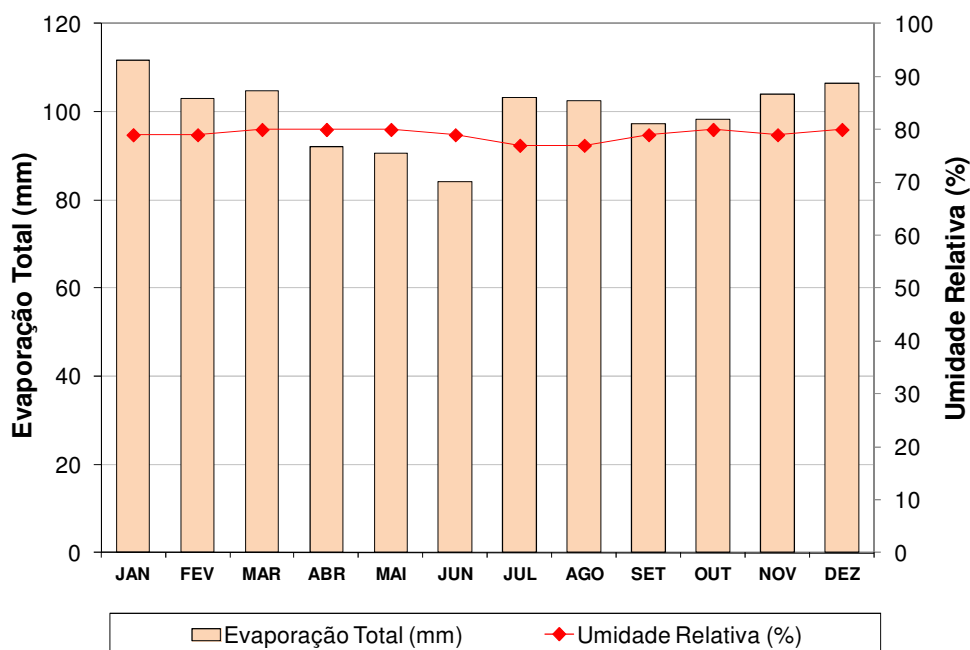


Figura 4-4 – Características Climatológicas da Região – Evaporação e Umidade (1961 a 1990)

Fonte: Elaborado a partir das Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992)

Para determinação das características pluviométricas da bacia do rio Cachoeira, foi considerada como referência a estação pluviométrica Capela Mayrink (código: 2243239), a qual se encontra instalada dentro da bacia hidrográfica do rio Cachoeira. Sua série histórica de totais diários de precipitação disponível se encontra compreendida entre os anos de 1976 e 2010. Essa estação apresenta 2230 mm de precipitação total anual, com médias mensais variando entre 137 mm, em junho, e 239 mm, em abril. A altura máxima de chuva registrada em 24 horas foi de 380 mm, ocorrida em 07/04/2010, e o número médio de dias chuvosos no ano foi de 146 dias.

As principais características pluviométricas mensais para a bacia do rio Cachoeira são apresentadas resumidamente na Tabela 4-3. A Figura 4-5 ilustra graficamente esses valores.

Tabela 4-3 – Características Pluviométricas da Bacia do Rio Cachoeira (1976 a 2010)

Mês	Precipitação Total (mm)	Altura Máxima em 24 horas (mm)	Número de Dias Chuvosos
Jan	208	165	14
Fev	175	198	11
Mar	208	176	13
Abr	239	380	12
Mai	173	178	11
Jun	137	159	9
Jul	151	149	9
Ago	144	123	10
Set	184	115	13
Out	178	179	14
Nov	199	155	15
Dez	226	172	15
Anual	2230	380	146

Fonte: Elaborado a partir dos dados da estação pluviométrica de referência Capela Mayrink (código: 2243239)

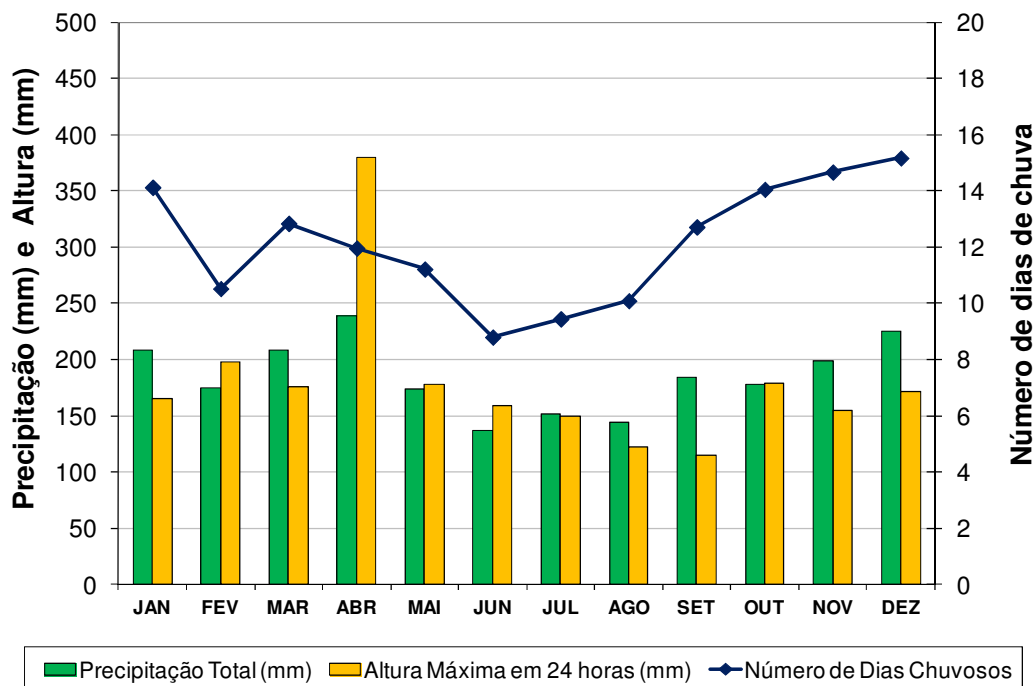


Figura 4-5 – Características Pluviométricas da Bacia do Rio Cachoeira (1976 a 2010)

Fonte: Elaborado a partir dos dados da estação pluviométrica Capela Mayrink

4.2 Seleção da Base de Dados

4.2.1 Seleção de Dados Geográficos

Para elaboração do Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a bacia do rio Cachoeira, optou-se pelo software ArcGIS na sua versão 9.3, utilizando a combinação dos modelos vetorial e matricial. O ArcGIS é uma solução de SIG desenvolvido pela Environmental Systems Research Institute (ESRI) em Redlands, Califórnia - EUA.

O principal formato de arquivo de modelo vetorial utilizado no presente estudo foi o *Shapefile*. Este formato armazena informações de acordo com a geometria das entidades, ponto, linha ou polígono (ESRI, 1998). Já para o modelo matricial foram utilizados arquivos do tipo *GeoTIFF*, que inclui no próprio arquivo informações de georreferenciamento e geocodificação de imagens (CPRM, 2002).

A abordagem inicial no SIG visou a identificação e reconhecimento da região em estudo, sendo construído basicamente a partir dos dados geográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e do Instituto Municipal

de Urbanismo Pereira Passos – IPP-Rio, que mantém parceria com o Laboratório de Geoprocessamento (LabGis) da PUC-Rio.

O plano de informação com a localização geográfica das estações hidrometeorológicas do Rio de Janeiro foi produzido a partir das coordenadas das estações, de acordo com o inventário de estações da Agência Nacional de Águas - ANA.

O Modelo Digital do Terreno (MDT) do Estado Rio de Janeiro foi obtido a partir dos dados do radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) disponibilizado na rede mundial de computadores pelo Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A equipe técnica desse laboratório processou e organizou os dados do radar SRTM por estados brasileiros, de modo que as falhas existentes nos dados originais fossem corrigidas.

Os dados geográficos selecionados para construção do SIG estão descritos na tabela 4-4, a seguir.

Tabela 4-4 – Dados Geográficos Selecionados

Dados Geográficos	Tipo do Modelo	Fonte
Unidades Federativas do Brasil	Vetorial	IBGE
Municípios do Brasil	Vetorial	IBGE
Subacias Hidrográficas do Rio de Janeiro	Vetorial	IPP
Hidrografia do Rio de Janeiro	Vetorial	IPP
Estações Hidrometeorológicas	Vetorial	Produzido
Modelo Digital do Terreno	Matricial	SRTM

4.2.2 Seleção de Dados Hidrometeorológicos

O Brasil dispõe de uma rede hidrometeorológica com aproximadamente 11.000 estações hidrometeorológicas (fluviométricas, pluviométricas e climatológicas), sendo operadas por diversas entidades como órgãos federais, setoriais, estaduais e particulares. Desse total, cerca de 4.200 estações representam a rede básica nacional em operação (CPRM, 2012). No Rio de Janeiro as estações, em sua maioria, são administradas por órgãos públicos.

Para avaliar o comportamento hidrológico da bacia do rio Cachoeira foram selecionadas nove estações hidrometeorológicas como representativas da região. A Tabela 4-5, 4-6 e 4-7 apresentam essas estações, fornecendo para cada uma seu código, a localização e o órgão responsável.

Tabela 4-5 – Estações Fluviométricas Selecionadas

Nome	Código	Latitude	Longitude	Responsável
Capela Mayrink	59305071	-22°57'28"	-43°16'40"	INEA
Itanhangá	59305072	-22°59'12"	-43°18'05"	INEA

Tabela 4-6 – Estações Pluviométricas Selecionadas

Nome	Código	Latitude	Longitude	Responsável
Alto da Boa Vista	2243149	-22°57'57"	-43°16'42"	INMET
Benfica	2243092	-22°53'17"	-43°14'56"	INEA
Capela Mayrink	2243239	-22°57'28"	-43°16'40"	INEA
Eletrobrás	2243083	-22°55'18"	-43°25'12"	INEA
Rio Centro	-	-22°57'25"	-43°24'42"	GEORIO
Via 11	2343007	-23°00'00"	-43°21'59"	INEA

Tabela 4-7 – Estação Climatológica Selecionada

Nome	Código	Latitude	Longitude	Responsável
Rio de Janeiro	83743	-22°52'48"	-43°10'51"	INMET

Ambas as estações fluviométricas selecionadas se situam dentro da bacia hidrográfica do rio Cachoeira, dispondo de registros de leituras de níveis d'água e de medições de vazões. Esses registros foram solicitados junto ao Instituto Estadual de Ambiente – INEA, órgão responsável pela administração dessas estações.

Dentre as estações pluviométricas selecionadas destacam-se, tanto pela localização quanto pela disponibilidade de dados, as estações Capela Mayrink e Alto da Boa Vista. A primeira é a única estação localizada dentro da bacia hidrográfica do rio Cachoeira, e a segunda, além de pluviométrica é também

meteorológica, com dados disponíveis de temperatura média do ar. Os dados pluviométricos foram obtidos através de consulta ao sistema de informações hidrológicas da ANA, o Hidroweb. Além dessa fonte de informação foi consultado o Sistema Alerta Rio, operado pelo Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro – GEORIO, que disponibiliza dados pluviométricos e meteorológicos.

Em complementação aos dados de temperatura média do ar registrados na estação Alto da Boa Vista, foram utilizados como referência os dados da estação climatológica Rio de Janeiro, localizada no bairro Saúde. Seus dados históricos foram obtidos através do sistema de Monitoramento Agrometeorológico – Agritempo.

A Figura 4-6 ilustra a localização das estações hidrometeorológicas selecionadas, enquanto as Tabelas 4-8, 4-9 e 4-10 apresentam a situação da disponibilidade dos dados fluviométricos, pluviométricos e climatológicos, respectivamente. Através da situação da disponibilidade de dados constata-se uma carência geral de dados na bacia estudada.

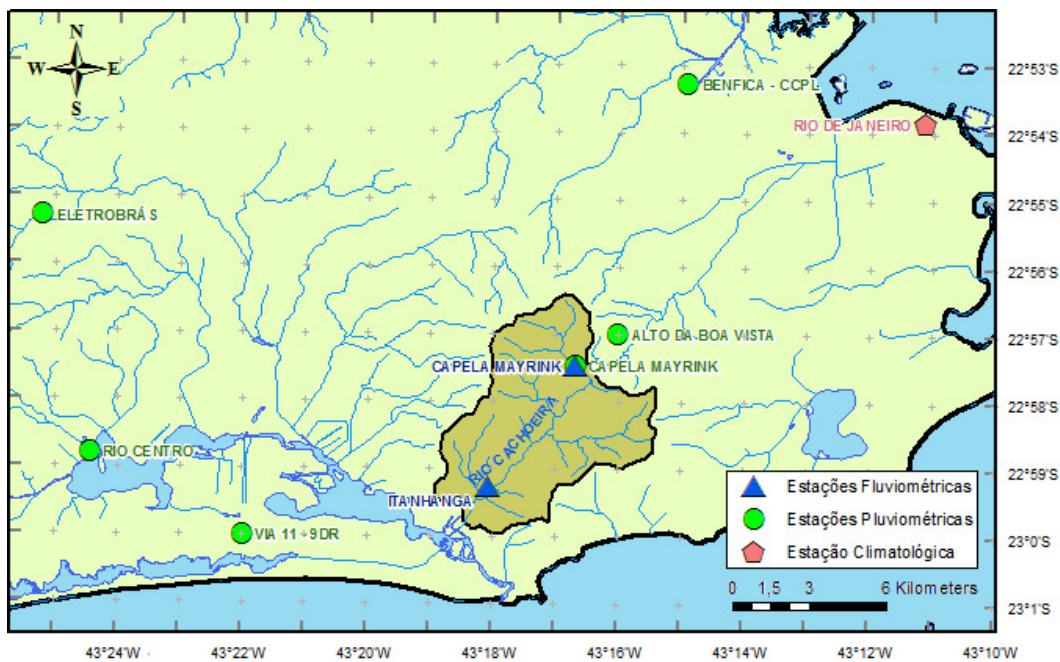


Figura 4-6 – Localização das Estações Hidrometeorológicas

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4-8 – Disponibilidade de Dados Fluviométricos

Legenda:

- período de observação conforme Inventário de Estações
x período completo de dados de leitura de régua
x período incompleto de dados de leitura de régua
o período com medições de descarga
 Período com curva-chave válida

Nome	Código	Tipo de Dado	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Capela Mayrink	59305071	Leitura de Régua										x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Medição de Desc.																						
Itanhangá	59305072	Leitura de Régua		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
		Medição de Desc.																						

Nome	Código	Tipo de Dado	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Capela Mayrink	59305071	Leitura de Régua	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Medição de Desc.																						
Itanhangá	59305072	Leitura de Régua																						
		Medição de Desc.																						

Tabela 4-9 – Disponibilidade de Dados Pluviométricos

Legenda:

- período de observação conforme Inventário de Estações
x período completo de dados de precipitação
x período incompleto de dados de precipitação

Nome	Código	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Capela Mayrink	2243239									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Alto da Boa Vista	2243149								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Benfica	2243092					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Via 11	2343007					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Eletronbras	2243083					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rio Centro	-																						

Nome	Código	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Capela Mayrink	2243239	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Alto da Boa Vista	2243149	x	x	x	x	x	x	x	x	x													
Benfica	2243092	x	x	x	x	x																	
Via 11	2343007	x	x	x	x	x																	
Eletronbras	2243083	x	x	x	x	x																	
Rio Centro	-								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4-10 – Disponibilidade de Dados Climatológicos

Legenda:

- período de observação conforme Inventário de Estações
x período completo de dados de temperatura média do ar
x período incompleto de dados de temperatura média do ar

Nome	Código	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Alto da Boa Vista	2243149			x		x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rio de Janeiro	83743														x	x	x	x	x	x	x	x	x

4.2.3 Seleção de Dados de Satélite

Os dados de satélite também foram obtidos em formato *GeoTIFF*, através do catálogo de imagens da Divisão de Geração de Imagens – DGI do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Foram escolhidas dez imagens no catálogo do satélite Landsat-5, sendo todas do sensor TM e dotadas das sete bandas (Tabela 3-2). As imagens que abrangem a região da bacia do rio Cachoeira pertencem ao conjunto órbita/ponto 217/76. A seleção das imagens foi baseada em um histórico de 22 anos com espaçamento temporal médio a cada 2 anos. De acordo com a disponibilidade no catálogo e a análise visual de cada imagem, foram selecionadas as imagens que apresentaram maior nitidez e pouca cobertura de nuvens.

As imagens selecionadas foram as datadas de 22/03/1988, 24/02/1990, 14/02/1992, 18/01/1994, 24/01/1996, 02/11/2000, 31/12/2004, 31/08/2006, 23/10/2008 e 15/02/2010. Mesmo que o período comum dos dados hidrológicos possua uma extensão menor do que o histórico das imagens de satélite, optou-se em manter essa seleção buscando-se uma melhor compreensão da dinâmica da cobertura vegetal da bacia.

Das bandas óticas disponíveis nas imagens, foram selecionadas para formar a composição colorida as bandas 5, 4, 3, em R, G, B (do inglês: Red, Green, Blue) respectivamente. Conforme caracterizado na Tabela 3-3, a cor verde (G), associada às características da banda 4, representa a maior reflectância da vegetação, pois reflete muita energia nesta banda. O segundo maior índice de energia refletida, a banda 5, foi associada ao vermelho (R), assim o solo é indicado na composição em cores vermelhas. A cor azul (B) foi associada à banda 3, que permite bom contraste entre áreas ocupadas por vegetação e aquelas sem vegetação (solo exposto, estradas e áreas urbanas). A mistura dessas últimas duas cores resulta na cor roxa. Com isso, dependendo da cobertura do solo (exposto ou áreas urbana), na imagem aparecem tons de roxos mais fortes ou mais fracos.

4.3 Tratamento da Base de Dados

4.3.1 Tratamento dos Dados Geográficos

O Sistema de Informações Geográficas elaborado para a bacia do rio Cachoeira foi desenvolvido no sentido da obtenção de planos de informação para a determinação das áreas de drenagem dos pontos de interesse e no sentido da integração de imagens digitais do satélite Landsat-5/TM.

Para a realização do geoprocessamento no Modelo Digital do Terreno da bacia utilizou-se o ferramental disponível na extensão *Spatial Analyst Tool* do ArcGIS 9.3 (ESRI). Dentre as funções presentes nessa extensão destaca-se o conjunto *Hydrology*, com funções específicas para caracterizar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Conforme citado anteriormente, o Modelo Digital do Terreno utilizado no estudo foi obtido a partir dos dados do radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). De acordo com Lemos et al. (2004) apesar dessa missão topográfica ter sido executada na resolução espacial de 30 metros, a disponibilização global dos dados da América do Sul consta na resolução espacial de 90 m.

Baseado nesse fato, o pré-processamento do Modelo Digital consistiu primeiramente na reamostragem de seus dados para a resolução espacial de 30 metros. Cabe ressaltar que a interpolação aqui realizada não regenerou os dados registrados com a resolução original da missão SRTM, mas apenas suavizou o modelo.

Em seguida, buscou-se garantir que o Modelo Digital do Terreno estivesse hidrológicamente consistente, ou seja, livre de depressões. Uma depressão no modelo matricial é representada por uma célula que possui valor de altitude menor do que suas vizinhas, o que impossibilita a saída do escoamento ao passar nessa célula (Tarboton, 1997).

Com o Modelo Digital do Terreno em resolução compatível e hidrológicamente consistente, foram realizados processamentos que se fazem necessários até a obtenção da rede de drenagem.

Estes processamentos envolveram a geração de planos de informação que permitiram caracterizar o escoamento superficial quanto à direção dos fluxos e ao fluxo acumulado na bacia hidrográfica. Através desses planos foi possível

se obter a rede de drenagem, o que deu origem ao mapa da bacia hidrográfica e a delimitação de forma automática das áreas de drenagem nos pontos de interesse (seções das estações fluviométricas e seção exutória). A Figura 4-7 ilustra a sequência dos planos de informação gerados para uma região definida no entorno da bacia hidrográfica do rio Cachoeira.

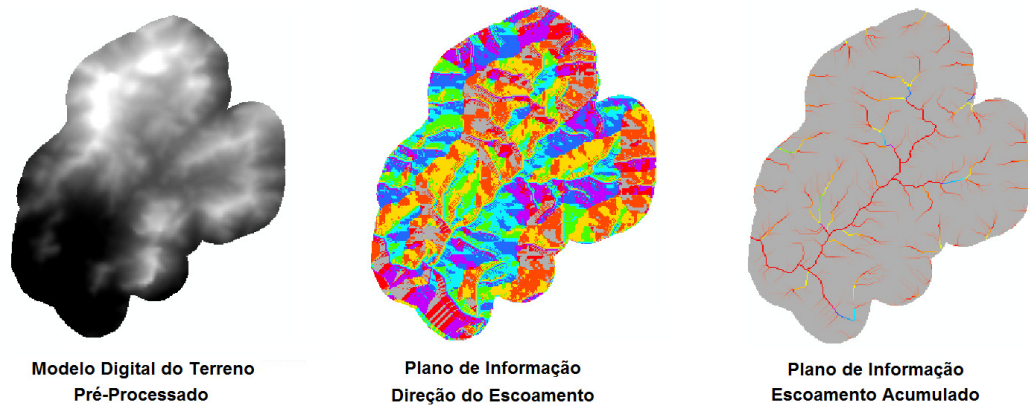


Figura 4-7 – Sequência de criação dos planos de informação

A localização do ponto exutório da bacia foi feita com auxílio do plano de informação de escoamento acumulado, que apresenta as linhas de fluxos preferenciais na bacia hidrográfica. Além da delimitação automática das áreas de drenagem, o plano de escoamento acumulado também proporcionou a aferição da rede de drenagem informada pelo IPP-Rio no plano “Hidrografia do Rio de Janeiro”, a qual para um pequeno trecho da bacia do rio Cachoeira encontrava-se incompleta.

A delimitação das áreas de drenagem associadas às estações fluviométricas foi realizada com o intuito de aferir as áreas informadas no inventário de estações da ANA. Foram utilizadas no estudo as áreas de drenagem calculadas por geoprocessamento, considerando-se que os erros relativos são minimizados ao se utilizar uma mesma base geográfica.

A Figura 4-8 apresenta a delimitação das áreas de drenagem nos locais de interesse sobre o plano de informação de escoamento acumulado, enquanto a Tabela 4-11 apresenta os valores dessas áreas calculadas.

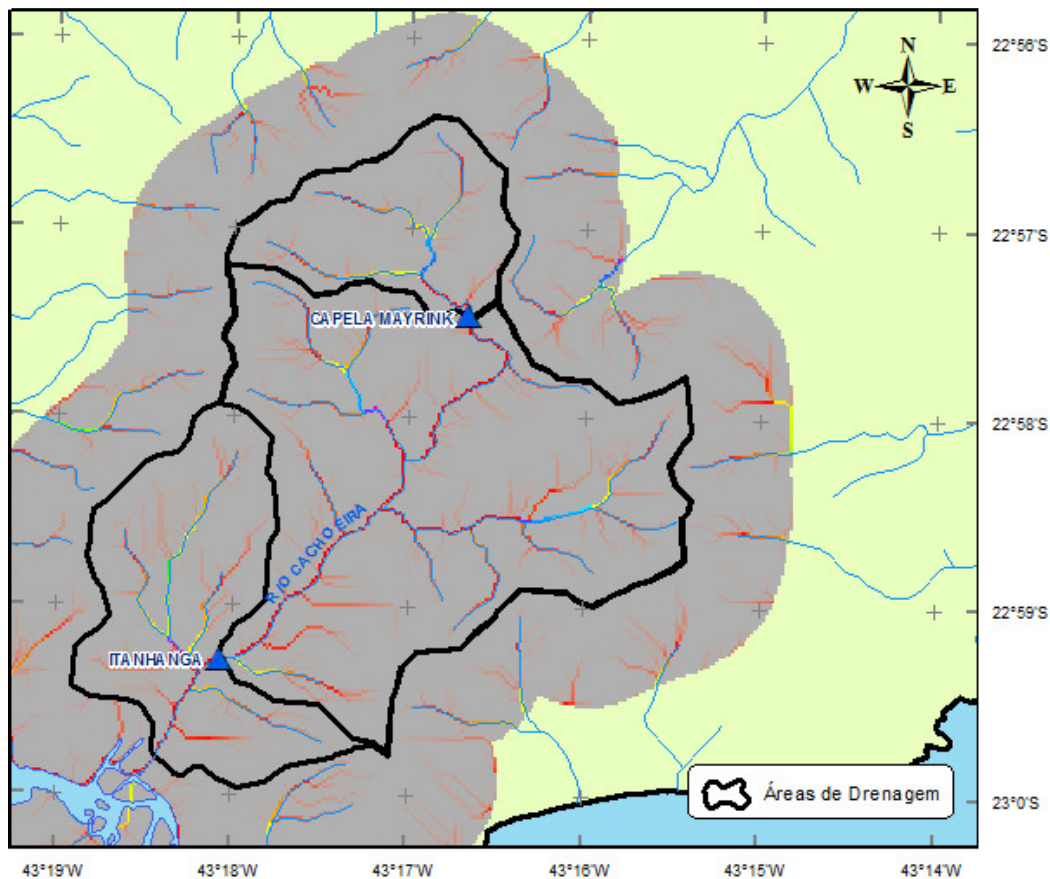


Figura 4-8 – Delimitação das Áreas de Drenagem dos Locais de Interesse

Tabela 4-11 – Áreas de Drenagem Calculadas nos Locais de Interesse

Local	Área de Drenagem Inventário de Estações	Área de Drenagem Presente Estudo
Estação Capela Mayrink	2,2 km ²	3,3 km ²
Estação Itanhangá	16,1 km ²	16,4 km ²
Foz do Rio Cachoeira	-	21,7 km ²

4.3.2 Tratamento dos Dados Hidrometeorológicos

Os dados hidrológicos são coletados nas estações por meio de observações ou medições. Durante o procedimento da coleta, podem surgir erros do tipo sistemáticos, grosseiros ou aleatórios, fazendo com que os dados obtidos neste instante não sejam representativos (Naghetini e Pinto, 2007). Além de erros de coleta, ao longo da operação das estações podem ocorrer períodos com indisponibilidade de dados, seja por problemas com os aparelhos de medição ou ausência do observador responsável.

Em função da relevância dos dados hidrológicos, foram realizadas análises de consistência dos dados pluviométricos, fluviométricos e meteorológicos, de modo que a base de dados utilizada esteja o mais isenta possível de erros e falhas.

Com o intuito de se comprovar as tendências observadas nas séries hidrológicas resultantes foi aplicado o teste de hipótese de Mann-Kendall. A escolha desse teste não-paramétrico foi baseada no fato de que a maioria das séries históricas de dados hidrológicos não segue uma distribuição normal (TREND, 2005).

4.3.2.1 Dados Pluviométricos

Os dados pluviométricos foram tratados com o intuito de se obter uma base de dados consistente para o período disponível de 1976 a 2010, fornecendo informações para garantir a consistência da série pluviométrica da estação Capela Mayrink, utilizada como referência da precipitação média na bacia do rio Cachoeira. Conforme comentado anteriormente, esta série de precipitações será utilizada como referência no cálculo do balanço hídrico pelo método de Thornthwaite e Mather.

A análise preliminar dos dados pluviométricos foi feita de forma visual. A partir da plotagem conjunta das séries de precipitações totais mensais das estações, é possível detectar a ocorrência de erros grosseiros nas observações. Em nenhuma das seis estações analisadas foram identificados valores passíveis de correção.

Após a análise preliminar dos dados, buscou-se preencher as falhas apresentadas. Para realizar o preenchimento foram avaliadas as correlações cruzadas entre os dados de precipitação total mensal das estações pluviométricas selecionadas. Para definir os ajustes das equações de correlação utilizou-se o método de regressão linear com constante igual a zero. A escolha de qual estação seria utilizada para preenchimento de outra foi dada pelo maior coeficiente de determinação obtido pelo ajuste linear.

Após os preenchimentos de falhas, a consistência das séries foi analisada do ponto de vista regional, ou seja, foi verificada a homogeneidade do comportamento da precipitação na região. Para isso, utilizou-se o Método da Dupla-Massa, cuja principal finalidade é identificar se ocorreram desvios no

comportamento da precipitação ao longo do tempo, ou mesmo no local de observação (Collischonn e Tassi, 2011).

Para a análise da dupla-massa foi identificado o período comum de dados entre as estações da região que apresentasse o menor índice de preenchimentos, sendo este de abril/1976 a dezembro/1994. A estação Rio Centro ficou fora desta análise, pois seus dados disponíveis tem início a partir de janeiro/1997.

Em seguida foram elaborados gráficos para cada estação, sendo plotada a série dos totais mensais acumulados contra a série das médias acumuladas das estações no entorno. As cinco curvas duplo-acumulativas apresentaram tendências retas, o que indica que não houve desvio no comportamento dos dados de precipitação em nenhuma das estações, confirmando suas consistências. A Figura 4-9 apresenta a curva duplo-acumulativa obtida para a estação pluviométrica de referência Capela Mayrink. As demais curvas constam apresentadas no Apêndice A.

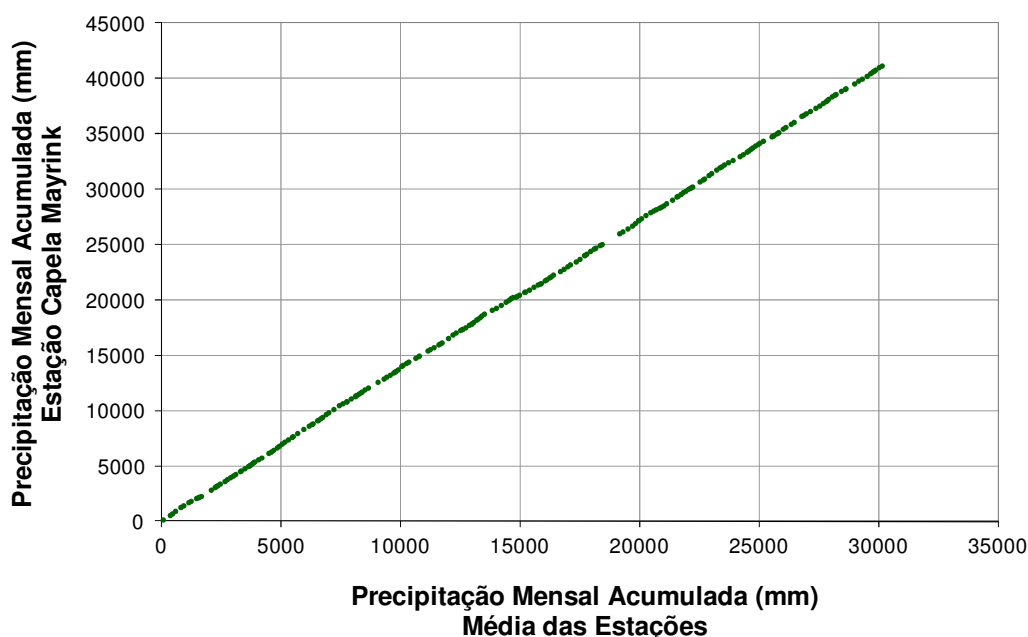


Figura 4-9 – Curva Duplo-acumulativa da Estação Pluviométrica Capela Mayrink

Como resultado da análise de consistência da estação Capela Mayrink, obteve-se para a bacia do rio Cachoeira uma série pluviométrica de totais mensais consistentes e sem falhas. Essa série encontra-se ilustrada na Figura 4-10, onde as barras verdes representam a precipitação total de cada mês. Os valores dessa série mensal constam apresentados no Apêndice B.

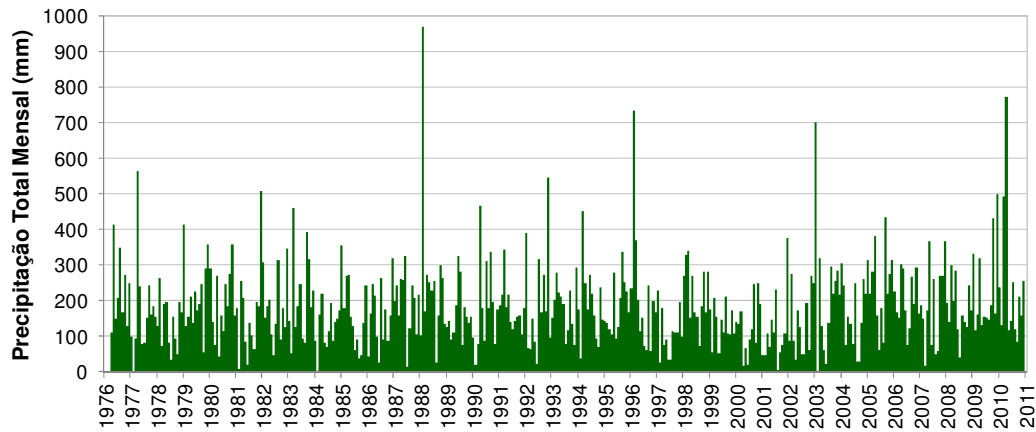


Figura 4-10 – Precipitação Total Mensal na Bacia do Rio Cachoeira

4.3.2.2 Dados Fluviométricos

Os dados fluviométricos foram tratados com o intuito de se obter uma série de dados o mais consistente possível na seção exutória da bacia, para o período de 1976 a 2010, a fim de ser utilizada como referência na caracterização de seu comportamento hidrológico.

A análise inicial de consistência dos dados fluviométricos foi realizada de forma visual a partir da plotagem conjunta das leituras de régua médias diárias das estações Itanhangá e Capela Mayrink. Essas leituras médias resultam das leituras realizadas às 7 e às 17 horas na régua linimétrica das estações.

Ambas as estações se encontram instaladas no rio Cachoeira, porém dispõem de um período comum de dados durante cinco anos, de abril/1976 a abril/1981. A análise deste período comum permitiu identificar semelhanças na forma dos cotogramas. Na Figura 4-11 observar-se as semelhanças existentes nas leituras de régua entre as estações, para o período comum observado entre abril/1976 e abril/1981.

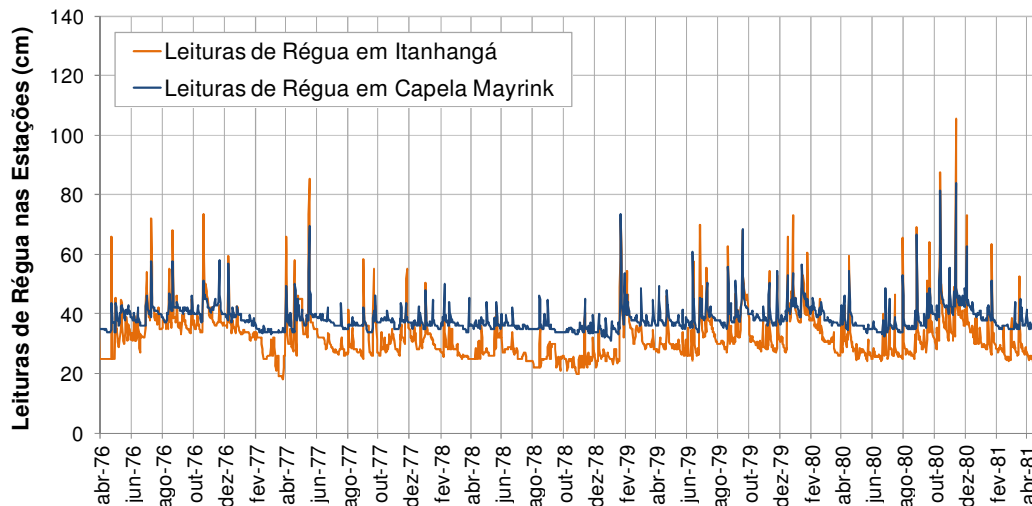


Figura 4-11 – Comparação entre as leituras de régua médias diárias das estações

Não foi realizada nenhuma correção na série de leituras de régua da estação Capela Mayrink, visto que não foram identificados indícios de erros grosseiros de observação. Já na série da estação Itanhangá, julgou-se que dez leituras de régua tiveram suas observações registradas erroneamente. Exemplo desse fato ocorreu no dia 01/03/1980, onde foi registrado um pico na leitura da régua que atingiu 182 cm, o que não é coerente com as leituras observadas nos dias anterior e posterior a esta data (ambas em 31 cm) nem com as leituras na estação Capela Mayrink. Assim, as leituras de régua com fortes indícios de terem sido registradas erroneamente tiveram seus valores consistidos por interpolação.

Em seguida foi analisada a consistência das medições de descarga. Esta foi realizada de forma gráfica, através das plotagens leitura de régua x vazão, leitura de régua x área e leitura de régua x velocidade. A partir desses gráficos foram desprezadas as medições de descarga cujos pontos se apresentaram fora da tendência aferida.

A relação entre a descarga medida e a leitura da régua no local da estação fluviométrica, se dá em função de características geométricas e hidráulicas da seção de escoamento. O ajuste de uma curva que represente esta relação é denominado curva-chave (Jacon e Cudo, 1989).

Baseado nas medições de descarga consistidas para cada estação realizou-se o ajuste das curvas-chave através de equações potenciais do tipo:

$$Q = m \times (LR - h_0)^n$$

Onde Q é a vazão, em m^3/s ; m e n são parâmetros determinados para o local; LR é a leitura de régua correspondente ao nível para a vazão Q ; e h_0 é a leitura de régua correspondente ao nível do zero da régua.

Os critérios utilizados na definição do período de validade de cada curva-chave foram as datas de início e fim de operação das estações.

Para a definição da curva-chave na estação Capela Mayrink utilizou-se todo o período operativo da estação, 01/04/1976 a 31/05/2010. Foram consideradas no ajuste 215 medições de descarga, para intervalos de níveis d'água observados desde 32 cm até 92 cm. Como as leituras de régua para o período de validade abrangem valores entre 26 cm e 144,5 cm, procedeu-se à extrapolação da curva-chave para cobrir estes valores. A figura 4.12 a seguir apresenta a curva-chave estabelecida para a estação Capela Mayrink.

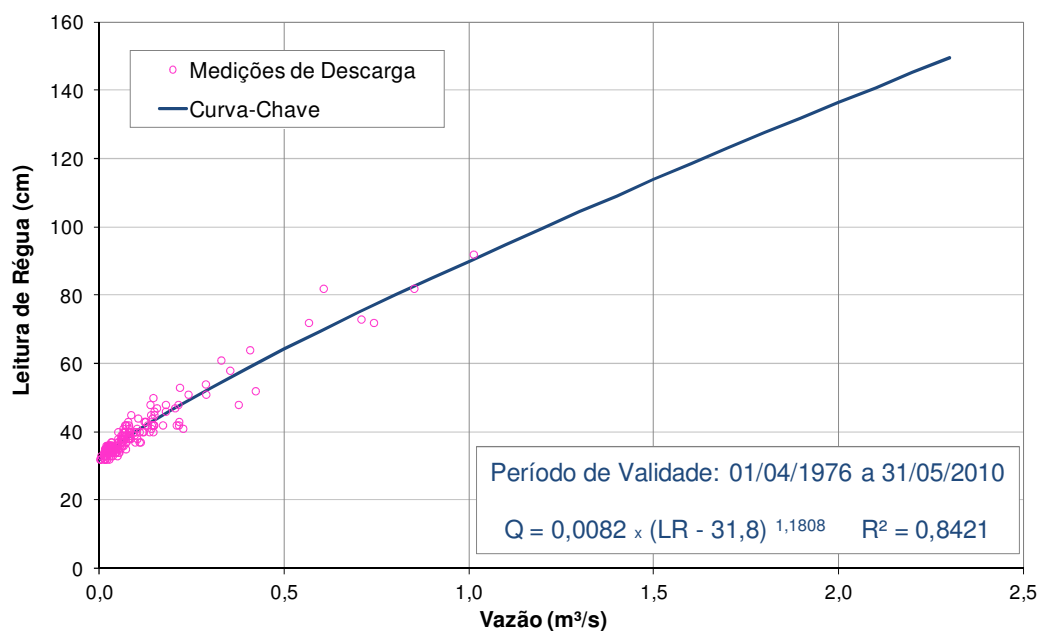


Figura 4-12 – Curva-chave do Rio Cachoeira na Estação Capela Mayrink

Para a definição da curva-chave na estação Itanhangá utilizou-se apenas o período de 01/07/1972 a 30/04/1981. Optou-se em não incluir na análise o período de dados de 06/07/1969 a 30/06/1972, visto que este apresenta uma evidente mudança de tendência na relação leitura de régua x vazão que não seria representativa ao estudo. Foram consideradas no ajuste 506 medições de descarga, para intervalos de níveis d'água observados desde 20 cm até 146 cm. Como as leituras de régua para o período de validade definido abrangem valores entre 12 cm e 182 cm, procedeu-se à extrapolação da curva-chave para cobrir estes valores. A figura 4.13 a seguir apresenta a curva-chave estabelecida para a estação Itanhangá.

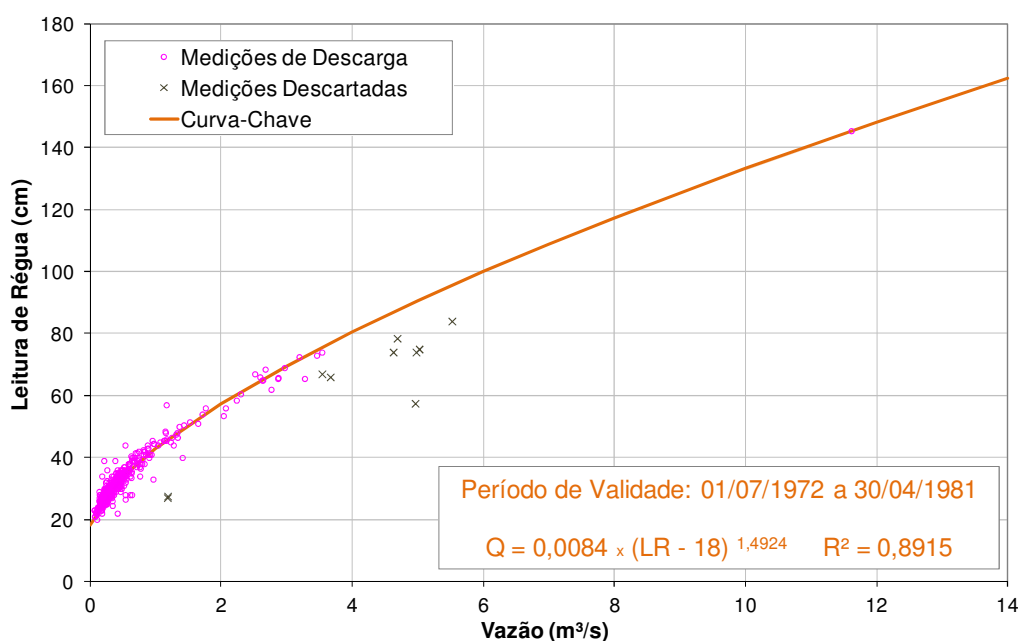


Figura 4-13 – Curva-chave do Rio Cachoeira na Estação Itanhangá

Após as análises de consistência realizadas, os dados de leituras de régua das estações foram transformados em dados de vazões através das curvas-chave apresentadas.

A metodologia para gerar uma série de vazões médias mensais na seção exutória da bacia do rio Cachoeira consistiu primeiramente na extensão da série de vazões da estação Itanhangá, através de correlação mensal com a série de vazões da estação Capela Mayrink. Posteriormente, a série estendida de vazões da estação Itanhangá foi transferida para o local da exutória da bacia por proporcionalidade entre áreas de drenagem. A equação de correlação mensal entre as estações Capela Mayrink e Itanhangá, ajustada para o período de abril/1976 a abril/1981, é mostrada na figura 4-14 a seguir.

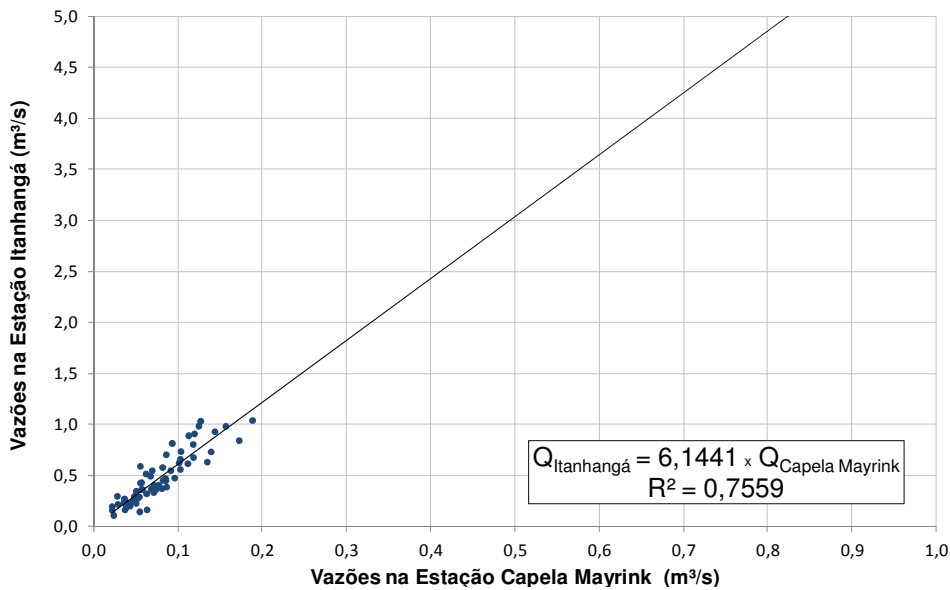


Figura 4-14 – Correlação de Vazões Médias Mensais entre as Estações Capela Mayrink e Itanhangá (abril/1976 a abril/1981)

A transferência das vazões da estação Itanhangá para o local da exutória da bacia, por proporcionalidade entre áreas de drenagem, se deu através da seguinte equação:

$$Q_{\text{Bacia Rio Cachoeira}} = \frac{21,7}{16,4} \times Q_{\text{Estação Itanhangá}}$$

Como resultado da análise de consistência fluviométrica, obteve-se para a exutória da bacia do rio Cachoeira uma série de vazões médias mensais, julgada até então, consistente. Devido à carência de dados, não foi possível se obter uma série isenta de falhas, o que implica na possibilidade de que a quantificação das vazões a nível anual fique sujeita a incertezas. A Figura 4-15 mostra a variação da vazão na exutória da bacia ao longo do tempo, onde as barras azuis representam a vazão média de cada mês. Os valores dessa série mensal constam apresentados no Apêndice C.

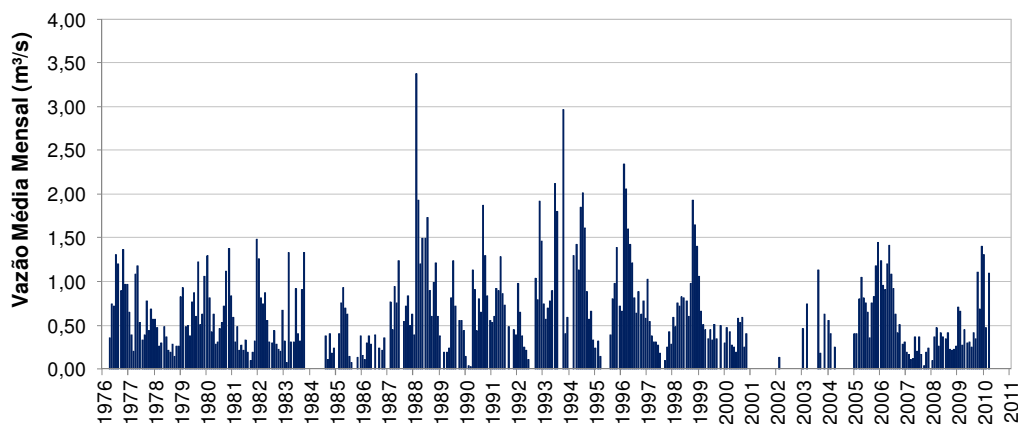


Figura 4-15 – Vazões Médias Mensais na Exutória da Bacia do Rio Cachoeira

4.3.2.3 Dados Meteorológicos

Para se empregar o método empírico do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) são necessários alguns dados meteorológicos que caracterizem a região de interesse, são eles os dados de precipitação pluvial e de temperatura média do ar.

Os dados de temperatura média do ar utilizados para caracterizar a bacia hidrográfica do rio Cachoeira foram medidos na estação Alto da Boa Vista. Conforme comentado anteriormente, a escolha desta estação se deu pela disponibilidade dos dados e a proximidade à bacia hidrográfica.

A série de temperaturas médias do ar disponível na estação Alto da Boa Vista compreende o período de janeiro/1997 a dezembro/2005. Buscando-se obter uma série completa e consistida até dezembro/2010, foi estabelecida uma correlação entre esses dados e os dados da estação climatológica da cidade do Rio de Janeiro. O ajuste que apresentou melhor qualidade foi do tipo potência, estabelecido para o período entre fevereiro/2003 e dezembro/2005, conforme apresentado na Figura 4-16 a seguir.

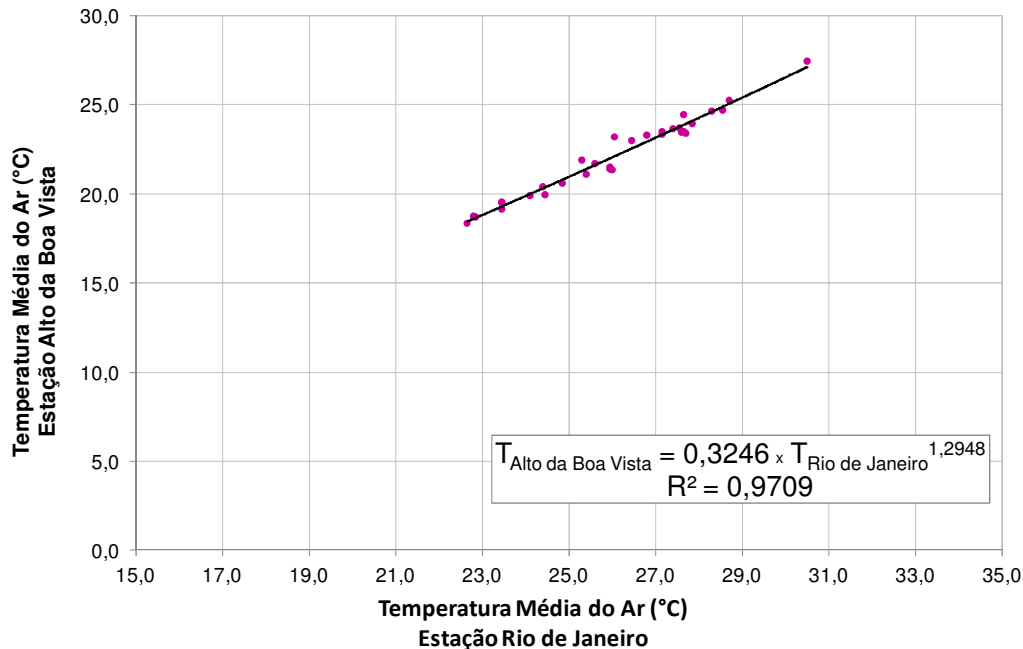


Figura 4-16 – Correlação Mensal de Temperaturas Médias do Ar entre as Estações Rio de Janeiro e Alto da Boa Vista (fev/2003 a dez/2005)

Nos poucos meses com falhas em ambas as estações, agosto/1997 e de abril a julho/2006, foram adotados os valores médios mensais calculados com base nos dados disponíveis na estação Alto da Boa Vista.

Como resultado da análise dos dados meteorológicos obteve-se uma série histórica consistente e sem falhas, que caracteriza as temperaturas médias do ar na região da bacia do rio Cachoeira. A Figura 4-17 mostra a variação da temperatura média do ar ao longo do tempo. Os valores dessa série constam apresentados no Apêndice D.

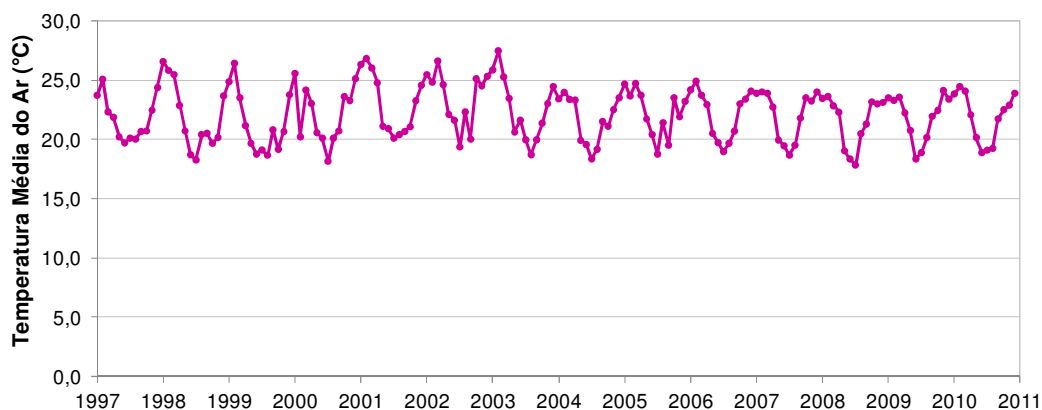


Figura 4-17 – Temperaturas Médias do Ar na Estação Alto da Boa Vista

Através dos dados observou-se que as temperaturas médias do ar se encontram em torno da média dos 22,1 °C, oscilando entre a máxima média de 27,5 °C e a mínima média de 17,8 °C.

Com base nos dados mensais de temperatura média do ar (Figura 4-17) e de precipitação total (Figura 4-10), foi calculado de forma sequencial o balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) para o período compreendido entre janeiro/1997 e dezembro/2010. Considerou-se a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) em 200 mm. Esse valor foi adotado conforme recomendação da literatura, que para espécies florestais varia de 150 a 300 mm (Stape e Gomes, 1996 e Neves, 2000).

Através desse método foram obtidas estimativas da evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e armazenamento de água no solo (ARM). Todos os cálculos foram realizados em planilha Microsoft Excel, elaborada por Rolim et al. (1998). Os valores dessas séries constam apresentados no Apêndice E.

4.3.3 Tratamento dos Dados de Satélite

Para o tratamento das imagens de satélite selecionadas utilizou-se o ferramental disponível na extensão *Spatial Analyst Tool* do ArcGIS 9.3 (ESRI). Dentre as funções presentes nessa extensão destaca-se o conjunto *Multivariate*, com funções específicas para processamento digital de imagens obtidas por sensoriamento remoto.

Segundo Figueiredo (2005), processar digitalmente uma imagem significa aplicar técnicas computacionais com o objetivo de facilitar a extração de atributos dessa imagem. Embora o sistema visual humano seja capaz de identificar facilmente padrões de cores, ele não consegue distinguir um único pixel de uma imagem.

Antes de iniciar o processamento dos dados de satélite, deve ser avaliado um pré-processamento. Figueiredo (2005) ressalta que as imagens na forma em que são recebidas originalmente dos satélites comumente apresentam degradações, geradas devido a desajustes na calibração dos detectores, erros esporádicos na transmissão dos dados, influências atmosféricas e distorções geométricas. As principais correções dessas imperfeições são geométricas, atmosféricas e radiométricas, e o que objetiva cada uma dessas correções é a necessidade da sua utilização.

Nas imagens foi aplicada apenas a correção geométrica, também conhecida como georreferenciamento, visto que as imagens selecionadas apresentaram entre si deslocamentos espaciais oriundos da movimentação do satélite. Devido à complexidade dos processos de correção atmosférica e radiométrica, e da quantidade de imagens trabalhadas, a aplicação dessas correções para melhorar a visualização das imagens estava fora das possibilidades do presente estudo.

4.3.3.1 Georreferenciamento

As imagens foram referenciadas no sistema de projeções UTM, utilizando o Datum WGS-84, Zona 23 Sul, identificando os mesmos pontos de controle nas dez imagens e os registrando em função da base cartográfica georreferenciada no mesmo sistema de projeções.

Os pontos de controle foram obtidos a partir da massa d'água da Lagoa da Tijuca. Esta feição foi considerada no georreferenciamento da imagem devido à facilidade em visualizar massas d'água nas imagens de satélite. A Figura 4-18 ilustra o resultado do georreferenciamento para a imagem do ano de 2010.

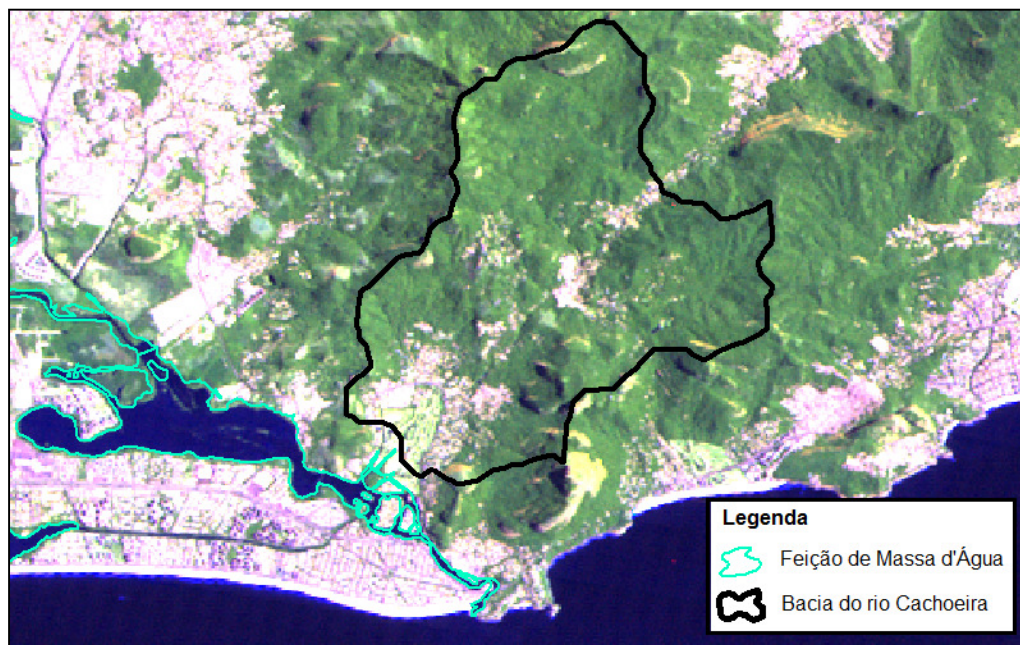


Figura 4-18 – Registro da Imagem de 2010 Corrigida Geograficamente

4.3.3.2 Classificação

A classificação de imagens de satélite é um processo de extração de informações, utilizado para mapear áreas da superfície terrestre reconhecendo seus padrões e objetos homogêneos (Körting, 2006).

Existem várias técnicas de classificação de imagens de sensoriamento remoto. As técnicas atuam sobre a imagem considerando as bandas espectrais selecionadas e os vetores de níveis de cinza para cada pixel dessas bandas. Esses vetores de níveis de cinza são "comparados" e os pixels com níveis de cinza mais similares, segundo a regra de decisão de cada técnica, tendem a ser classificados em uma mesma categoria (Nishida, 1998).

As técnicas de classificação podem ser divididas em dois grupos, a classificação supervisionada e a não supervisionada. Na classificação não supervisionada, cada pixel da imagem é associado automaticamente a uma classe espectral sem que se conheça o número ou identificação das diferentes classes presentes na imagem. Na classificação supervisionada, são selecionadas amostras representativas para cada uma das classes, que o

sistema utiliza como referência para decidir a qual classe cada pixel deve ser atribuído (Fonseca, *apud* Körting, 2006; Nishida, 1998).

No presente estudo foram realizadas classificações supervisionadas das dez imagens selecionadas para caracterizar a cobertura vegetal em função de duas classes temáticas de interesse:

- Área Florestal – Inclui-se nessa classe áreas que apresentam cobertura florestal e demais feições naturais não profusamente alteradas por atividades humanas; e
- Área Não Florestal – Inclui-se nessa classe áreas urbanizadas e a maioria das áreas cujas características originais foram alteradas em consequência de atividades humanas.

Procurou-se selecionar para cada imagem amostras simples e espacialmente bem distribuídas dentro da região da bacia estudada. Admite-se que a classificação empregada é extremamente simplificada e que numerosas diferenças em relação ao comportamento hidrológico devem existir dentro de uma mesma classe. Por exemplo: uma encosta florestada apresenta um grau de infiltração de água no solo muito superior ao de uma área revestida por capim colônio (*Megathyrsus maximus*). Da mesma forma as áreas urbanizadas podem apresentar distintas resultantes hidrológicas em função do grau de impermeabilização do solo, adensamento de construções, etc.

O método estatístico utilizado para classificação supervisionada foi o da máxima verossimilhança. De acordo com Nishida (1998), esse classificador é o mais difundido dentre os supervisionados. Seu método pressupõe que os níveis de cinza de cada classe seguem uma distribuição normal, avaliando as probabilidades que um determinado pixel tem de pertencer às classes identificadas e o designando àquela cuja probabilidade é maior.

Por se tratar de um processo automático, os produtos temáticos gerados pela classificação apresentaram erros, identificados como pixels isolados, fora do contexto das classes, o que deixou as áreas fragmentadas. Para contornar esses erros e proporcionar a uniformidade das classes mapeadas foi realizada uma pós-classificação.

4.3.3.3 Pós-Classificação

O processo de pós-classificação consistiu inicialmente na aplicação de um filtro majoritário, que avalia a frequência da classe que cada pixel pertence em relação às classes dos pixels vizinhos. Baseado na frequência da vizinhança, o filtro substitui a classe isolada pela classe de maior frequência.

Ainda assim, parte dos produtos gerados continuou a apresentar erros na classificação, necessitando de uma edição manual. Por identificação visual e relativo conhecimento da região, os vetores das classes foram alterados para que os produtos temáticos se tornassem mais representativos.

4.3.3.4 Mapeamento

Após a realização dos processos descritos anteriormente, foram gerados mapas temáticos de cobertura vegetal para bacia do rio Cachoeira através de cada imagem. Utilizou-se como contorno o recorte delimitado da bacia, o que possibilitou a extração das porcentagens das áreas definidas pelas classes. Ressalta-se que mesmo com os tratamentos e cuidados tomados no processamento dos dados de satélite, não podemos afirmar que os produtos temáticos elaborados condizem fielmente com a realidade.

Para validar o que foi constatado visualmente nas classificações, avaliou-se a matriz de confusão, que compara as amostras selecionadas para treinamento com o resultado da classificação. Entretanto, por terem sido escolhidas apenas duas classes temáticas de características bem distintas entre si, o desempenho da matriz de confusão demonstrou-se tendencioso e insuficiente para assegurar a acurácia da classificação.

Diante do exposto e com as referências disponíveis, a alternativa utilizada para avaliar a qualidade do resultado obtido no presente estudo foi a comparação do resultado do mapeamento temático gerado para o ano de 2010 com o resultado do trabalho de mapeamento da cobertura vegetal e do uso das terras no município do Rio de Janeiro, desenvolvido em 2010 pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente – SMAC. O mapa de vegetação e demais resultados deste trabalho é disponibilizado pela rede mundial de computadores através do sistema de informações geográficas SIG Floresta, podendo ser acessado pelo Portal da Prefeitura do Rio de Janeiro na página da SMAC.

5. Resultados e Discussões

5.1 Comportamento Hidrológico da Bacia

5.1.1 Análise da Relação Anual entre a Precipitação e a Vazão

A comparação dos dados de vazão com os dados de precipitação obtidos para a bacia do rio Cachoeira apresentou um comportamento coerente ao longo dos anos. A variação anual da precipitação na bacia teve seu padrão acompanhado pela vazão na exutória da bacia, conforme mostra a Figura 5-1, cujos valores estão indicados na Tabela 5-1.

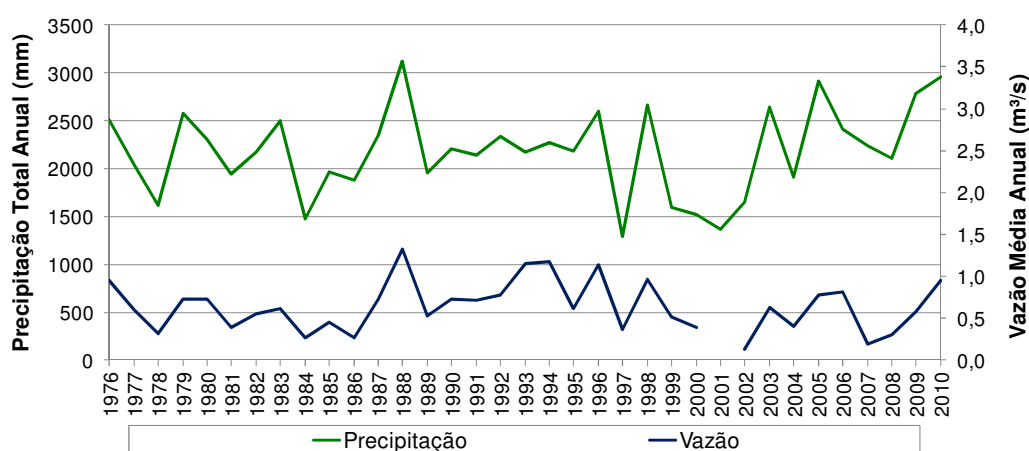


Figura 5-1 – Comportamento Anual da Precipitação e da Vazão na Bacia

Tabela 5-1 – Valores Anuais da Precipitação e da Vazão na Bacia

Ano	Vazão (m³/s)	Precipitação (mm)	Ano	Vazão (m³/s)	Precipitação (mm)
1976	1,0	2514	1994	1,2	2276
1977	0,6	2041	1995	0,6	2184
1978	0,3	1621	1996	1,1	2600
1979	0,7	2577	1997	0,4	1293
1980	0,7	2307	1998	1,0	2660
1981	0,4	1943	1999	0,5	1600
1982	0,6	2178	2000	0,4	1520
1983	0,6	2504	2001	-	1371
1984	0,3	1472	2002	0,1	1651
1985	0,5	1969	2003	0,6	2643
1986	0,3	1877	2004	0,4	1910
1987	0,7	2346	2005	0,8	2914
1988	1,3	3122	2006	0,8	2414
1989	0,5	1959	2007	0,2	2236
1990	0,7	2202	2008	0,3	2113
1991	0,7	2139	2009	0,6	2787
1992	0,8	2336	2010	1,0	2964
1993	1,2	2180			

Apesar da coerência em seus comportamentos, as duas componentes hidrológicas não puderam ser correlacionadas para o período total de 1976 a 2010, pois apresentaram baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,49$). Os dados apenas mostraram correlação razoável se comparados separadamente, divididos em dois períodos, de 1976 a 2000 e de 2001 a 2010. O ajuste de regressões lineares a essas correlações resultou em retas praticamente paralelas e com razoáveis coeficientes de determinação, conforme mostra a Figura 5-2 a seguir.

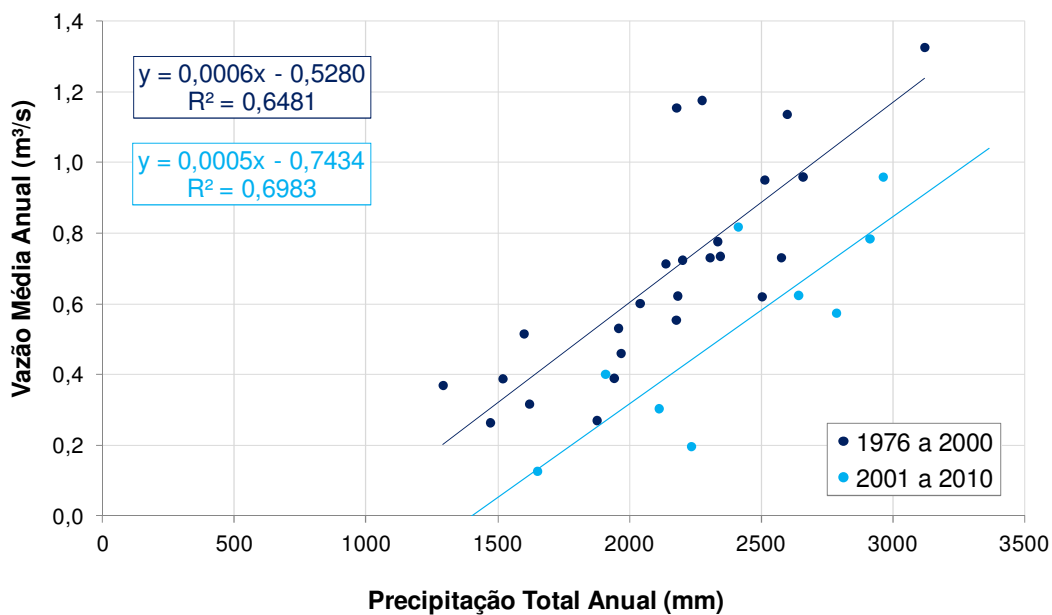


Figura 5-2 – Correlação Anual da Precipitação com a Vazão na Bacia

5.1.2 Estimativa da Evapotranspiração pelo Método do Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather

Através do cálculo do balanço hídrico pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), chegou-se aos resultados estimados de evapotranspiração real (ETR) para a bacia do rio Cachoeira no período entre 1997 e 2010. A Figura 5-3 a seguir ilustra em detalhe mensal as séries históricas de temperaturas médias do ar e de precipitações totais mensais na bacia, utilizadas no cálculo do balanço. A linha tracejada indica a precipitação média mensal do período, igual a 179 mm. Nesse intervalo analisado, 68 meses apresentaram precipitação total mensal acima da média, o que representa 40% do período.

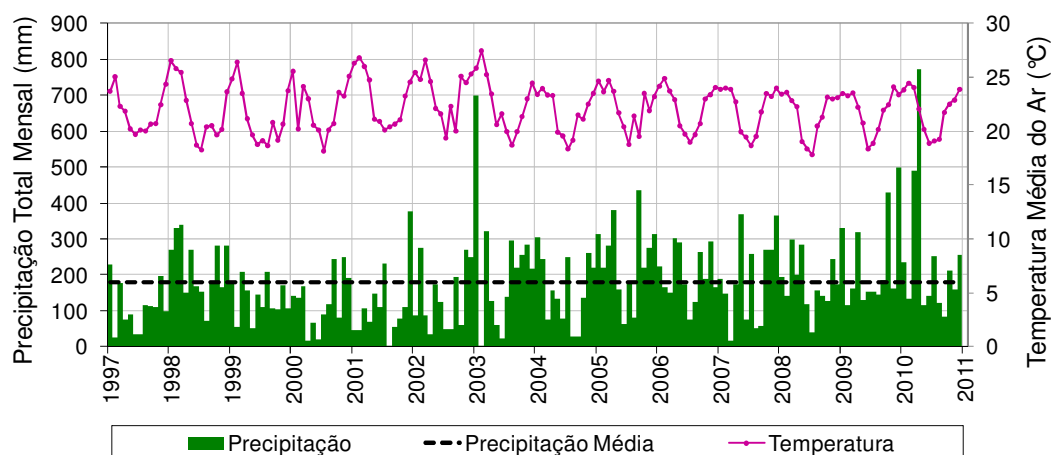


Figura 5-3 – Precipitação Total Mensal e Temperatura Média do Ar na Bacia do Rio Cachoeira entre 1997 e 2010

A Tabela 5-2 a seguir apresenta as evapotranspirações reais médias estimadas para cada mês, onde os maiores valores de evapotranspiração obtidos se encontraram no período chuvoso, entre dezembro e março.

Tabela 5-2 – Evapotranspiração Real Mensal Estimada (1997 a 2010)

Ano	Evapotranspiração Real (mm)												Total
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1997	115,4	101,0	95,7	83,0	66,9	56,9	57,7	64,1	70,8	77,9	97,1	124,9	1011,5
1998	152,9	129,4	132,6	92,4	70,5	50,7	48,8	66,6	68,9	67,7	73,6	117,5	1071,6
1999	130,2	122,0	109,8	77,9	63,5	52,8	56,6	55,1	73,2	65,6	80,2	119,6	1006,6
2000	138,7	69,5	116,0	80,5	68,0	44,3	47,7	63,7	70,1	105,4	105,1	136,3	1045,4
2001	126,3	91,1	118,4	80,9	70,2	63,5	58,4	54,7	62,8	76,4	102,4	127,0	1032,1
2002	130,4	114,7	139,9	80,0	78,1	67,9	50,8	76,5	58,8	114,1	117,2	137,3	1165,7
2003	142,6	107,4	129,2	96,9	66,9	64,0	58,5	50,7	61,6	80,7	100,4	126,3	1085,4
2004	112,1	107,9	105,2	97,8	64,9	57,7	50,6	55,9	67,1	82,1	97,9	116,4	1015,7
2005	126,3	103,3	122,5	100,6	78,4	62,0	51,1	74,1	59,5	105,4	89,6	111,1	1083,9
2006	120,2	118,0	110,6	92,6	68,0	57,1	53,0	60,0	69,8	99,9	106,3	122,1	1077,6
2007	116,9	107,6	92,7	90,8	63,7	55,6	51,2	58,9	77,7	105,8	104,6	121,6	1047,1
2008	112,7	104,3	102,0	87,8	58,5	49,6	47,2	68,5	77,0	103,3	103,5	111,9	1026,5
2009	112,6	100,0	109,2	86,3	71,1	48,5	53,3	64,8	81,9	94,7	115,5	114,3	1052,1
2010	116,6	113,0	115,1	84,7	66,0	51,9	54,8	57,6	79,8	95,2	101,3	120,5	1056,5
Média	125,3	106,4	114,2	88,0	68,2	55,9	52,9	62,2	69,9	91,0	99,6	121,9	1055,6

O total médio anual estimado para a evapotranspiração real no período estudado foi de 1.056 mm, variando entre 1.007 mm e 1.166 mm. Esse valor médio corresponde a aproximadamente 50% do total médio anual precipitado (2.148 mm), ou seja, essa estimativa indica que metade da precipitação sobre a bacia do rio Cachoeira retornaria à atmosfera pelos processos do ciclo hidrológico.

Cabe acrescentar que esse valor médio estimado é compatível com o valor médio descrito por Tucci e Clarke (1997) para florestas tropicais. De acordo com os autores, a evapotranspiração de florestas tropicais que raramente tem déficit de umidade do solo é em média 1.415 mm, podendo cair para 900 mm se houver períodos de déficit hídrico.

Como resultado do cálculo do balanço hídrico sequencial foi obtido a estimativa do extrato hídrico da bacia, fornecendo as componentes de variação da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM) na bacia. A Figura 5-4 e a Figura 5-5 apresentam esses resultados.

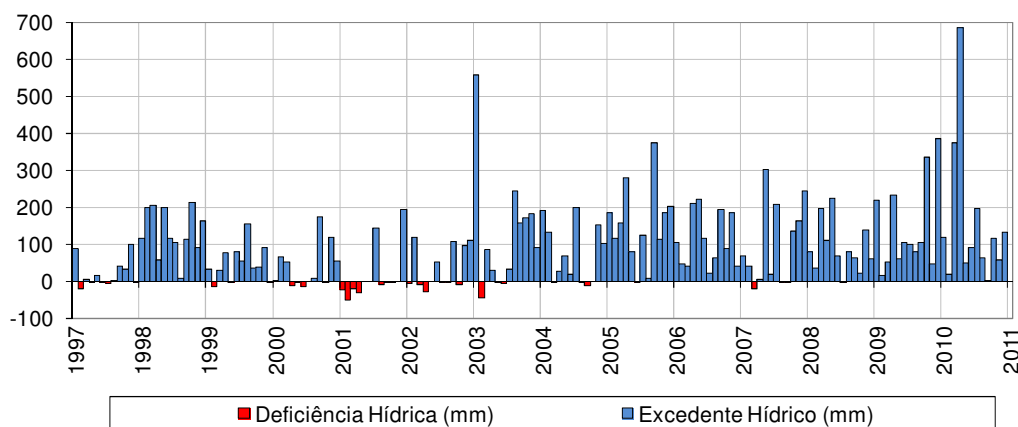


Figura 5-4 – Extrato do Balanço Hídrico Mensal para o Período de 1997 a 2010

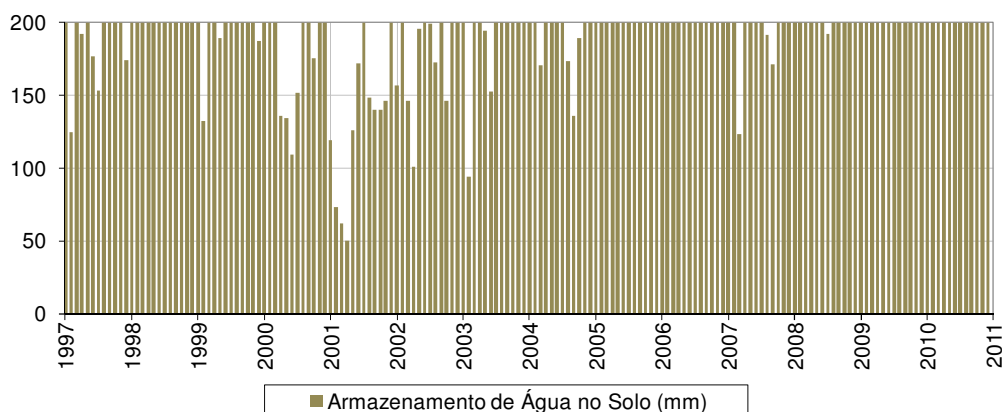


Figura 5-5 – Variação Mensal do Armazenamento de Água no Solo entre 1997 e 2010

Tanto no armazenamento de água no solo quanto nas deficiências e excedentes hídricos, é possível se observar para cada mês a influência dos totais precipitados e das temperaturas médias do ar. Nos meses de pouca precipitação, o extrato do balanço hídrico indicou valores baixos de excedentes hídricos e armazenamento de água no solo. Já nos meses de elevada precipitação, o extrato apresentou para essas variáveis valores mais altos.

Para o período analisado, a deficiência hídrica média obtida foi de 10 mm anuais, enquanto o excedente hídrico médio obtido foi de 121 mm. Quanto ao armazenamento de água no solo, 42 meses (25% do período total) resultaram em valores inferiores a 200 mm. O valor médio mensal obtido foi de 188 mm.

O período compreendido entre 2000 e 2003 foi o que teve maior ocorrência de meses com deficiência hídrica. Como a umidade no solo nesses meses não foi suficiente, a evapotranspiração potencial se reduziu e deixou de ser potencial, sendo denominada então evapotranspiração real. A Figura 5-6 a seguir apresenta para o período analisado as séries estimadas de evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) da bacia do rio Cachoeira. A comparação entre essas séries foi expressa através de uma razão, chamada de evapotranspiração relativa (ETR/ETP).

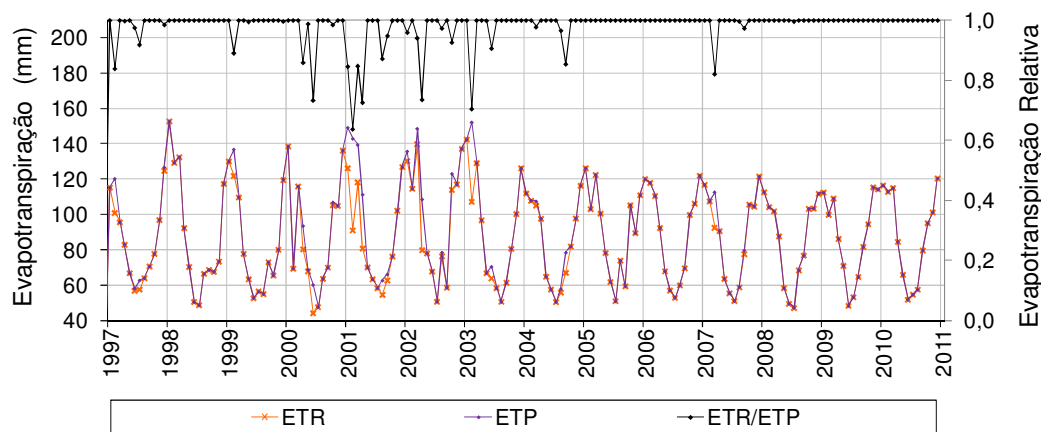


Figura 5-6 – Evapotranspiração Potencial e Evapotranspiração Real, entre 1997 e 2010

A evapotranspiração potencial anual média da bacia foi estimada em 1081,1 mm enquanto a evapotranspiração real anual média resultou em 1055,6 mm. O valor médio da razão evapotranspiração relativa foi de 0,98.

A Figura 5-7 mostra a variação anual da evapotranspiração real estimada e da vazão média na exutória da bacia ao longo do período estudado. Apesar de serem percebidas suaves tendências crescentes, o teste de hipótese de Mann-Kendall indicou que nenhuma das duas séries possui tendência significativa, para o intervalo de confiança de 95%, não sendo possível garantir estatisticamente as tendências graficamente observadas.

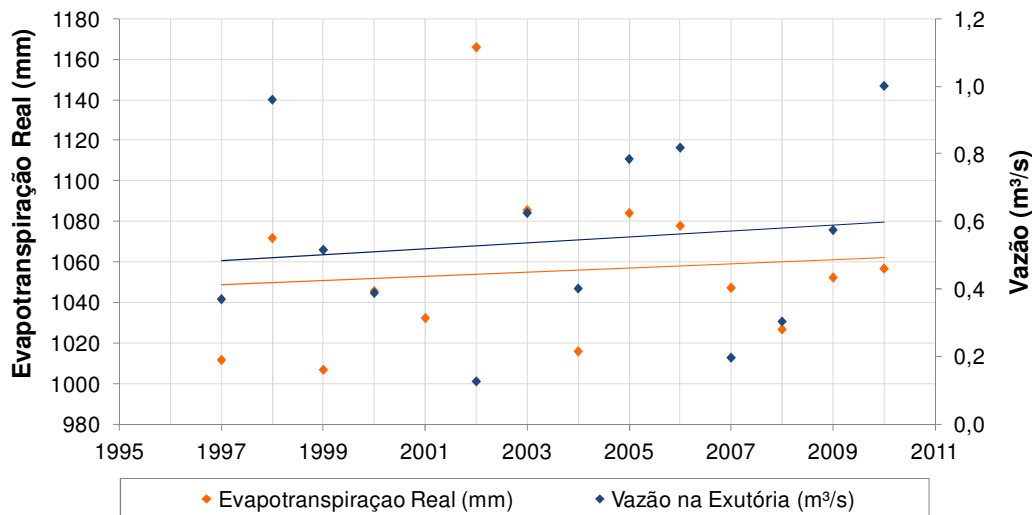


Figura 5-7 – Variação da Evapotranspiração Real e da Vazão (1997 a 2010)

É mostrada na Figura 5-8 a variação anual da evapotranspiração real estimada e da precipitação total na bacia. Observa-se para o período estudado que a precipitação total apresenta uma tendência crescente, garantida estatisticamente pelo teste de hipótese de Mann-Kendall para um intervalo de confiança maior que 99%.

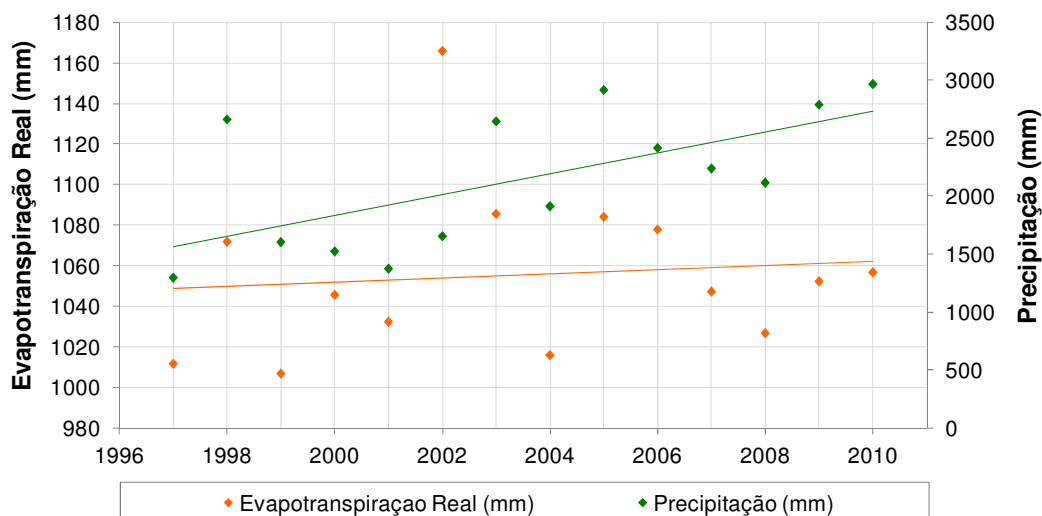
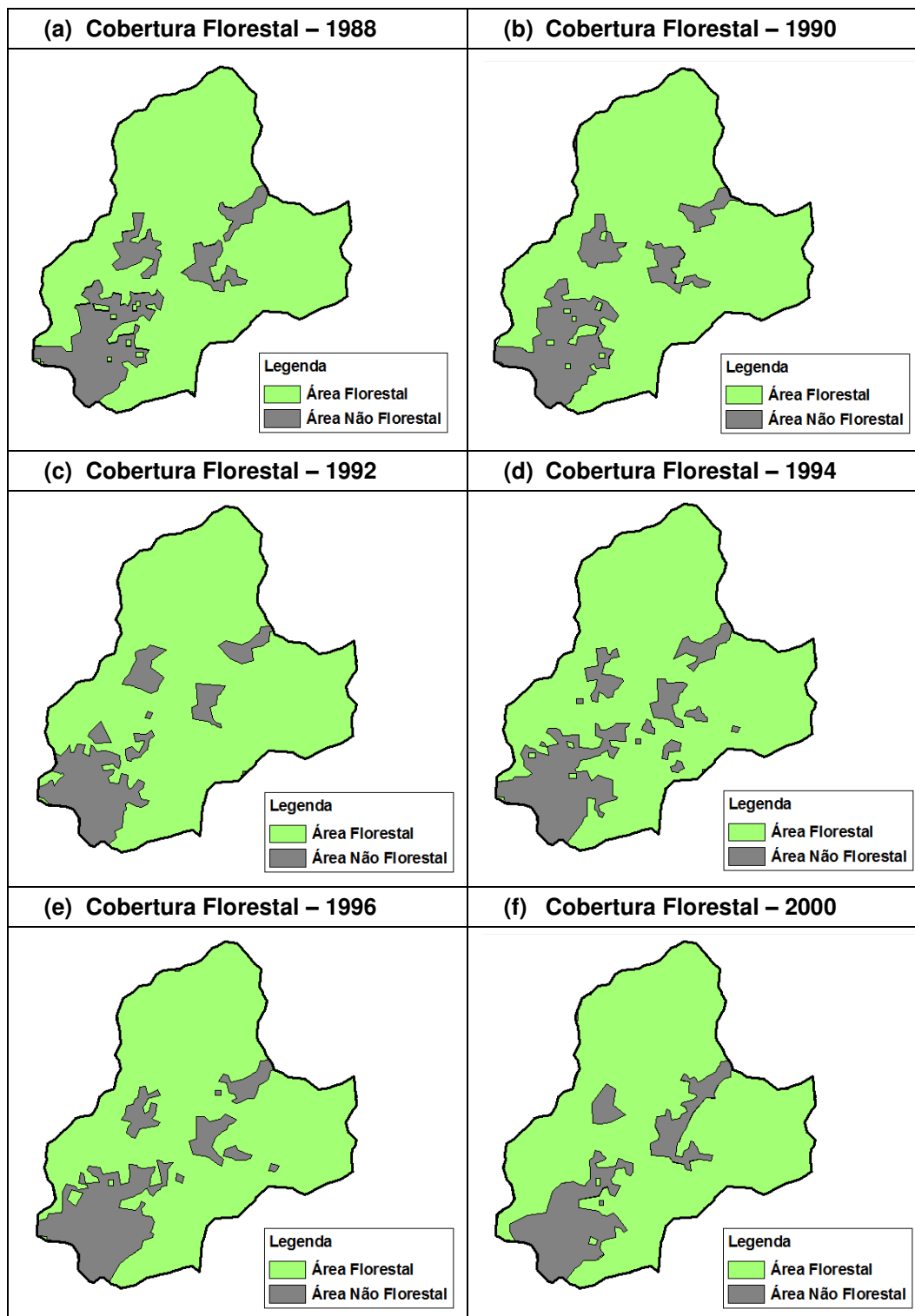


Figura 5-8 – Variação da Evapotranspiração Real e da Precipitação (1997 a 2010)

5.2 Dinâmica da Cobertura Vegetal

Os mapas temáticos gerados proporcionaram uma estimativa do histórico de alterações florestais sobre a bacia do rio Cachoeira. Esses mapas são apresentados em sequência na Figura 5-9, enquanto a quantificação das áreas classificadas encontra-se apresentada na Tabela 5-3 e ilustrada na Figura 5-10.



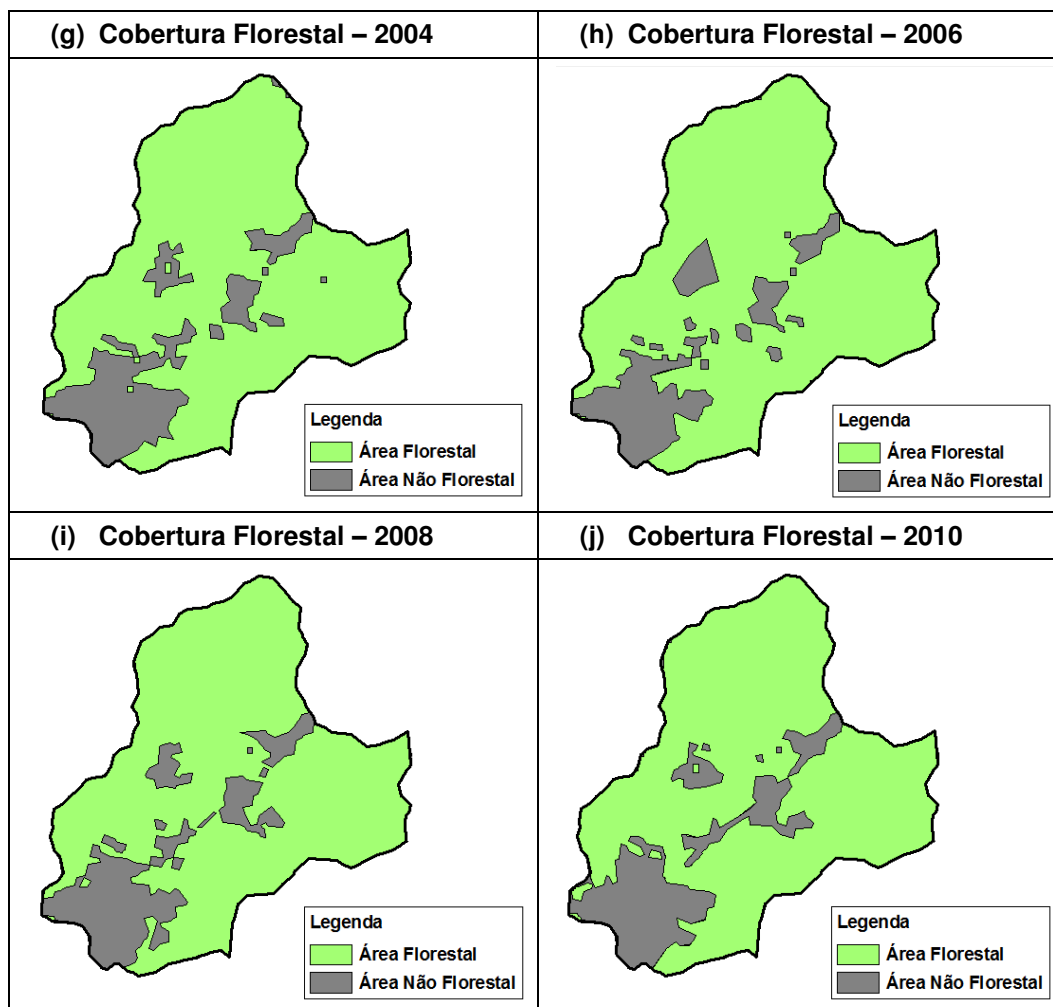


Figura 5-9 – Mapas de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira em Função das Classes “Área Florestal” e “Área Não Florestal”

Tabela 5-3 – Quantificação do Mapeamento de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira

Classes	Ocupação na bacia do rio Cachoeira (km ²)									
	1988	1990	1992	1994	1996	2000	2004	2006	2008	2010
Área Florestal	17,9	17,9	18,4	17,8	17,7	18,1	17,9	18,4	17,9	17,8
Área Não Florestal	3,8	3,9	3,3	3,9	4,0	3,6	3,8	3,3	3,8	3,9
Total	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7

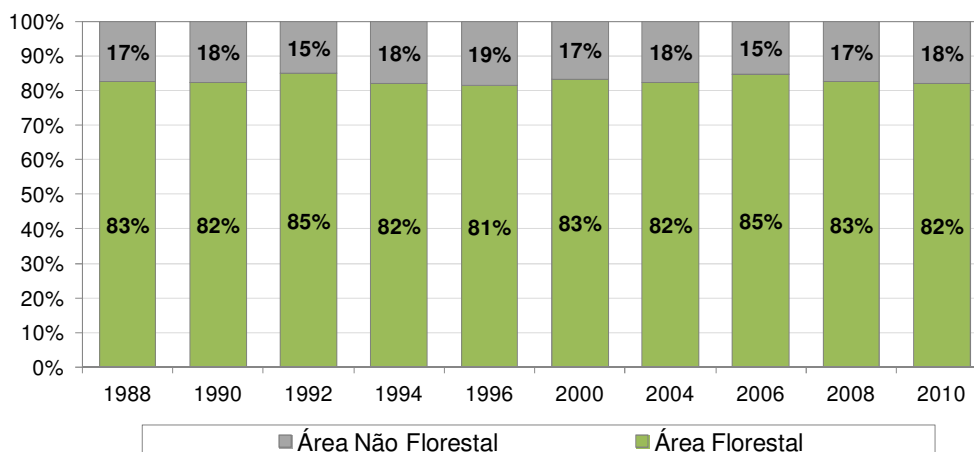


Figura 5-10 – Quantificação do Mapeamento de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira

Analisando-se cada ano dos mapas temáticos obtidos, observou-se que foram apontadas modificações na forma de ocupação da bacia. Entretanto, de acordo com as porcentagens estimadas (Figura 5-10), a dinâmica da cobertura da bacia apresentou um comportamento estável ao longo dos anos. As diferenças consecutivas encontradas não ultrapassaram a ordem de 3%.

A Figura 5-11 a seguir apresenta a comparação do mapeamento temático de 2010 obtido no presente estudo com o mapeamento temático de 2010 elaborado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente – SMAC.

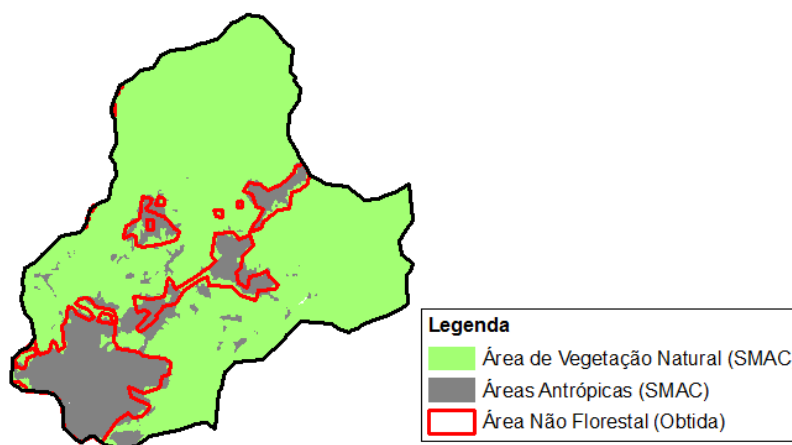


Figura 5-11 – Comparação dos Mapeamentos Temáticos de Cobertura Florestal - 2010

De maneira geral, verifica-se que o mapeamento obtido para a classe “Área Não Florestal” é semelhante ao elaborado pela SMAC na classe de referência “Áreas Antrópicas” (ou Área de Não Vegetal Natural). Através dessa comparação acredita-se que os mapas gerados para os anos anteriores a 2010 também sejam consistentes e representem uma estimativa da realidade do período passado.

5.3 Correlações

Conforme discutido no item 3.2, a revisão da literatura realizada por Balbinot et al. (2008) cita que muitos estudos mostraram que as perdas de água devido à evapotranspiração são mais significantes em bacias hidrográficas com cobertura florestal do que com outra cobertura.

Baseado nessa premissa e na consideração que a evapotranspiração é a componente hidrológica mais afetada pela alteração do tipo de cobertura da superfície terrestre (Tucci e Clarke, 1997), buscou-se correlacionar a variação entre as porcentagens de áreas florestais e a variação da evapotranspiração real da bacia do rio Cachoeira, estimada pelo método do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955). As variações foram calculadas para cada par de valores consecutivos correspondentes aos anos das imagens.

O resultado obtido nessa correlação foi satisfatório, indicando uma relação direta da evapotranspiração real com a dinâmica da cobertura florestal. O ajuste de uma equação linear nos pontos apresentou um bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,80$). Esses resultados são mostrados na Tabela 5-4 e ilustrados na Figura 5-12.

Tabela 5-4 – Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Evapotranspiração Real Estimada na Bacia do Rio Cachoeira

Ano da Imagem	Variação da Área Florestal (%)	Variação da Evapotranspiração Real (mm)
1988	-	-
1990	-0,3%	-
1992	2,6%	-
1994	-2,9%	-
1996	-0,5%	-
2000	1,8%	33,9
2004	-0,8%	-29,7
2006	2,2%	61,9
2008	-2,1%	-51,1
2010	-2,5%	30,0

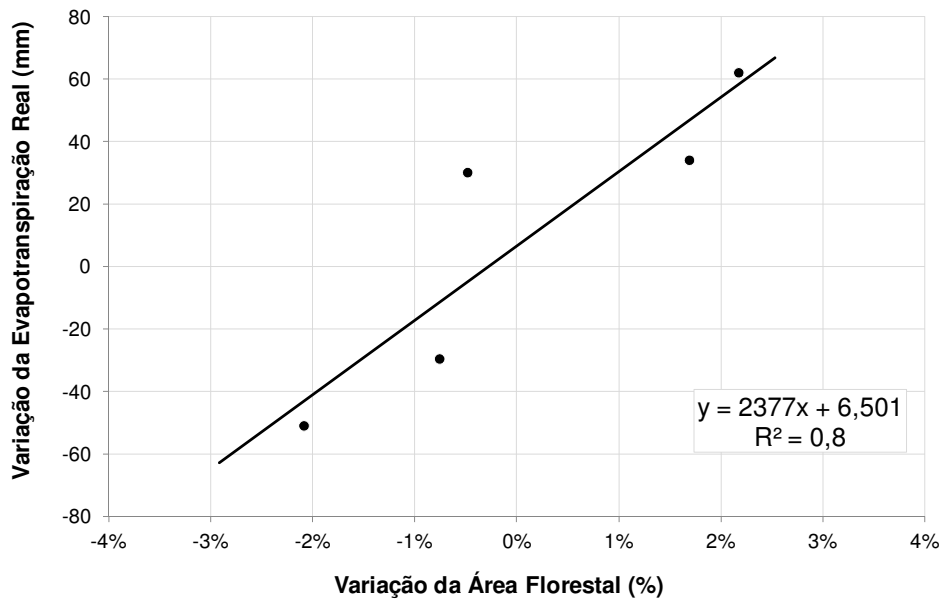


Figura 5-12 – Correlação entre a Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Evapotranspiração Real Estimada na Bacia do Rio Cachoeira

Ressalta-se ainda que se não fosse considerado na correlação o ponto que mais fugiu da tendência linear, referente a variação do ano de 2010, o coeficiente de determinação do ajuste seria igual a 0,98. Porém durante o desenvolvimento dos estudos não foram identificados motivos para desconsiderar esse ponto.

De acordo com o trabalho de Tucci e Clarke (1997), que apresenta uma revisão do conhecimento científico sobre a hidrologia de florestas com elementos quantitativos e indicadores obtidos por diversos autores, tem-se como um consenso geral na hidrologia a premissa de que os efeitos da alteração da cobertura vegetal e uso do solo causam impactos sobre o escoamento.

Através dessa premissa, buscou-se também correlacionar a variação entre as porcentagens de áreas florestais estimadas e a variação da vazão média na bacia do rio Cachoeira. O resultado obtido dessa correlação encontra-se apresentado na Tabela 5-5 e ilustrado na Figura 5-13. Conforme observado na figura, a correlação entre as variáveis apresentadas não foi capaz de representar significado matemático algum. Diante desse resultado cogitou-se a existência de fatores que puderam ter influenciado negativamente essa correlação, como a carência e incertezas dos dados fluviométricos, a simplificação utilizada na classificação da cobertura vegetal, e a interferência de outros processos climatológicos e fisiográficos que não puderam ser identificados no presente estudo.

Tabela 5-5 – Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Vazão Média na Bacia do Rio Cachoeira

Ano da Imagem	Variação da Área Florestal (%)	Variação da Vazão Média (m³/s)
1988	-	-
1990	-0,3%	-0,6
1992	2,6%	0,1
1994	-2,9%	0,4
1996	-0,5%	0,0
2000	1,8%	-0,7
2004	-0,8%	0,0
2006	2,2%	0,4
2008	-2,1%	-0,5
2010	-2,5%	0,7

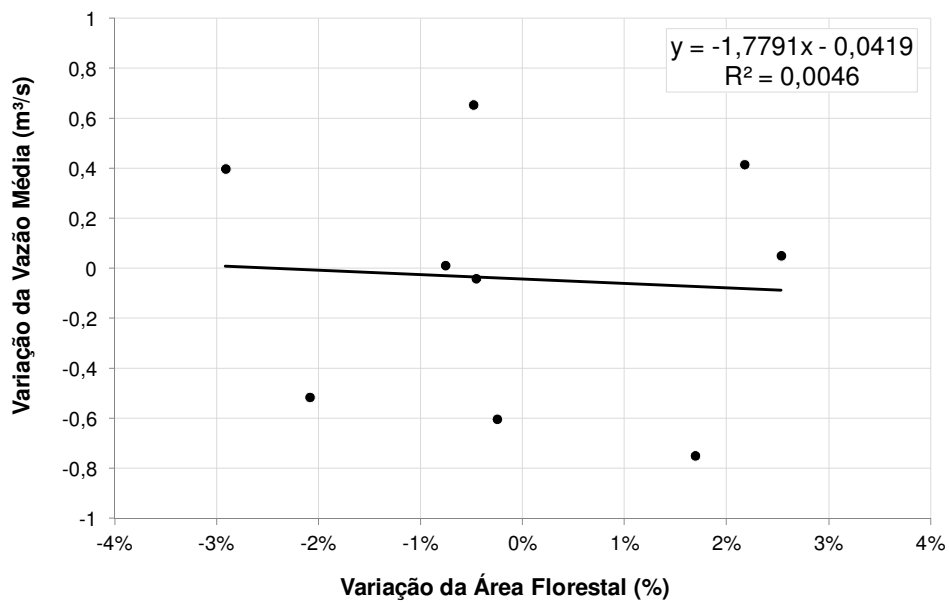


Figura 5-13 – Correlação entre a Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Vazão Média na Bacia do Rio Cachoeira

6. Conclusões e Recomendações

O presente estudo contribuiu como um exercício de agregação de conhecimento sobre a influência da cobertura vegetal nos processos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Cachoeira ao longo do tempo.

Atualmente a rede hidrometeorológica da bacia do rio Cachoeira apresenta uma carência geral de dados. Sua rede é composta por uma estação pluviométrica e uma fluviométrica. Através dessas e outras estações localizadas no entorno da bacia, sejam em operação ou já desativadas, foi possível se obter séries históricas de precipitações totais, vazões médias e temperaturas médias do ar para a bacia.

A análise dessas séries mostrou que existem razoáveis correlações anuais entre o total precipitado e a vazão média na bacia do rio Cachoeira, para o período compreendido entre 1976 e 2010. Os estudos estimaram para este período uma precipitação total média mensal de 181,9 mm e uma vazão média de longo termo de 0,7 m³/s.

A evapotranspiração real estimada pelo método do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) para o período entre 1997 e 2010 resultou em um valor total médio anual de 1.056 mm. Esse valor corresponde a aproximadamente 50% da precipitação total média anual do período (2.148 mm), ou seja, essa estimativa indica que metade da precipitação sobre a bacia do rio Cachoeira retornaria à atmosfera por evapotranspiração.

O teste de hipótese de Mann-Kendall aplicado às componentes hidrológicas obtidas indicou que, para o intervalo de confiança de 95%, não foi possível confirmar nenhuma tendência significativa nas séries de vazões e de evapotranspirações reais. Já a tendência crescente apresentada pela série de precipitações foi garantida estatisticamente para um intervalo de confiança maior que 99%. Cabe ressaltar que o resultado do teste de hipótese é condicionado à extensão das séries analisadas, que são curtas (14 anos). Caso estivessem disponíveis dados para a obtenção de séries históricas maiores, possivelmente as tendências encontradas seriam outras.

Os mapeamentos temáticos da cobertura vegetal da bacia do rio Cachoeira para anos de 1988, 1990, 1992, 1994, 1996, 2000, 2004, 2006, 2008 e 2010, elaborados com técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, tiveram resultados satisfatórios, apesar da escala de detalhe ter sido simplificada. Embora existam modificações na forma de ocupação das áreas florestais e não florestais na bacia ao longo dos anos, a dinâmica da cobertura da bacia apresentou um comportamento estável.

Após as análises que correlacionaram a variação das áreas florestais com a variação das componentes hidrológicas da bacia do rio Cachoeira, concluiu-se que apenas a evapotranspiração real apresentou uma relação direta com a dinâmica da cobertura vegetal. Esse resultado pode confirmar para a bacia do rio Cachoeira a consideração difundida na literatura, que a evapotranspiração é a componente hidrológica mais afetada pela alteração do tipo de cobertura da superfície terrestre.

A correlação da variação da cobertura com a vazão média da bacia não foi capaz de representar algum significado matemático. Diante disso foram cogitadas algumas hipóteses que puderam ter influenciado negativamente o resultado obtido, invalidando essa correlação.

A primeira hipótese aponta para a carência dos dados fluviométricos locais, visto que não foi possível se obter uma série de vazões isenta de falhas. Esse fato implica que a quantificação das vazões a nível anual pode estar sujeita a incertezas. A segunda hipótese levantada diz respeito à simplificação utilizada na classificação da cobertura vegetal. As variações apresentadas pelo agrupamento em apenas duas classes podem não ser capazes de explicar as alterações apresentadas pelas vazões da bacia, tendo em vista que cada tipo de cobertura influencia de forma diferente a capacidade de infiltração e o fluxo de água no solo. Como última hipótese cogitou-se que a relação entre a cobertura da superfície e a vazão da bacia possa sofrer interferência de outros processos climatológicos e fisiográficos que não puderam ser identificados no presente estudo.

Contudo, recomenda-se a realização futura de estudos similares que utilizem outros métodos para estimativa da evapotranspiração real ou até mesmo medidas diretas. Um maior detalhamento nas classes de cobertura vegetal e imagens de satélite em alta resolução, também forneceriam um entendimento

mais complexo das variações hidrológicas em função das suas alterações. Além dessas mudanças torna-se interessante a escolha de outras bacias com áreas de drenagem de maior porte. Esses estudos contribuiriam com novos resultados agregando conhecimento sobre a influência da modificação da cobertura vegetal no balanço hídrico de bacias hidrográficas.

7. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 26 nov. 2011.

AGRITEMPO. Agritempo: Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agroclima/sumario?uf=RJ>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

BALBINOT, R.; et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v. 4, n. 1, Jan./Abr. 2008.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 21 jul. 2012.

CÂMARA, G. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica. São José dos Campos. 193p. INPE, 1996.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/livros.php>>. Acesso em: outubro de 2011.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Representação gráfica informatizada do extrato do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather. *Bragantia*, V.52, n.2, p. 169-172. Campinas, 1993.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, V.59, n.2, p. 125-137. Campinas, 2000.

COELHO NETTO, A. L. O processo erosivo nas encostas do Maciço da Tijuca. Rio de Janeiro, UFRJ, Instituto de Geociências, 1979. 122 p.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Apostila de Hidrologia, V.8. IPH-UFRGS, 2011. Cap. 5, p. 38-64. Disponível em: <http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila_hidrologia/apostila.html>. Acesso em: 04/02/2012.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. GeoTIFF – Uma abordagem resumida do formato. Divisão de Geoprocessamento. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/media/geotiff.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2012.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. The ABC of GIS – An Introduction to geographic information systems. *Journal of Forestry* (p.13-20), 1992.

ESRI, Shapefile Technical Description. Environmental Systems Research Institute Inc., Redlands - USA, 1998.

FIGUEIREDO, D. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília - DF, 2005.

FONSECA, L. M. G. Processamento digital de imagens. INPE. São José dos Campos, 2000 *apud* KÖRTING, T. S. Classificação de Imagens por Regiões. INPE. São José dos Campos, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Unidades Federativas e Municípios do Brasil. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#GEOG/>. Acesso em: 15 mai. 2010.

INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO – GEORIO. Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.sistema-alerta-rio.com.br/>>. Acesso em: 11 jan. 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Divisão de Geração de Imagens – DGI. Imagens de satélites. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 31 jan. 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas (1961/1990). Brasília - DF, 1992.

JACCON, G.; CUDO, K. J. Curva-chave: análise e traçado. Brasília: DNAEE, 1989. 273p

KOBIYAMA, M. Manejo de Bacias Hidrográficas - Conceitos básicos. In: Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A. A.; CORSEUIL, C. W. Recursos hídricos e saneamento. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2008. 160p.

KÖRTING, T. S. Classificação de Imagens por Regiões. INPE. São José dos Campos, 2006.

LEMOS, M. C.; Souza, S. F.; Rocha, R. S. 2004. Avaliação da qualidade dos dados altimétricos derivado do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM): Resultados preliminares. In: Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, Recife 1-3 de setembro.

McCULLOCH, J. S. G.; ROBINSON, M., 1993. History of forest hydrology. *Journal of Hydrology*, 150: 189-216. *apud* TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.

Impacto das mudanças de cobertura vegetal no escoamento: Revisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V 2, n.1, p.135-152. Jan./Jun. 1997.

MORAES, E. C. Fundamentos de sensoriamento remoto. São José dos Campos. INPE, 2002. 23p.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. Atualização do Livro. INPE, 2001. 22p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 561p.

NISHIDA, W. Uma Rede Neural Artificial para Classificação de Imagens Multiespectrais de Sensoriamento Remoto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção - PPGE, Florianópolis - SC, 1998.

NEVES, J. C. L. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2000. 191p.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1979.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.

RUDORFF, B. F. T. Produtos de Sensoriamento Remoto. In: INPE, Princípios Físicos do Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, 2006.

SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE – SMAC. SIG Floresta. Disponível em: <<http://sigfloresta.rio.rj.gov.br/>>. Acesso em: 12 set. 2012.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. P. Evapotranspiração – Definições e conceitos. Notas de aulas. Meteorologia Agrícola. ESALQ, 2009.

STAPE, J. L.; GOMES, A. N. Influência dos estresses hídricos e nutricionais no crescimento de plantios de eucaliptos no nordeste do Brasil. In: Congresso Latino Americano de Ciência do Solo, 10, 1996, Águas de Lindóia.

TARBOTON, D. G. 1997. A New Method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models. Water Resources Research, 33(2), p. 309-319.

THORNTHWAITE, C. W.; HOLZMAN, B. Evaporation and transpiration. In: Climate and Man: Yearbook of Agriculture – 1941. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, p.545-550, 1941 *apud* CAMARGO, A. P.; CAMARGO,

M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, V. 59, n.2, p.125-137. Campinas, 2000.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, v.38, n.1, p. 55-94. New York, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. *Publications in Climatology*. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TREND. Trend/Change Detection Software. User Guide. Versão 1.0.2. CRC for Catchment Hydrology. Australia, 2005. Disponível em: <<http://www.toolkit.net.au/trend>>. Acesso em: ago. 2011.

TRIMBLE, S. W.; WEIRICH, F. H.; HOAG, B. L. Reforestation and the reduction of water yield on the southern Piedmont since circa 1940. *Water Resources Research*, Washington, v.23, p.425-437, 1987 *apud* BALBINOT, R.; et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v. 4, n. 1, Jan./Abr. 2008.

TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2ª ed., Porto Alegre: Editora da Universidade, 1993. 943 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças de cobertura vegetal no escoamento: Revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. V 2, n.1, p.135-152. Jan./Jun. 1997.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2 ed. Belo Horizonte, DESA-UFMG, 1996.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C. J. S. *Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação*. Porto Alegre, UFRGS Centro de Ecologia, 2004. ISBN 978-85-63843-02-9. Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>. Acesso em: 19 jan. 2012.

Apêndice A - Curvas Duplo-acumulativas das Estações Pluviométricas

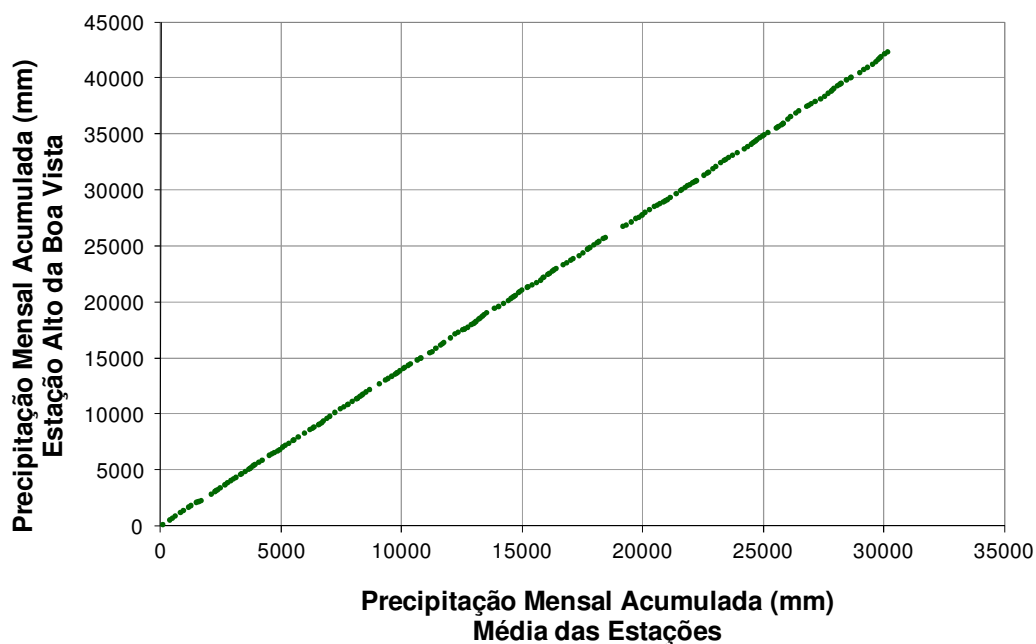


Figura A-1 – Curva Duplo-acumulativa da Estação Pluviométrica Alto da Boa Vista

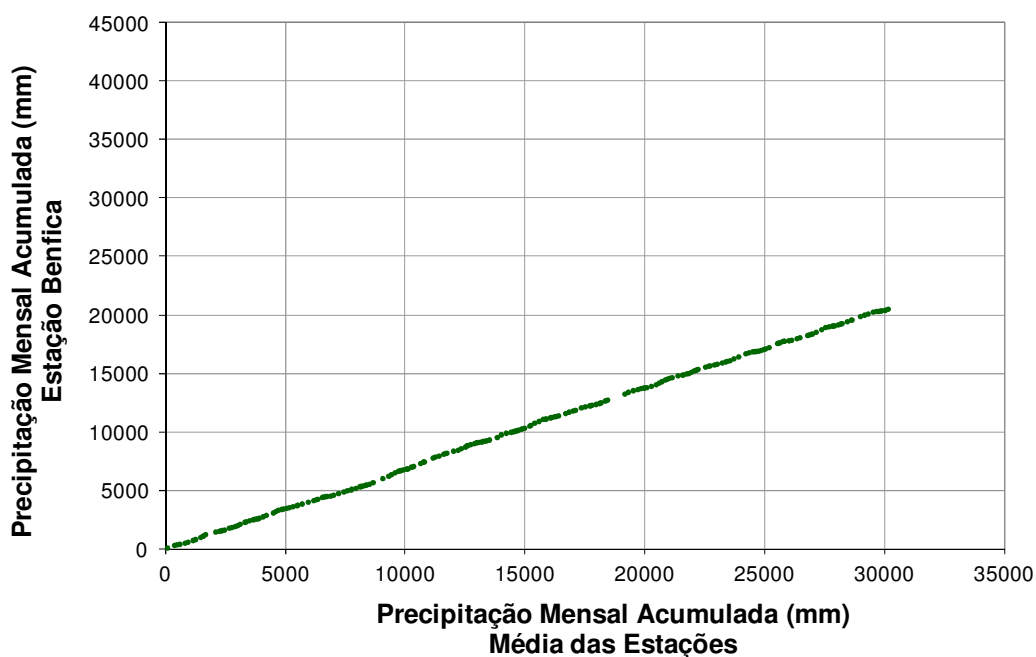


Figura A-2 – Curva Duplo-acumulativa da Estação Pluviométrica Benfica

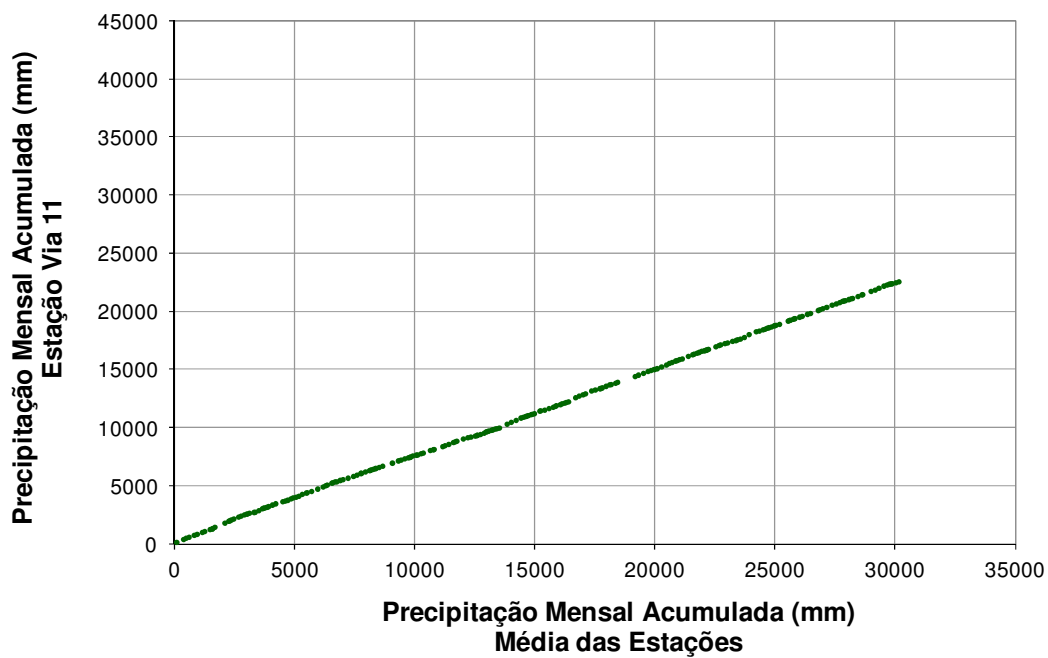


Figura A-3 – Curva Duplo-acumulativa da Estação Pluviométrica Via 11

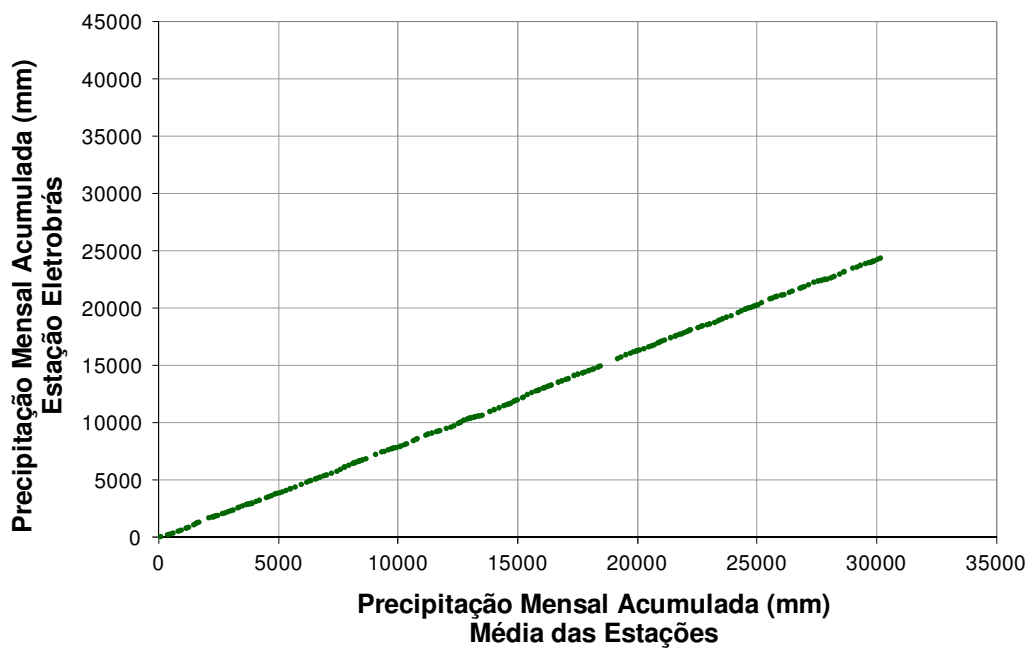


Figura A-4 – Curva Duplo-acumulativa da Estação Pluviométrica Eletrobrás

Apêndice B - Precipitações Totais Mensais na Bacia do Rio Cachoeira (mm)

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1976				111,6	412,4	147,3	208,6	347,2	166,7	270,6	127,2	249,9
1977	97,9	0,0	91,3	562,9	240,8	77,4	80,0	150,7	241,9	160,7	182,8	154,3
1978	128,2	263,7	71,3	189,4	194,6	79,9	33,6	154,1	92,8	49,5	196,3	167,5
1979	412,5	127,8	153,3	211,4	136,8	224,8	172,4	190,2	244,7	54,5	290,7	358,1
1980	290,0	140,2	76,0	269,8	41,9	158,5	111,9	245,4	184,3	275,3	356,8	156,7
1981	177,8	8,7	253,1	208,5	83,6	19,0	137,6	102,2	64,6	195,7	184,4	507,3
1982	306,0	152,4	183,1	200,8	103,6	45,3	134,1	314,5	90,0	178,0	126,2	344,2
1983	144,1	51,0	458,8	125,7	184,1	244,5	93,0	82,0	393,8	316,5	181,7	229,1
1984	86,4	1,4	161,7	217,9	81,4	69,9	113,8	193,2	86,6	141,2	148,0	170,8
1985	355,5	177,1	268,3	271,6	155,3	126,8	61,2	91,2	35,6	46,6	136,9	242,6
1986	44,0	162,9	246,0	213,1	97,7	25,4	262,8	88,4	174,3	86,4	156,3	320,0
1987	197,8	241,9	158,0	261,6	257,7	325,0	12,2	121,2	242,5	206,6	104,1	217,1
1988	100,2	967,7	168,1	272,1	252,3	228,8	253,0	25,8	158,2	299,3	263,3	132,9
1989	124,3	142,6	88,6	108,9	186,4	324,8	281,2	75,3	181,6	153,4	137,2	154,9
1990	95,9	20,2	78,4	467,2	177,7	87,7	309,6	178,9	336,5	195,6	79,1	175,4
1991	187,0	214,7	341,4	180,6	217,0	141,1	120,0	142,0	154,5	157,3	105,2	177,7
1992	389,8	65,3	64,7	149,7	83,1	21,4	314,7	165,3	270,7	169,4	544,5	96,9
1993	150,4	202,4	278,6	221,8	211,6	189,5	77,6	117,6	227,3	134,6	75,0	293,2
1994	175,8	37,3	452,3	247,7	173,7	270,7	218,4	157,0	93,2	68,3	236,2	145,8
1995	143,0	138,1	119,0	104,0	277,8	91,6	125,9	207,3	336,4	250,2	225,3	165,2
1996	232,6	733,3	369,4	200,1	114,7	151,6	71,2	59,9	243,9	57,9	199,1	166,0
1997	228,8	25,4	177,3	75,3	89,2	34,0	33,8	114,3	111,1	109,6	195,7	98,6
1998	268,2	329,0	338,4	150,4	269,6	166,7	153,0	72,8	183,0	281,1	165,9	281,4
1999	176,2	54,3	207,1	154,9	52,8	144,5	110,3	209,1	107,2	105,1	171,9	107,0
2000	140,4	135,0	167,8	16,3	66,3	19,4	89,9	119,5	244,3	81,0	248,7	191,1
2001	45,1	45,2	107,6	69,1	146,2	109,1	230,8	3,2	54,0	76,3	108,5	376,0
2002	87,3	275,7	86,4	34,7	172,4	124,4	49,9	49,9	194,1	60,0	268,6	248,0
2003	700,2	1,5	320,4	127,2	61,2	22,4	137,9	296,0	220,5	253,8	284,3	217,2
2004	304,0	242,0	75,8	154,6	133,0	76,9	249,6	29,1	29,4	135,6	261,0	218,7
2005	313,2	218,9	281,3	380,2	158,3	61,7	176,8	81,3	435,0	218,6	274,8	313,5
2006	223,9	165,7	150,5	302,3	289,2	172,6	75,7	123,5	264,9	189,2	292,4	163,8
2007	187,0	147,9	15,8	172,6	367,0	74,8	258,9	50,0	57,9	270,4	268,1	365,4
2008	193,9	140,6	299,6	198,2	284,3	119,4	39,0	156,4	140,5	126,0	242,9	172,2
2009	330,2	116,4	161,5	318,6	130,2	153,5	152,4	145,4	186,0	430,3	162,6	499,7
2010	235,3	131,3	491,0	772,2	116,3	141,9	250,9	119,8	82,8	211,4	157,6	253,7

Apêndice C - Vazões Médias Mensais na Exutória da Bacia do Rio Cachoeira (m³/s)

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1976				0,4	0,7	0,7	1,3	1,2	0,9	1,4	1,0	1,0
1977	0,6	0,4	0,2	1,1	1,2	0,5	0,3	0,4	0,8	0,4	0,7	0,6
1978	0,6	0,5	0,3	0,3	0,5	0,4	0,2	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3
1979	0,8	0,9	0,5	0,5	0,4	0,8	0,9	0,6	1,2	0,5	0,6	1,1
1980	1,3	0,8	0,4	0,6	0,3	0,3	0,5	0,5	0,7	1,1	1,4	0,8
1981	0,6	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	1,5
1982	1,3	0,8	0,7	0,9	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,7
1983	0,3	0,1	1,3	0,3	0,3	0,9	0,4	0,3	0,9	1,3		
1984								0,4	0,1	0,4	0,2	0,2
1985		0,4	0,8	0,9	0,7	0,6	0,1	0,1			0,1	0,4
1986	0,2	0,1	0,3	0,4	0,3		0,4		0,2	0,2	0,4	
1987		0,8	0,4	0,9	0,7	1,2		0,5	0,7	0,8	0,5	0,6
1988	0,4	3,4	1,9	1,2	1,5	1,5	1,7	0,9	0,6	1,0	1,2	0,6
1989	0,4		0,2	0,2	0,2	0,8	1,2	0,7		0,6	0,6	0,4
1990	0,1	0,0	0,0	1,1	0,9	0,4	0,8	0,7	1,9	1,3	0,8	0,6
1991	0,5	0,6	0,9	0,9	1,3	0,9	0,7		0,5		0,5	0,4
1992	1,0	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1			1,0	0,8	1,9	1,5
1993	0,7	0,6	0,7	0,8	0,9	2,1	1,8			3,0	0,4	0,6
1994			1,3	1,4	1,1	1,8	2,0	1,6	0,9	0,6	0,7	0,3
1995	0,2	0,3	0,1					0,4	0,8	1,0	1,4	0,7
1996	0,7	2,3	2,1	1,6	1,4	1,2	0,8	0,6	0,9	0,6	0,8	0,6
1997	1,0	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2		0,1	0,2	0,4	0,3
1998	0,6	0,5	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6	1,0	1,9	1,6	1,4
1999	1,1	0,7	0,5	0,5	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3		0,5	
2000	0,3	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,6	0,5	0,6	0,3	0,4	
2001												
2002		0,1										
2003	0,5		0,7					1,1	0,2		0,6	
2004	0,6	0,4		0,2								
2005	0,4	0,4	0,8	1,0	0,8	0,8	0,6	0,4	0,7	0,8	1,2	1,5
2006	1,2	1,0	0,9	1,2	1,4	1,1	0,9	0,6	0,4	0,5	0,3	0,3
2007	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	0,4	0,2	0,0	0,2	0,2	
2008	0,1	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3
2009	0,7	0,7	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3	1,1	0,7	1,4
2010	1,3	0,5	1,1									

Apêndice D – Temperaturas Médias do Ar na Estação Alto da Boa Vista (°C)

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1997	23,7	25,1	22,3	21,9	20,2	19,7	20,1	20,0	20,7	20,7	22,5	24,4
1998	26,6	25,8	25,5	22,9	20,7	18,7	18,3	20,4	20,5	19,7	20,2	23,7
1999	24,9	26,4	23,5	21,2	19,7	18,8	19,1	18,7	20,8	19,2	20,7	23,8
2000	25,6	20,2	24,2	23,0	20,6	20,1	18,2	20,1	20,7	23,6	23,3	25,1
2001	26,3	26,8	26,0	24,8	21,1	20,9	20,1	20,4	20,7	21,1	23,3	24,6
2002	25,5	24,8	26,6	24,6	22,1	21,6	19,4	22,3	20,0	25,1	24,5	25,3
2003	25,9	27,5	25,3	23,5	20,6	21,6	20,0	18,7	20,0	21,4	23,0	24,5
2004	23,4	24,0	23,4	23,3	19,9	19,6	18,4	19,2	21,5	21,1	22,5	23,5
2005	24,7	23,7	24,7	23,7	21,7	20,4	18,8	21,4	19,5	23,5	21,9	23,2
2006	24,2	24,9	23,7	22,9	20,5	19,7	19,0	19,7	20,7	23,0	23,4	24,0
2007	23,9	24,0	23,9	22,7	19,9	19,5	18,7	19,5	21,8	23,5	23,2	24,0
2008	23,4	23,6	22,8	22,3	19,0	18,3	17,8	20,5	21,3	23,2	23,0	23,1
2009	23,5	23,3	23,5	22,2	20,7	18,3	18,9	20,1	21,9	22,4	24,1	23,4
2010	23,8	24,4	24,0	22,1	20,1	18,9	19,1	19,2	21,7	22,5	22,9	23,9

Apêndice E – Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather para a Bacia do Rio Cachoeira

Data	ETP (mm)	ETR (mm)	ARM (mm)	EXC (mm)	DEF (mm)
jan/97	115,4	115,4	200,0	87,1	0,0
fev/97	120,4	101,0	124,4	0,0	-19,4
mar/97	95,7	95,7	200,0	6,0	0,0
abr/97	83,2	83,0	192,3	0,0	-0,2
mai/97	66,9	66,9	200,0	14,5	0,0
jun/97	58,4	56,9	177,1	0,0	-1,4
jul/97	62,9	57,7	153,1	0,0	-5,1
ago/97	64,1	64,1	200,0	3,3	0,0
set/97	70,8	70,8	200,0	40,3	0,0
out/97	77,9	77,9	200,0	31,7	0,0
nov/97	97,1	97,1	200,0	98,6	0,0
dez/97	126,8	124,9	173,6	0,0	-1,9
jan/98	152,9	152,9	200,0	115,3	0,0
fev/98	129,4	129,4	200,0	199,6	0,0
mar/98	132,6	132,6	200,0	205,8	0,0
abr/98	92,4	92,4	200,0	58,0	0,0
mai/98	70,5	70,5	200,0	199,1	0,0
jun/98	50,7	50,7	200,0	116,0	0,0
jul/98	48,8	48,8	200,0	104,2	0,0
ago/98	66,6	66,6	200,0	6,2	0,0
set/98	68,9	68,9	200,0	114,1	0,0
out/98	67,7	67,7	200,0	213,4	0,0
nov/98	73,6	73,6	200,0	92,3	0,0
dez/98	117,5	117,5	200,0	163,9	0,0
jan/99	130,2	130,2	200,0	33,4	0,0
fev/99	137,0	122,0	132,3	0,0	-15,0
mar/99	109,8	109,8	200,0	29,6	0,0
abr/99	77,9	77,9	200,0	77,0	0,0
mai/99	63,8	63,5	189,3	0,0	-0,3
jun/99	52,8	52,8	200,0	81,0	0,0
jul/99	56,6	56,6	200,0	53,7	0,0
ago/99	55,1	55,1	200,0	154,0	0,0
set/99	73,2	73,2	200,0	34,0	0,0
out/99	65,6	65,6	200,0	39,5	0,0
nov/99	80,2	80,2	200,0	91,7	0,0
dez/99	120,0	119,6	187,4	0,0	-0,4
jan/00	138,7	138,7	200,0	1,7	0,0
fev/00	69,5	69,5	200,0	65,5	0,0
mar/00	116,0	116,0	200,0	51,8	0,0
abr/00	93,7	80,5	135,9	0,0	-13,2
mai/00	68,8	68,0	134,2	0,0	-0,8
jun/00	60,3	44,3	109,4	0,0	-16,1

Data	ETP (mm)	ETR (mm)	ARM (mm)	EXC (mm)	DEF (mm)
jul/00	47,7	47,7	151,6	0,0	0,0
ago/00	63,7	63,7	200,0	7,3	0,0
set/00	70,1	70,1	200,0	174,1	0,0
out/00	107,0	105,4	175,6	0,0	-1,6
nov/00	105,1	105,1	200,0	119,3	0,0
dez/00	136,3	136,3	200,0	54,8	0,0
jan/01	149,3	126,3	118,8	0,0	-23,0
fev/01	143,0	91,1	72,8	0,0	-51,9
mar/01	139,6	118,4	62,1	0,0	-21,2
abr/01	111,4	80,9	50,3	0,0	-30,4
mai/01	70,2	70,2	126,2	0,0	0,0
jun/01	63,5	63,5	171,9	0,0	0,0
jul/01	58,4	58,4	200,0	144,3	0,0
ago/01	62,7	54,7	148,5	0,0	-8,0
set/01	66,2	62,8	139,7	0,0	-3,4
out/01	76,4	76,4	139,6	0,0	0,0
nov/01	102,4	102,4	145,8	0,0	0,0
dez/01	127,0	127,0	200,0	194,8	0,0
jan/02	135,8	130,4	156,9	0,0	-5,4
fev/02	114,7	114,7	200,0	117,9	0,0
mar/02	148,7	139,9	146,4	0,0	-8,8
abr/02	108,6	80,0	101,2	0,0	-28,7
mai/02	78,1	78,1	195,5	0,0	0,0
jun/02	67,9	67,9	200,0	52,0	0,0
jul/02	50,8	50,8	199,1	0,0	0,0
ago/02	78,6	76,5	172,4	0,0	-2,1
set/02	58,8	58,8	200,0	107,8	0,0
out/02	123,1	114,1	145,8	0,0	-9,0
nov/02	117,2	117,2	200,0	97,2	0,0
dez/02	137,3	137,3	200,0	110,7	0,0
jan/03	142,6	142,6	200,0	557,5	0,0
fev/03	152,3	107,4	94,1	0,0	-44,9
mar/03	129,2	129,2	200,0	85,3	0,0
abr/03	96,9	96,9	200,0	30,3	0,0
mai/03	67,0	66,9	194,3	0,0	-0,1
jun/03	70,6	64,0	152,7	0,0	-6,6
jul/03	58,5	58,5	200,0	32,1	0,0
ago/03	50,7	50,7	200,0	245,3	0,0
set/03	61,6	61,6	200,0	158,9	0,0
out/03	80,7	80,7	200,0	173,0	0,0
nov/03	100,4	100,4	200,0	183,9	0,0
dez/03	126,3	126,3	200,0	90,9	0,0
jan/04	112,1	112,1	200,0	191,9	0,0
fev/04	107,9	107,9	200,0	134,1	0,0
mar/04	107,6	105,2	170,6	0,0	-2,4
abr/04	97,8	97,8	200,0	27,5	0,0
mai/04	64,9	64,9	200,0	68,0	0,0

Data	ETP (mm)	ETR (mm)	ARM (mm)	EXC (mm)	DEF (mm)
jun/04	57,7	57,7	200,0	19,2	0,0
jul/04	50,6	50,6	200,0	199,0	0,0
ago/04	57,9	55,9	173,1	0,0	-2,0
set/04	78,5	67,1	135,4	0,0	-11,4
out/04	82,1	82,1	189,0	0,0	0,0
nov/04	97,9	97,9	200,0	152,0	0,0
dez/04	116,4	116,4	200,0	102,3	0,0
jan/05	126,3	126,3	200,0	186,9	0,0
fev/05	103,3	103,3	200,0	115,6	0,0
mar/05	122,5	122,5	200,0	158,8	0,0
abr/05	100,6	100,6	200,0	279,6	0,0
mai/05	78,4	78,4	200,0	79,9	0,0
jun/05	62,0	62,0	199,8	0,0	0,0
jul/05	51,1	51,1	200,0	125,4	0,0
ago/05	74,1	74,1	200,0	7,2	0,0
set/05	59,5	59,5	200,0	375,5	0,0
out/05	105,4	105,4	200,0	113,2	0,0
nov/05	89,6	89,6	200,0	185,2	0,0
dez/05	111,1	111,1	200,0	202,4	0,0
jan/06	120,2	120,2	200,0	103,7	0,0
fev/06	118,0	118,0	200,0	47,7	0,0
mar/06	110,6	110,6	200,0	39,9	0,0
abr/06	92,6	92,6	200,0	209,7	0,0
mai/06	68,0	68,0	200,0	221,2	0,0
jun/06	57,1	57,1	200,0	115,5	0,0
jul/06	53,0	53,0	200,0	22,7	0,0
ago/06	60,0	60,0	200,0	63,5	0,0
set/06	69,8	69,8	200,0	195,1	0,0
out/06	99,9	99,9	200,0	89,3	0,0
nov/06	106,3	106,3	200,0	186,1	0,0
dez/06	122,1	122,1	200,0	41,7	0,0
jan/07	116,9	116,9	200,0	70,1	0,0
fev/07	107,6	107,6	200,0	40,3	0,0
mar/07	112,8	92,7	123,1	0,0	-20,1
abr/07	90,8	90,8	200,0	5,0	0,0
mai/07	63,7	63,7	200,0	303,3	0,0
jun/07	55,6	55,6	200,0	19,2	0,0
jul/07	51,2	51,2	200,0	207,7	0,0
ago/07	59,1	58,9	191,1	0,0	-0,2
set/07	79,8	77,7	171,3	0,0	-2,1
out/07	105,8	105,8	200,0	135,9	0,0
nov/07	104,6	104,6	200,0	163,5	0,0
dez/07	121,6	121,6	200,0	243,8	0,0
jan/08	112,7	112,7	200,0	81,2	0,0
fev/08	104,3	104,3	200,0	36,3	0,0
mar/08	102,0	102,0	200,0	197,6	0,0
abr/08	87,8	87,8	200,0	110,4	0,0

Data	ETP (mm)	ETR (mm)	ARM (mm)	EXC (mm)	DEF (mm)
mai/08	58,5	58,5	200,0	225,8	0,0
jun/08	49,6	49,6	200,0	69,8	0,0
jul/08	47,4	47,2	191,8	0,0	-0,2
ago/08	68,5	68,5	200,0	79,6	0,0
set/08	77,0	77,0	200,0	63,5	0,0
out/08	103,3	103,3	200,0	22,7	0,0
nov/08	103,5	103,5	200,0	139,4	0,0
dez/08	111,9	111,9	200,0	60,3	0,0
jan/09	112,6	112,6	200,0	217,6	0,0
fev/09	100,0	100,0	200,0	16,4	0,0
mar/09	109,2	109,2	200,0	52,3	0,0
abr/09	86,3	86,3	200,0	232,3	0,0
mai/09	71,1	71,1	200,0	59,1	0,0
jun/09	48,5	48,5	200,0	105,0	0,0
jul/09	53,3	53,3	200,0	99,1	0,0
ago/09	64,8	64,8	200,0	80,6	0,0
set/09	81,9	81,9	200,0	104,1	0,0
out/09	94,7	94,7	200,0	335,6	0,0
nov/09	115,5	115,5	200,0	47,1	0,0
dez/09	114,3	114,3	200,0	385,4	0,0
jan/10	116,6	116,6	200,0	118,7	0,0
fev/10	113,0	113,0	200,0	18,3	0,0
mar/10	115,1	115,1	200,0	375,9	0,0
abr/10	84,7	84,7	200,0	687,5	0,0
mai/10	66,0	66,0	200,0	50,3	0,0
jun/10	51,9	51,9	200,0	90,0	0,0
jul/10	54,8	54,8	200,0	196,1	0,0
ago/10	57,6	57,6	200,0	62,2	0,0
set/10	79,8	79,8	200,0	3,0	0,0
out/10	95,2	95,2	200,0	116,2	0,0
nov/10	101,3	101,3	200,0	56,3	0,0
dez/10	120,5	120,5	200,0	133,2	0,0