

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.

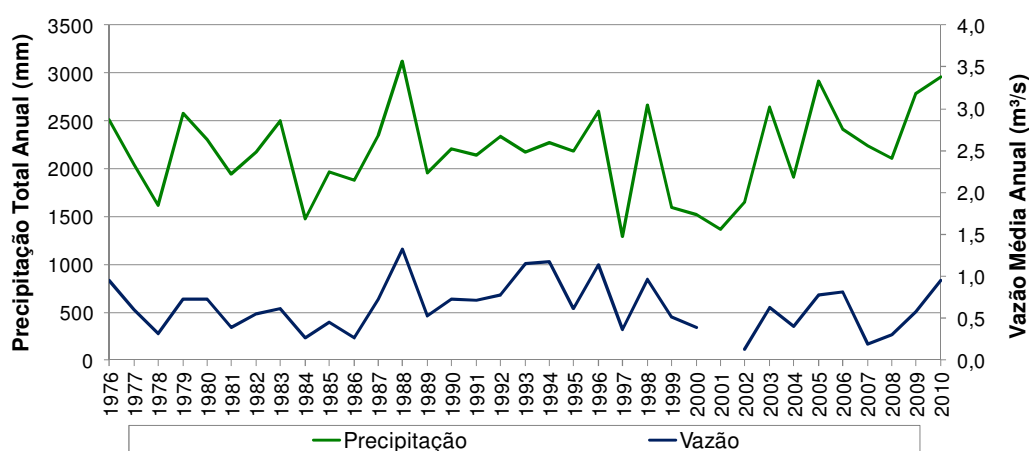


Figura 5-1 – Comportamento Anual da Precipitação e da Vazão na Bacia

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.

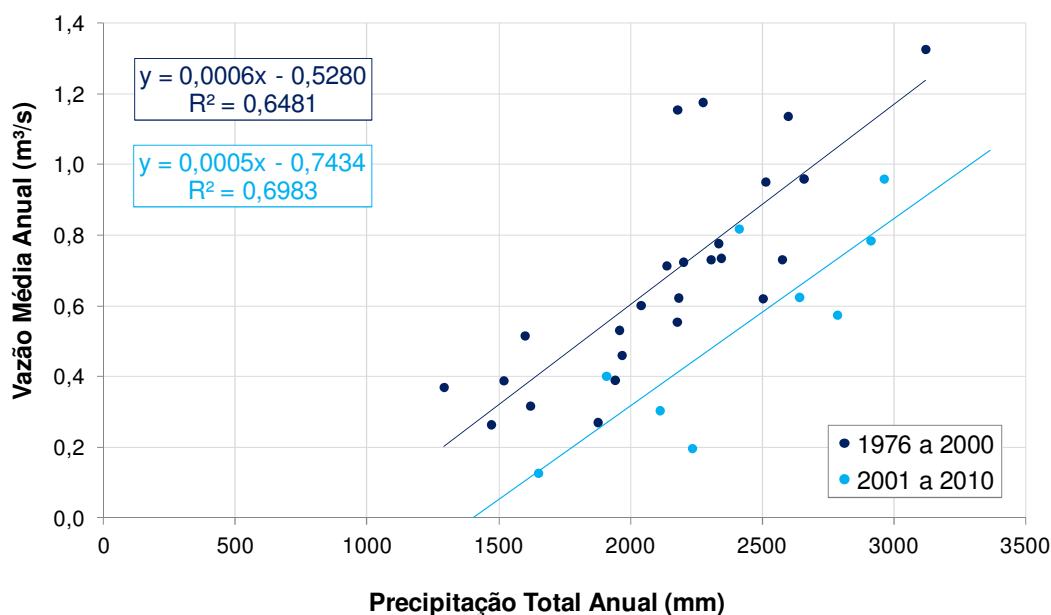


Figura 5-2 – Correlação Anual da Precipitação com a Vazão na Bacia

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.

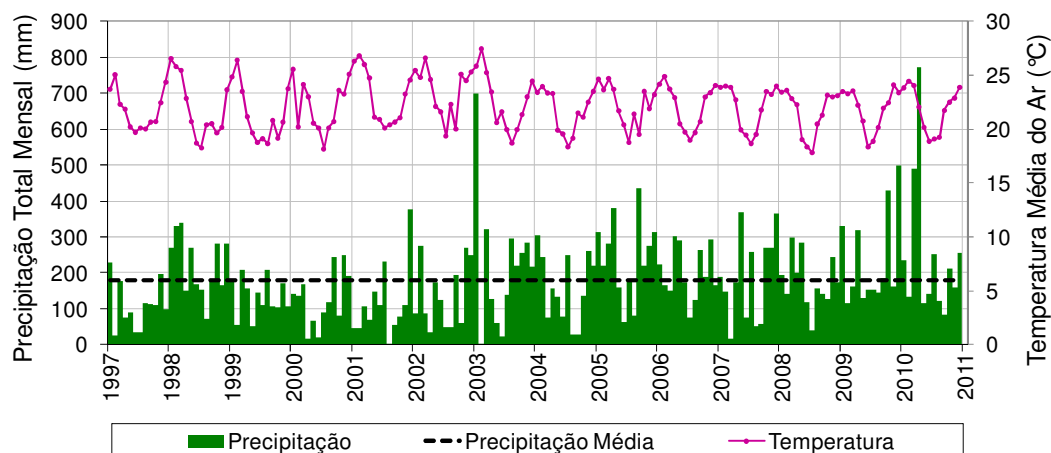


Figura 5-3 – Precipitação Total Mensal e Temperatura Média do Ar na Bacia do Rio Cachoeira entre 1997 e 2010

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.

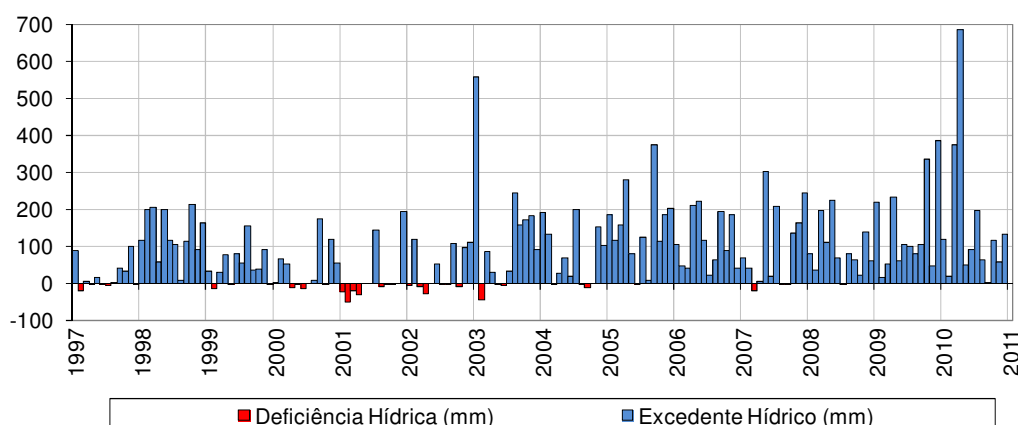


Figura 5-4 – Extrato do Balanço Hídrico Mensal para o Período de 1997 a 2010

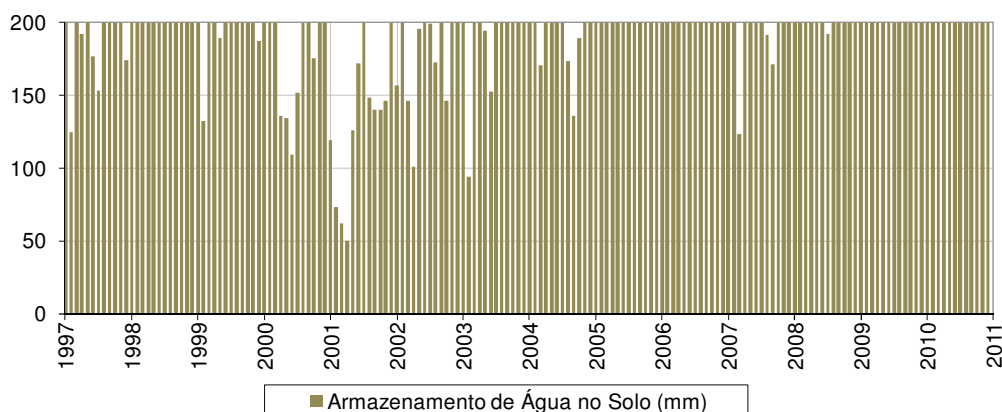


Figura 5-5 – Variação Mensal do Armazenamento de Água no Solo entre 1997 e 2010

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).

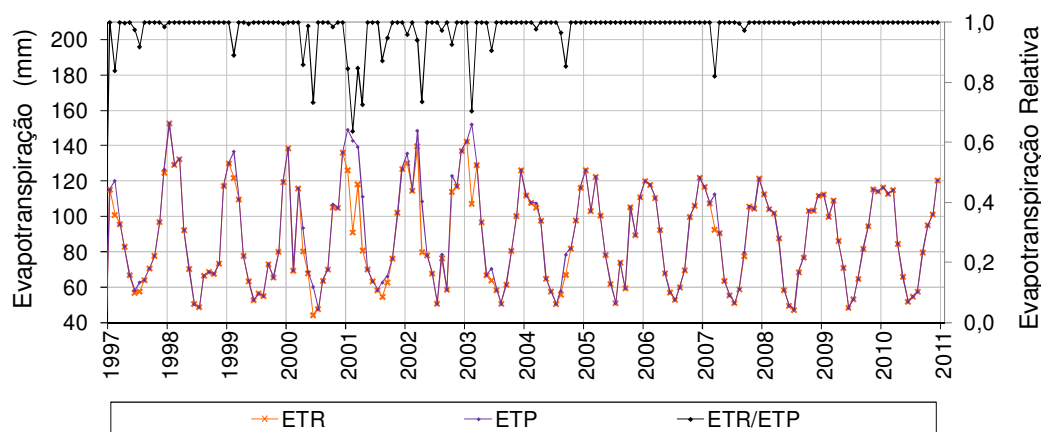


Figura 5-6 – Evapotranspiração Potencial e Evapotranspiração Real, entre 1997 e 2010

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.

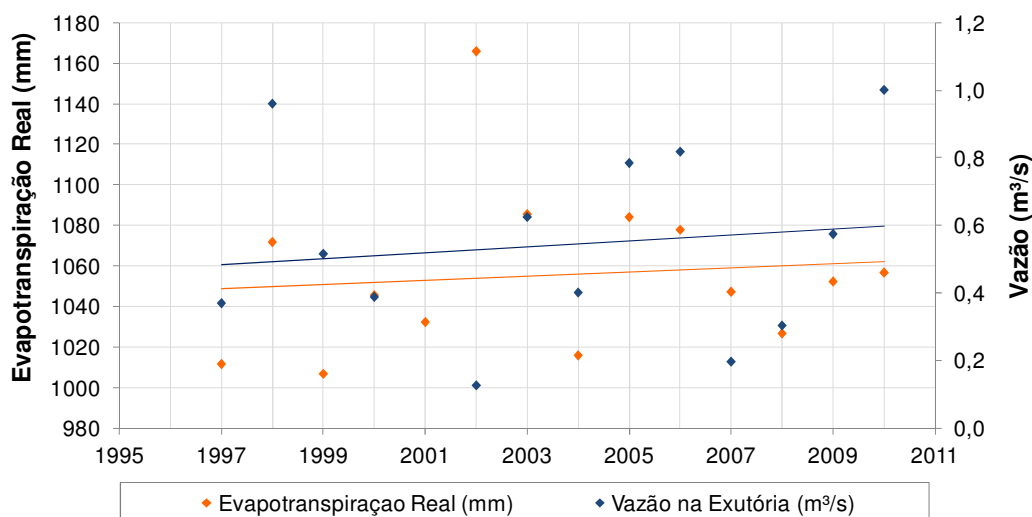


Figura 5-7 – Variação da Evapotranspiração Real e da Vazão (1997 a 2010)

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%.

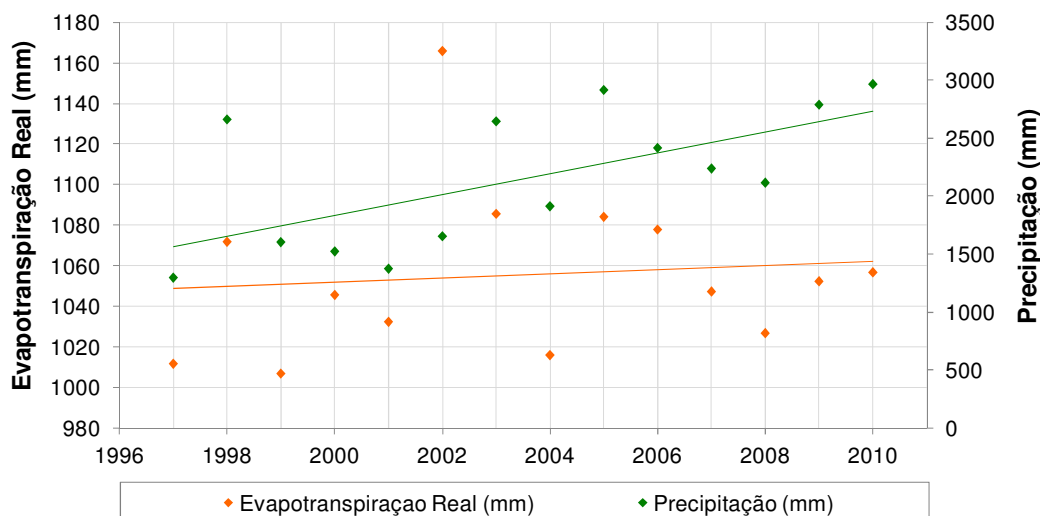
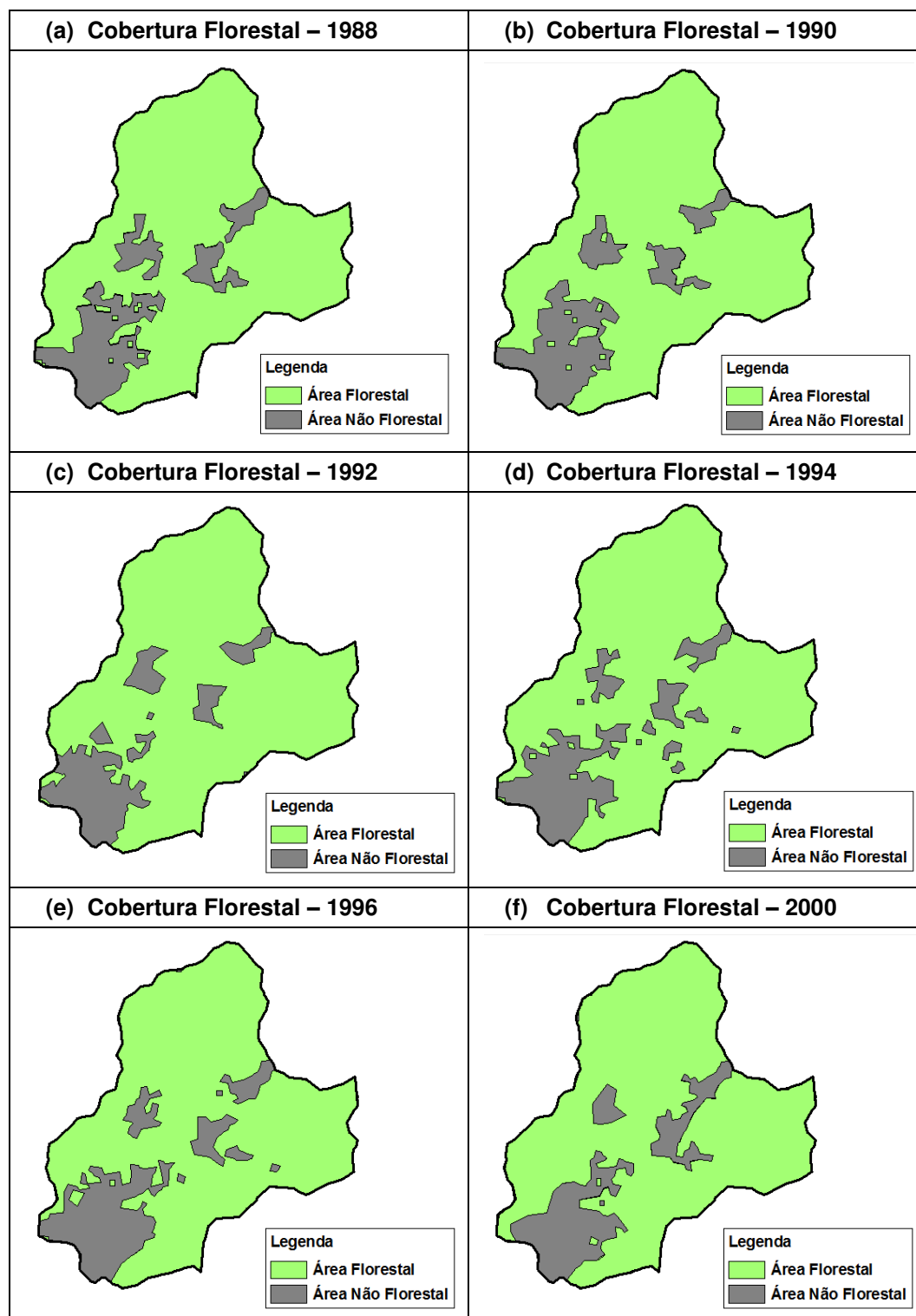


Figura 5-8 – Variação da Evapotranspiração Real e da Precipitação (1997 a 2010)

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.



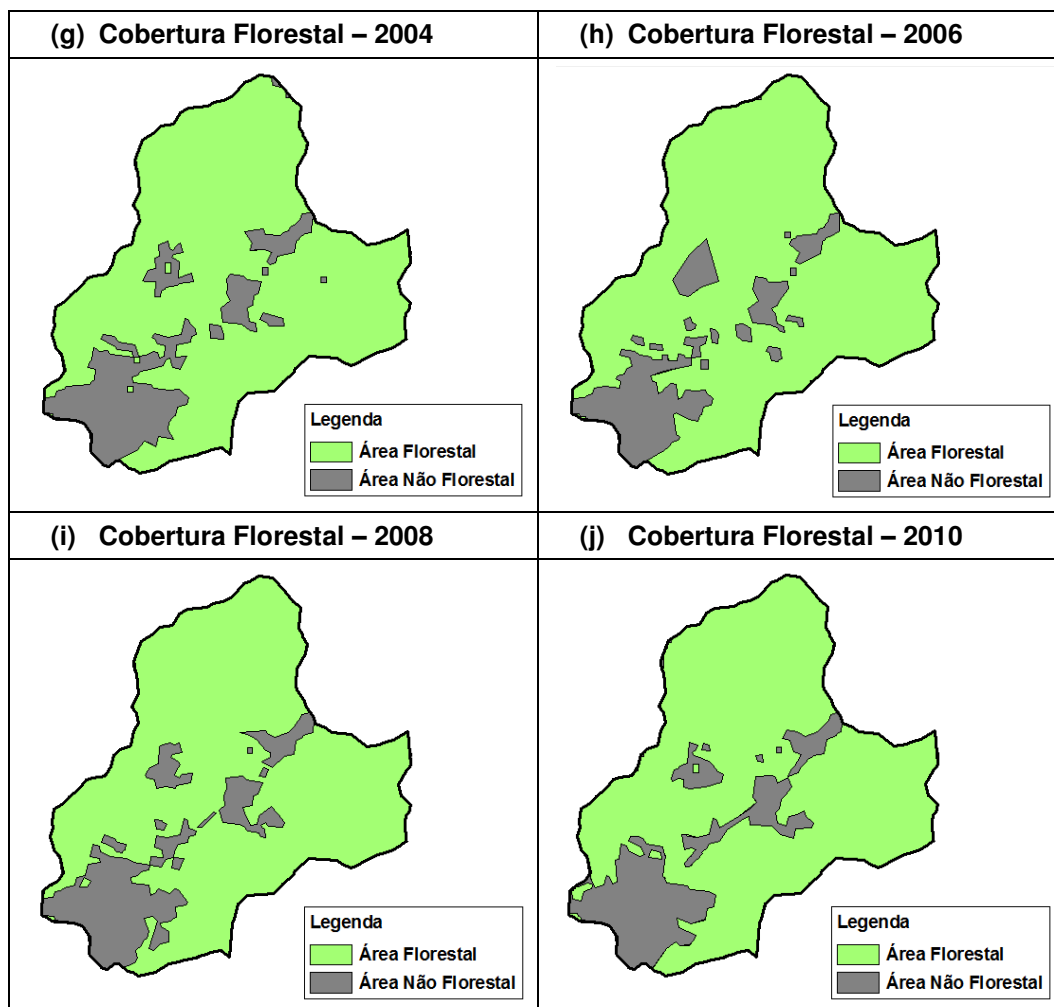


Figura 5-9 – Mapas de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira em Função das Classes “Área Florestal” e “Área Não Florestal”

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

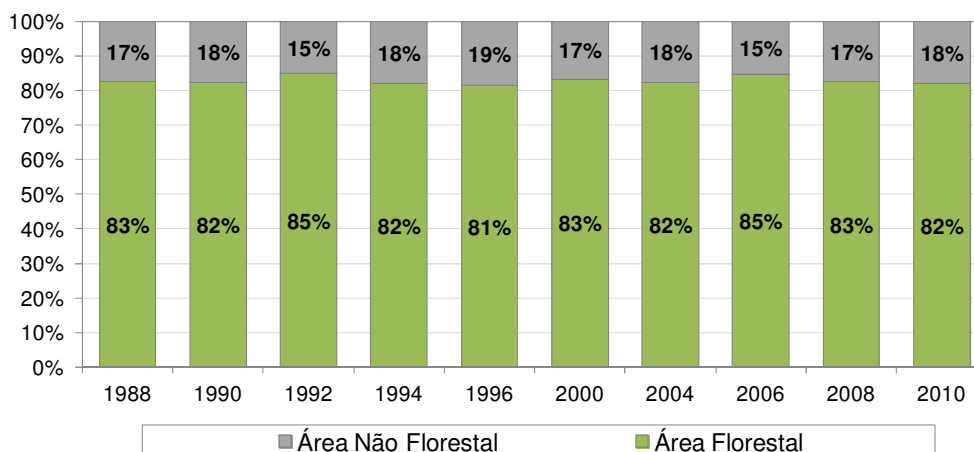


Figura 5-10 – Quantificação do Mapeamento de Cobertura Florestal na Bacia do Rio Cachoeira

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.

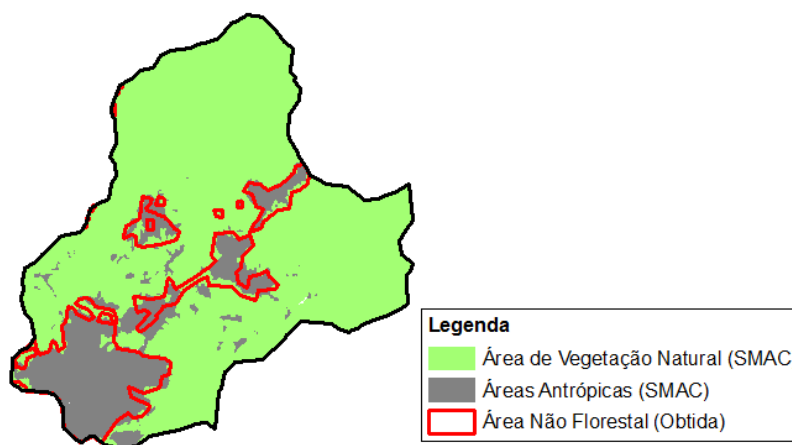


Figura 5-11 – Comparação dos Mapeamentos Temáticos de Cobertura Florestal - 2010

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

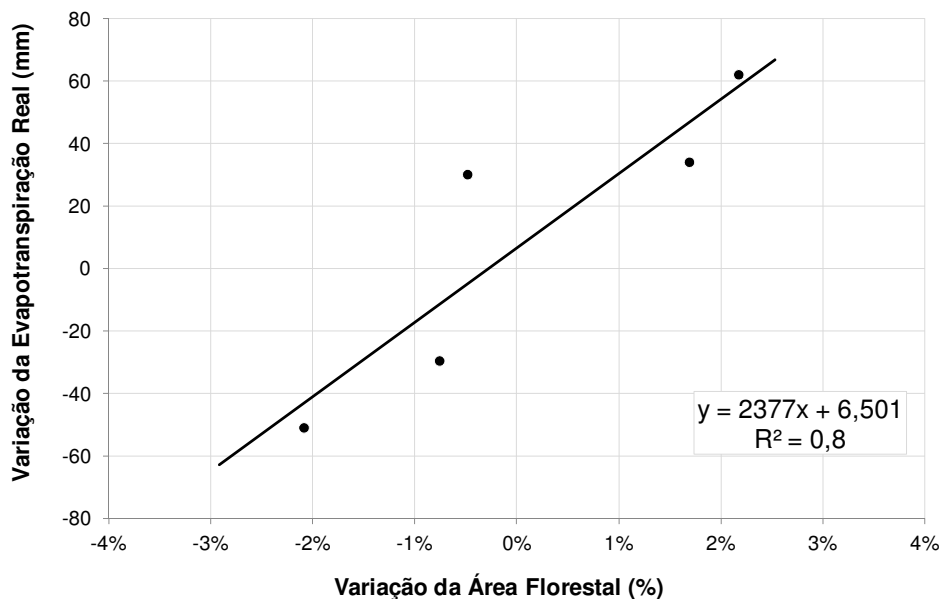


Figura 5-12 – Correlação entre a Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Evapotranspiração Real Estimada na Bacia do Rio Cachoeira

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

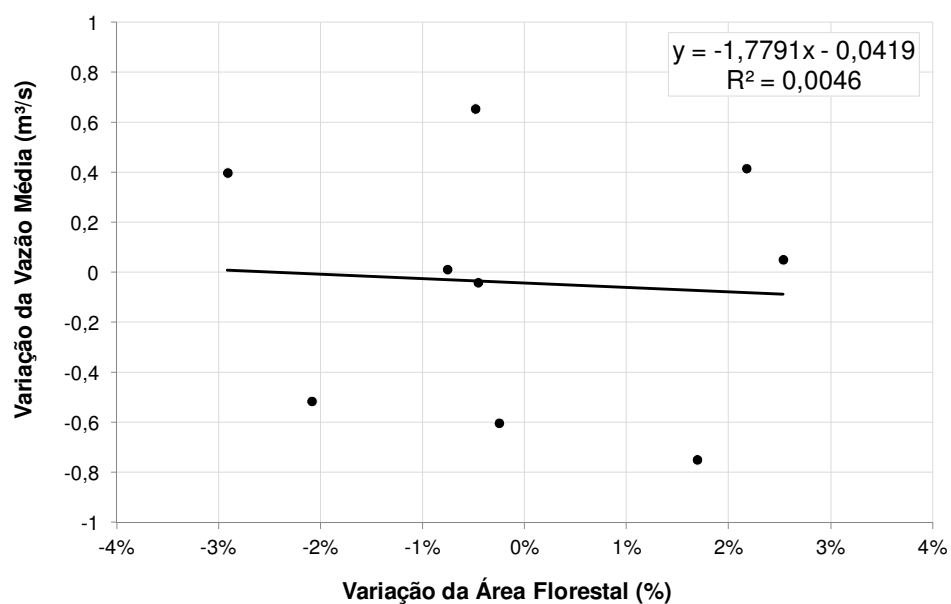


Figura 5-13 – Correlação entre a Variação da Porcentagem de Área Florestal e da Vazão Média na Bacia do Rio Cachoeira