

CAPÍTULO XVII

**ESTUDO HIDROLÓGICO DE CHEIAS DO RIO PEREQUÊ - AÇU
NO TRECHO URBANO DA CIDADE DE PARATY,
RIO DE JANEIRO, BRASIL**

ESTUDO HIDROLÓGICO DE CHEIAS DO RIO PEREQUÊ - AÇU NO TRECHO URBANO DA CIDADE DE PARATY, RIO DE JANEIRO, BRASIL

Fernanda Rocha Thomaz¹, Paulo Marcelo Lambert² e Friedrich Wilhelm Herms³

RESUMO

Esse trabalho apresenta os estudos hidrológicos realizados para o rio Perequê-Açu que atravessa a cidade de Paraty, localizada no litoral do estado do Rio de Janeiro. O objetivo dos estudos foi a determinação das vazões de cheia associadas a diferentes períodos de retorno para serem utilizadas no dimensionamento hidráulico do rio Perequê-Açu.

Para tal, foram utilizadas duas diferentes metodologias: na primeira, as vazões de cheia foram calculadas com a utilização de método de transformação de chuva em vazão, utilizando a equação de chuvas intensas da CPRM, selecionada a partir da análise dos estudos existentes na região.

Na segunda metodologia, as vazões de cheia foram determinadas através de ajuste de distribuição de probabilidades da série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica de Paraty.

As metodologias utilizadas apresentaram diferenças entre os resultados de cerca de 20%. Assim, de forma conservadora adotou-se como base para os estudos hidráulicos do rio Perequê-Açu no seu trecho urbano, para o tempo de recorrência de 20 anos, a vazão de 203,7 m³/s, determinada pela segunda metodologia.

ABSTRACT

This work presents the hydrologic study of the Perequê-Açu river which passes through Paraty, a city located at the seashore of Rio de Janeiro state.

The purpose of the study was determination of the flood discharge of river associated to different return periods to be used in the hydraulic design of Perequê-Açu river.

Two different methodologies were adopted: In the first one, the flood discharges were calculated using the rainfall runoff method data provided by the intense rainfall equation of CPRM, selected from the analysis of studies of the region. In the second one, the flood discharges were calculated using the probability distribution of a series of annual highest discharges provided by the Pataty flow measuring station.

The two methodologies achieved results about 20 percent different. According to these results, the conservatory one has been adopted as a basis to the hydraulic study of Perequê-Açu concerning to its urban area to a 20 year return period as determined by the second methodology.

1 – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Civil, Laboratório de Hidrologia - Bloco I - CT-COPPE/UFRJ - Ilha do Fundão – CEP: 21945-970 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - Caixa-postal: 68540. fer@hidro.ufrj.br

2 – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Engenharia Civil, Laboratório de Hidrologia - Bloco I - CT-COPPE/UFRJ - Ilha do Fundão – CEP: 21945-970 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - Caixa-postal: 68540. pm@hidro.ufrj.br

3 – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia, Departamento de Oceanografia Química, Rua São Francisco Xavier, 524, 4º andar - sala 4026 – Bloco E - CEP: 20550-013 - Rio de Janeiro, RJ – Brasil. fredwh@uerj.br

INTRODUÇÃO

O presente trabalho diz respeito ao estudo hidrológico de cheias do trecho urbano do rio Perequê-Açu e do canal da Jabaquara que atravessam a cidade sede do município de Paraty.

O município, com 925 km² de área e uma população de 37.533 habitantes, situa-se no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro. A cidade sede se localiza à beira-mar, na altitude média de 5 metros, e constitui um importante polo turístico do estado de Rio de Janeiro.



Figura 1 - Rio Perequê-Açu e canal Jabaquara no trecho urbano da cidade de Paraty

O Rio Perequê-Açu, principal curso d'água da região, tem sua nascente no Parque Nacional da Serra da Bocaina e desemboca no mar junto ao centro histórico da cidade. O canal Jabaquara, por sua vez, tem origem em uma bifurcação na margem esquerda do rio Perequê-Açu e um importante papel na partição das vazões de cheia, reduzindo os volumes afluentes ao trecho final do rio Perequê. A figura 1 ressalta o rio Perequê-Açu e seu defluente, o canal Jabaquara, no trecho urbano da cidade de Paraty.

No caso do rio Perequê-Açu, o trecho urbano tem aproximadamente 2575 metros, que se desenvolve a partir de sua foz na baía de Paraty para montante e, no caso do canal Jabaquara é considerada a sua extensão total de, aproximadamente, 1440 metros.

A vazão média do rio Perequê-Açu na foz é de cerca de 6 m³/s, com período de cheia entre os meses de dezembro a março e de estiagem entre junho e setembro.

LEVANTAMENTO DE DADOS E ESTUDOS EXISTENTES

Para elaboração dos estudos de cheias na bacia do rio Perequê-Açu foram reunidos dados pluviométricos e fluviométricos de estações localizadas na bacia ou em regiões próximas. Também foram levantados estudos de chuvas intensas existentes para fins de análise e utilização em modelo hidrológico do tipo chuva x vazão.

DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Os dados de precipitação pluviométrica de quatro estações localizadas na região litorânea sul do estado do Rio de Janeiro foram levantados no sistema de informações hidrológicas -Hidroweb, da Agência Nacional de Águas – ANA (ANA, 2012), e nas normais climatológicas do Instituto Nacional de

Meteorologia – INMET, para a estação de Ubatuba, São Paulo (INMET, 1992). A tabela I apresenta as características das estações pluviométricas levantadas

e a tabela II reúne as precipitações médias mensais e anuais destas estações, sendo as suas localizações mostradas na figura 2.

Tabela I - Estações Pluviométricas na Região de Interesse

Estação	Código da Estação	Órgão Responsável	Operação	Município	Período dos Dados
Paraty	02344007	ANA	CPRM*	Paraty	1962-2005
São Roque	02344008	ANA	CPRM*	Paraty	1967-2005
Patrimônio	02344006	ANA	CPRM*	Paraty	1967-2005
Ubatuba	83786	INMET	CPRM*	Ubatuba	1961-1990

* CPRM – Serviço Geológico do Brasil

Tabela II - Precipitações Médias Mensais e Anuais de Estações Pluviométricas na Região

Estação	Código da Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Paraty	02344007	248	209	221	144	75	51	57	54	113	155	174	224	1719
São Roque	02344008	305	258	285	197	99	62	67	69	158	208	225	291	2229
Patrimônio	02344006	291	235	243	194	124	92	90	80	155	180	228	264	2177
Ubatuba	83786	366	302	315	244	125	84	106	91	170	222	259	361	2645

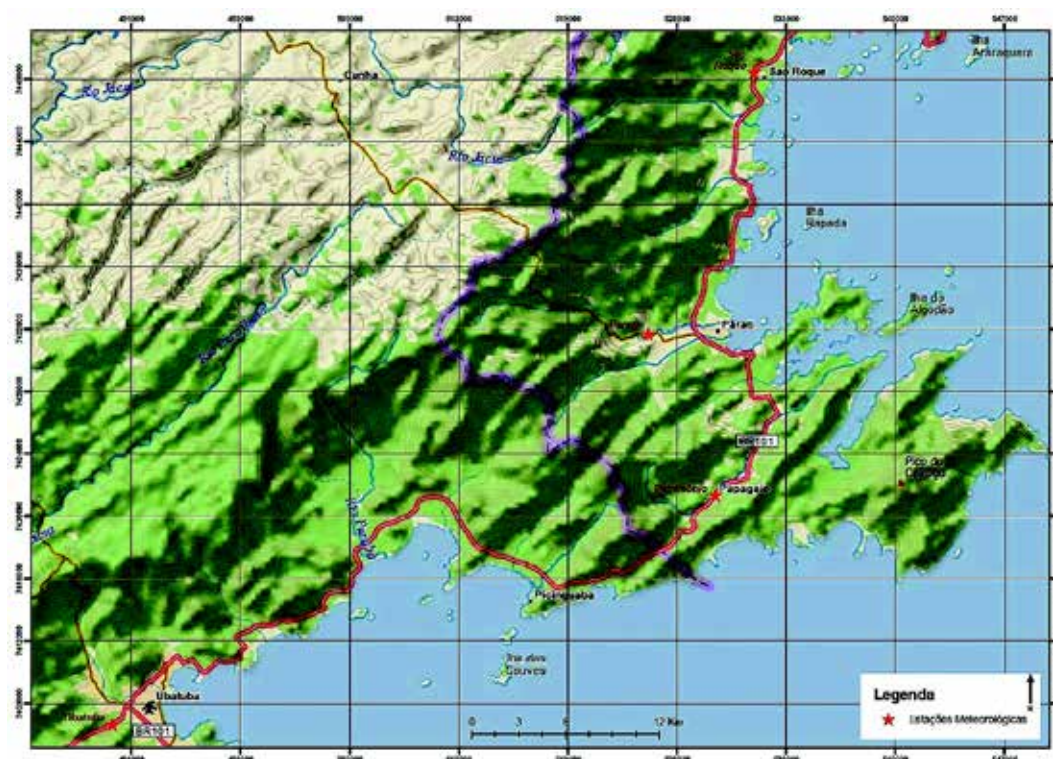


Figura 2 – Localização das Estações Pluviométricas na Região de Interesse

DADOS FLUVIOMÉTRICOS

Os dados do posto fluviométrico de Paraty, localizado no rio Perequê-Açu, foram levantados no

sistema de informações hidrológicas – Hidroweb, da Agência Nacional de Águas – ANA (ANA, 2012). A figura 3 apresenta a localização do posto na bacia e a Tabela III reúne as principais características da estação.

Tabela III - Características da Estação Fluviométrica de Paraty

Posto	Código da Estação	Rio	Área de Drenagem (km²)	Período disponível
Paraty	59380000	Perequê-Açu	79	1963-2004

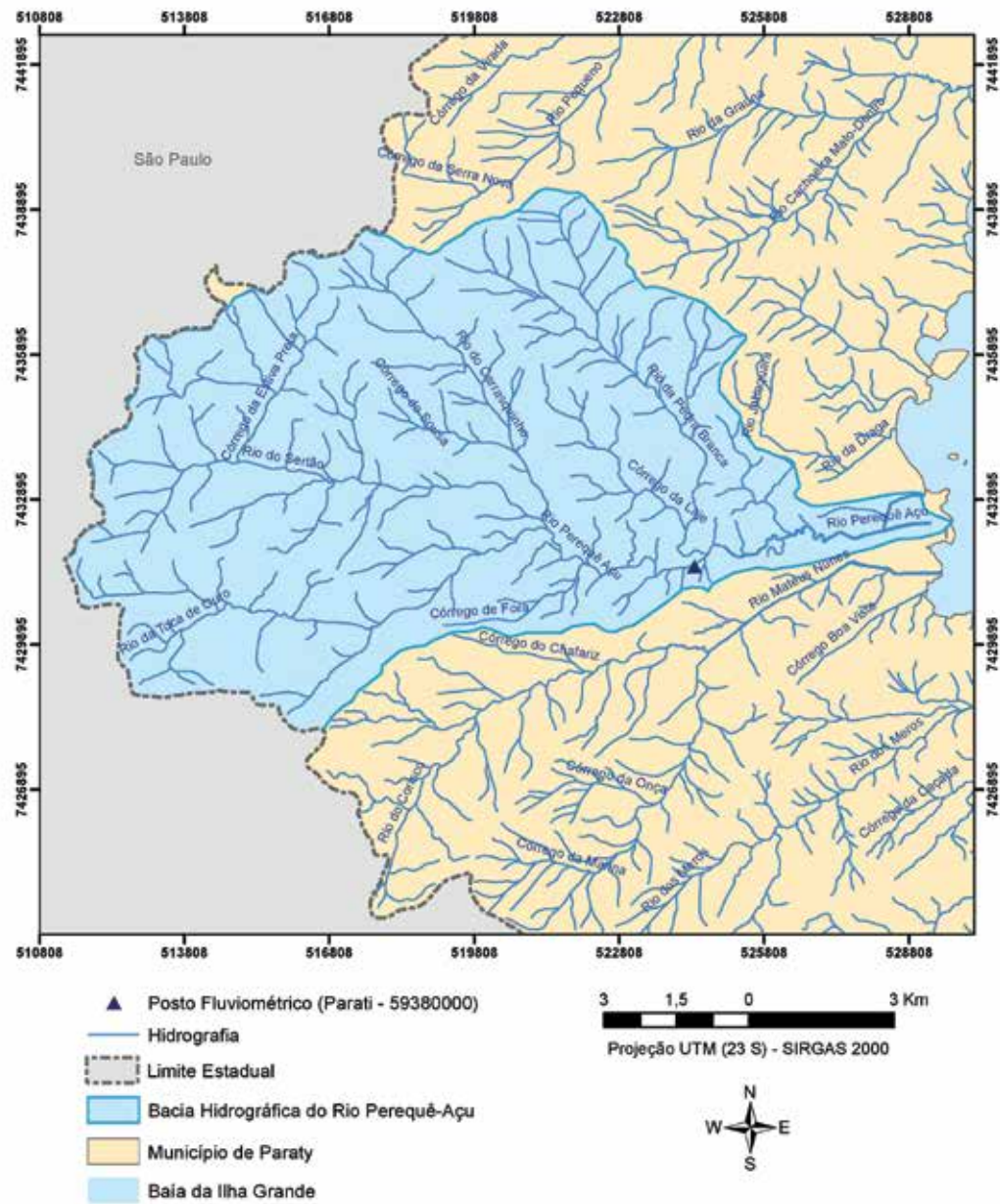


Figura 3 - Bacia do rio Perequê-Açu – Localização do Posto Fluviométrico de Paraty

ESTUDOS DE CHUVAS INTENSAS

Para análise das chuvas intensas no rio Perequê-Açu foram levantados estudos de chuvas intensas possíveis de serem empregados na região em estudo:

- Chuvas Intensas no Brasil, Otto Pfafstetter, Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS) – Ministério do Interior, 1957 (Pfafstetter, 1982).
- Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro, Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) – Ministério de Minas e Energia01 (CPRM, 2000).
- Equação de chuvas Intensas de estação no rio Perequê-Açu, definida na Dissertação de Mestrado de Sérgio Vieira Araújo (Araújo, 2011).

ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Os estudos hidrológicos apresentados a seguir foram elaborados com o objetivo de determinar as vazões de cheia no rio Perequê-Açu associadas a diversos tempos de retorno, uma vez que nenhuma informação hidrológica a respeito deste rio se encontra disponível na literatura. A metodologia utilizada nos cálculos compreendeu duas etapas distintas. Na primeira, foi realizada a análise das equações de chuvas intensas disponíveis e escolha daquela a ser utilizada no modelo hidrológico. No cálculo das vazões de cheia, segunda etapa, foi utilizado um modelo de transformação de chuva em vazão e foi ajustada também uma distribuição de probabilidades com dados da estação fluviométrica de Paraty (Tabela III).

ANÁLISE DAS EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS DISPONÍVEIS

CHUVAS INTENSAS NO BRASIL - OTTO PFAFSTETTER

O Engenheiro Otto Pfafstetter no estudo “Chuvas Intensas no Brasil” (Pfafstetter, 1982) ajustou para 98 estações pluviográficas e pluviométricas, pertencentes a rede do antigo Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET), equações de chuvas intensas para durações variando de 5 minutos a 48 horas.

Vale ressaltar que das estações pluviométricas apresentadas na Tabela 1, a estação de Ubatuba é a única

com equação de chuvas intensas definida no estudo do Otto Pfafstetter.

A equação de Ubatuba foi ajustada a partir de dados obtidos de 7,6 anos de operação do pluviógrafo e de 15,9 anos de pluviômetro.

As equações ajustadas têm a seguinte expressão geral (equação 1):

$$P = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^\gamma}} \cdot [at + b \cdot \log(1 + ct)] \quad \text{Equação 1}$$

onde:

P - precipitação máxima em mm;

T - tempo de recorrência em anos;

α e β - valores que dependem da duração da precipitação;

γ , a, b, c - valores constantes para cada posto.

Os valores γ , a, b, c, referentes à estação de Ubatuba, constam da tabela IV, enquanto que os valores de α e β , para a mesma estação, são apresentados na tabela V.

Tabela IV - Equação de Chuvas Intensas - Estação de Ubatuba

Valores de γ , a, b, c (Pfafstetter, 1982)

Parâmetro	Valor
γ	0,25
a	0,6
b	46,0
c	10,0

Tabela V - Equação de Chuvas Intensas - Estação de Ubatuba

Valores de α e β (Pfafstetter, 1982).

Duração (min)	α	B
5	0,108	0,04
15	0,122	0,16
30	0,138	0,16
60	0,156	0,16
120	0,166	0,16
240	0,174	0,16
480	0,176	0,16
960	0,174	0,16
1440	0,170	0,16
2880	0,166	0,16

A tabela VI reúne a curva Intensidade x Duração x Frequência, calculada para a estação de Ubatuba.

Tabela VI - Chuvas Intensas da Estação de Ubatuba: Curva IDF (Pfafstetter, 1982)

Duração (min)	Duração (hora)	I ₁₀ (mm/h)	I ₂₀ (mm/h)	I ₂₅ (mm/h)	I ₅₀ (mm/h)	I ₁₀₀ (mm/h)
5	0,083	197,1	213,4	218,8	236,1	254,3
15	0,25	164,1	182,1	187,8	205,4	223,0
30	0,5	122,0	136,9	141,7	156,7	172,1
60	1	85,5	97,1	100,9	113,0	125,6
120	2	55,9	64,0	66,6	75,1	84,1
240	4	35,2	40,4	42,2	47,9	53,9
480	8	21,4	24,6	25,7	29,2	32,9
840	14	14,1	16,2	16,9	19,2	21,6
1440	24	9,4	10,8	11,2	12,7	14,3

Obs: I_T = intensidade de chuva máxima para T anos de recorrência

ESTUDO DE REGIONALIZAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - CPRM

O estudo de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro foi elaborado pela CPRM (CPRM, 2000) a partir de dados de 44 estações pluviográficas distribuídas ao longo de todo o território estadual. Este estudo teve a finalidade de determinar curvas IDF regionais, válidas para regiões homogêneas previamente estabelecidas. A metodologia empregada no estabelecimento dessas curvas regionais compreendeu:

- Leituras de pluviogramas e obtenção de séries de duração parcial de alturas pluviométricas superiores a determinados valores de referência, para durações de 5, 10, 15, 30 e 45 min e de 1, 2, 3, 4, 8, 14 e 24 horas;
- Definição preliminar das regiões homogêneas;
- Análise de consistência de dados através da aplicação da estatística “medida de discordância” da estação em relação ao padrão regional, baseada em momentos-L;
- Verificação do grau de heterogeneidade regional através da comparação da variabilidade da razão dos momentos-L amostrais de uma estação com aquela esperada de uma região homogênea. Validação das regiões homogêneas;
- Seleção das distribuições de frequências regionais através do ajuste das distribuições Logística Generalizada, Generalizada de Valores Extremos, Generalizada de Pareto, Generalizada Normal e Pearson tipo III, estimando seus parâmetros a partir

dos momentos-L regionais. Aplicação do teste de aderência (ZDIST) para verificar o ajuste entre a distribuição candidata e os dados regionais;

- Definição da distribuição regional anual e dos quantis adimensionais para as durações “d” levantadas e período de retorno “T” desejados;
- Definição do “index-flood” através de modelo de regressão entre a intensidade média de uma determinada duração, a duração da precipitação e a precipitação média anual no local;
- Análise de frequência regional, através do método de regionalização da curva adimensional de frequências denominado utilizando momentos-L;

As equações IDF para cada região homogênea tem a seguinte expressão (equação 2):

$$\hat{i}_{T,d,j} = \bar{i}_d \times \mu_{T,d} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\hat{i}_{T,d,j}$ é a estimativa da intensidade de chuva, em mm/h, de duração d minutos, no local j, associado ao período de retorno T, em anos;

$\bar{i}_d$ index-flood de cada estação, estimado através de modelo de regressão de $\bar{i}_d$ com a duração d e a precipitação média anual;

$\mu_{T,d}$ representa os quantis adimensionais de frequência, válidos para cada região homogênea, associados a T e d.

Para a região homogênea 4, na qual se localiza a cidade de Paraty, o modelo de regressão resultante tem as seguintes expressões gerais (equações 3 e 4):

$$\bar{i}_d = 44,888 \times d^{-0,385} \times P_j^{0,244} \quad (\text{para } 5\text{min} < d < 1\text{h}) \quad \text{Equação 3}$$

$$\bar{i}_d = 81,432 \times d^{-0,771} \times P_j^{0,371} \quad (\text{para } 1\text{h} < d < 24\text{h}) \quad \text{Equação 4}$$

Onde P_j é a precipitação média anual, em mm, no local j, dentro da região homogênea.

Os quantis de precipitação adimensionais de frequência regionais anuais válidos para a região homogênea 4 são apresentados na tabela VII.

A precipitação média anual das estações localizadas no município de Paraty, apresentadas na tabela II, varia de 1719 a 2229 mm. Para cálculo das chuvas intensas na bacia do rio Perequê-Açu, a precipitação média anual foi considerada, de forma conservadora, igual a 2200 mm. A tabela VIII apresenta a curva intensidade-duração-frequência na bacia do rio Perequê-Açu.

Tabela VII - Quantis de precipitação adimensionais regionais anuais $\mu_{T,d}$ válidos para a região de Paraty (CPRM, 2000)

Duração (min)	Duração (horas)	Tempo de recorrência em anos						
		2	5	10	20	50	75	100
5	0,083	0,8819	1,0771	1,2151	1,3758	1,6449	1,7916	1,9083
10	0,167	0,8924	1,0661	1,1923	1,3417	1,5964	1,7371	1,8498
15	0,25	0,8914	1,0781	1,2053	1,3500	1,5868	1,7316	1,8135
30	0,50	0,8890	1,0801	1,2104	1,3587	1,6011	1,7310	1,8332
45	0,75	0,8829	1,0973	1,2328	1,3803	1,6103	1,7291	1,8209
60	1	0,8737	1,0988	1,2464	1,4104	1,6722	1,8097	1,9170
120	2	0,8691	1,1118	1,2636	1,4104	1,6722	1,8097	1,9170
180	3	0,8489	1,1165	1,2921	1,4875	1,7996	1,9637	2,0917
240	4	0,8485	1,1056	1,2830	1,4865	1,8219	2,0025	2,1453
480	8	0,8496	1,1118	1,2878	1,4862	1,8077	1,9785	2,1126
840	14	0,8579	1,1065	1,2729	1,4602	1,7630	1,9238	2,0498
1440	24	0,8603	1,1043	1,2675	1,4509	1,7473	1,9045	2,0277

Tabela VIII - Chuvas Intensas na Bacia do rio Perequê-Açu
Curva IDF (CPRM, 2000)

Duração (min)	Duração (hora)	I ₁₀ (mm/h)	I ₂₀ (mm/h)	I ₅₀ (mm/h)	I ₁₀₀ (mm/h)
5	0,083	192,0	217,3	259,8	301,5
15	0,25	124,7	139,7	164,2	187,7
30	0,5	95,9	107,7	126,9	145,3
60	1	75,1	85,0	100,7	115,5
120	2	44,6	50,4	59,4	67,6
240	4	26,5	30,8	37,7	44,4
480	8	15,6	18,0	21,9	25,6
840	14	10,0	11,5	13,9	16,1
1440	24	6,6	7,5	9,1	10,5

Obs: (1) I_T = intensidade de chuva máxima para T anos de recorrência

EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PARA PARATY - SÉRGIO VIEIRA DE ARAÚJO

A equação de chuvas intensas, ajustada na dissertação de mestrado de Sérgio Vieira de Araujo (Araujo, 2011), tem a expressão estabelecida pela equação 5:

$$i = \frac{5726,64 \cdot TR^{0,159}}{(t + 41)^{1,041}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

i intensidade de chuva em mm/h;

TR tempo de recorrência, em anos;

t duração em minutos.

A tabela IX apresenta as curvas intensidades duração frequência em Paraty para tempos de recorrência de 10, 20, 50 e 100 anos.

Tabela IX - Chuvas Intensas de Paraty - Curva IDF (Araujo, 2011)

Duração (min)	Duração (hora)	I ₁₀ (mm/h)	I ₂₀ (mm/h)	I ₅₀ (mm/h)	I ₁₀₀ (mm/h)
5	0,083	153,5	171,3	198,2	221,3
15	0,25	125,0	139,6	161,5	180,3
30	0,5	97,7	109,0	126,1	140,8
60	1	67,7	75,6	87,4	97,6
120	2	41,6	46,5	53,8	60,1
240	4	23,3	26,0	30,1	33,6
480	8	12,3	13,7	15,8	17,7
840	14	7,1	7,9	9,2	10,2
1440	24	4,1	4,6	5,3	6,0

Obs: (1) I_T = intensidade de chuva máxima para T anos de recorrência

ANÁLISE DOS ESTUDOS DISPONÍVEIS

Os valores de intensidades pluviométricas calculadas a partir das equações de chuvas intensas de estudos disponíveis na região deveriam guardar, em princípio, uma razoável consistência entre si. Entretanto, a não uniformidade das metodologias, dos tipos de dados, da

extensão dos históricos e dos períodos utilizados, dentre outros aspectos, pode determinar diferenças significativas entre os valores de intensidades pluviométricas.

Para análise das equações de chuvas intensas foram determinadas as curvas IDF para 20 anos de recorrência apresentada nas figuras 4 e 5.

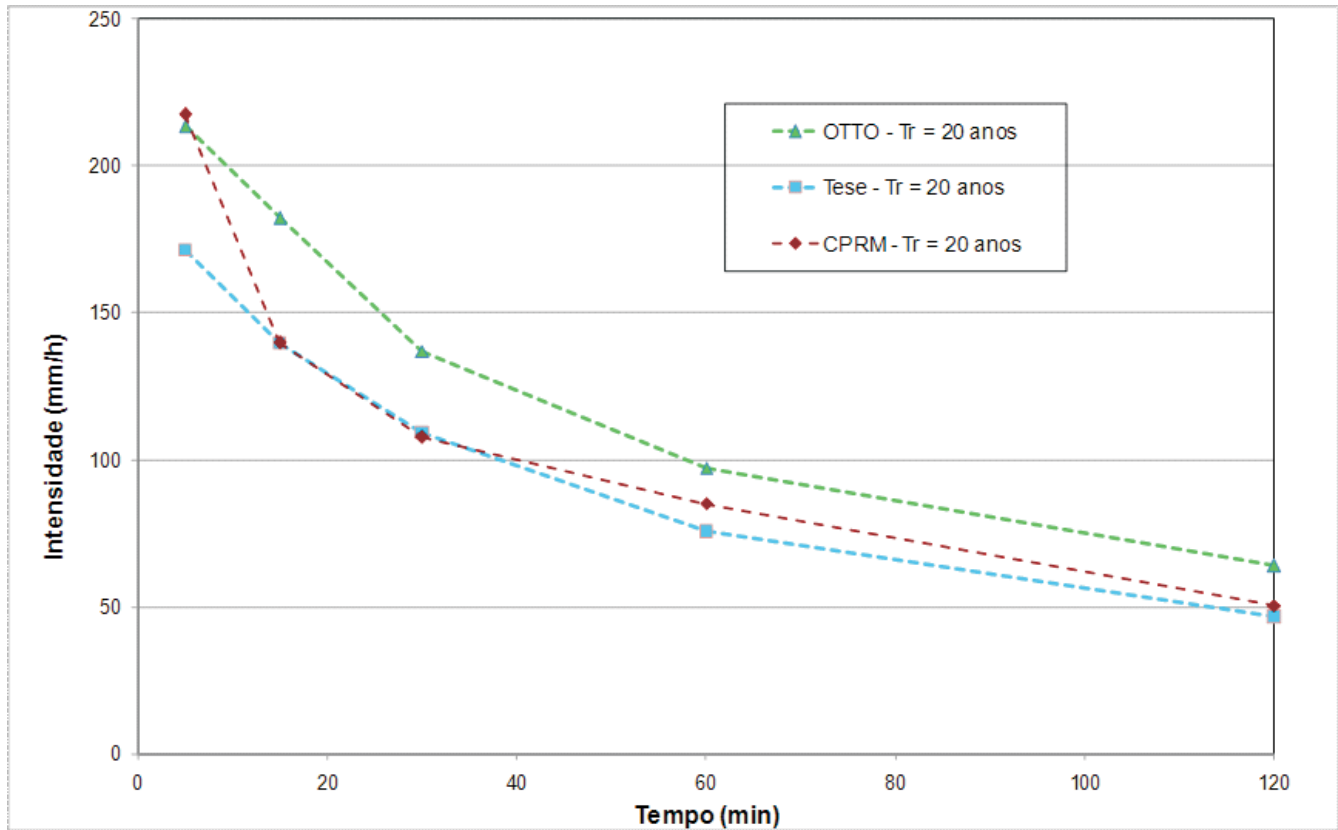


Figura 4 - Comparação de curvas IDF de estudos de chuvas intensas na região (tempo < 120 min)

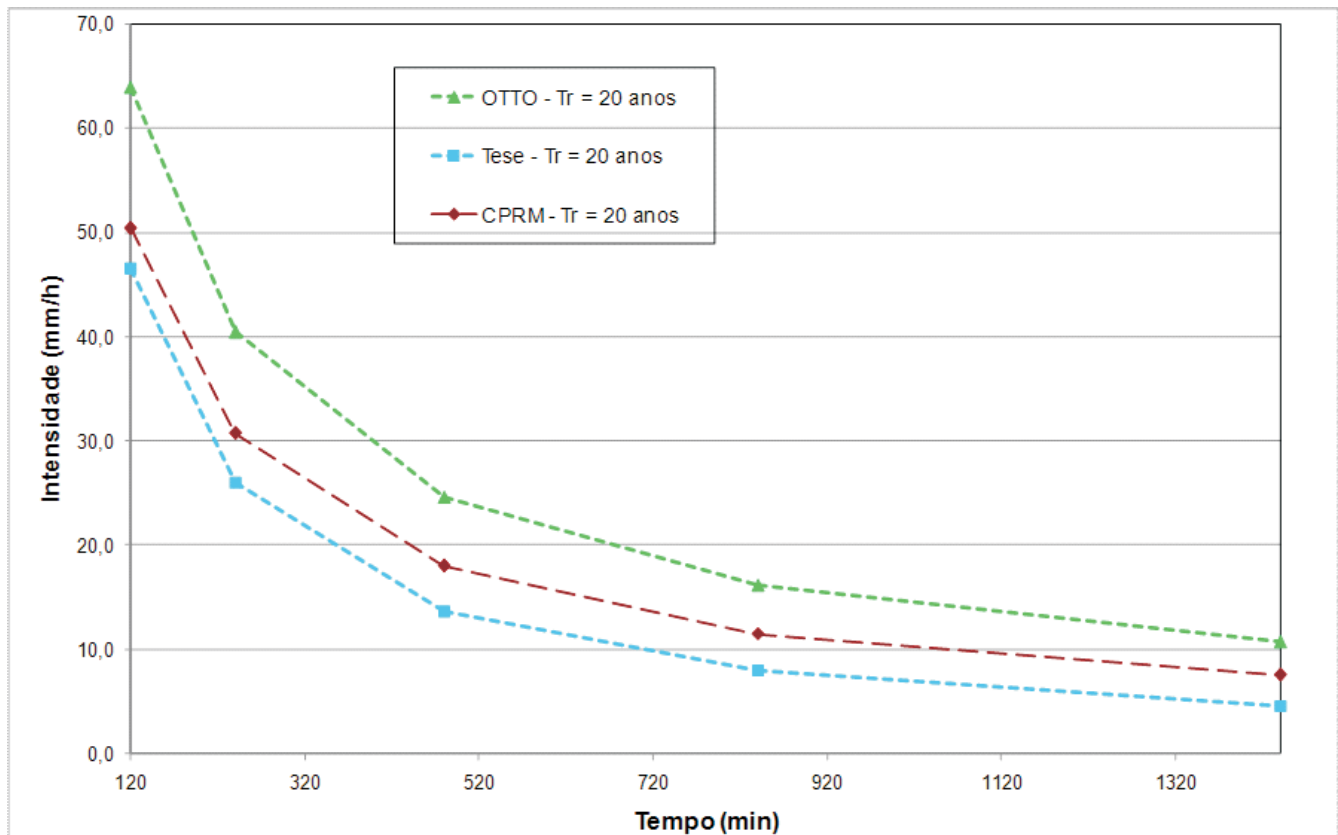


Figura 5 - Comparação de curvas IDF de estudos de chuvas intensas na região (tempo > 120 min)

Observa-se, nas figuras 3 e 4, que a equação de chuvas intensas ajustada para a estação de Ubatuba pelo Engenheiro Otto Pfafstetter, fornece valores de intensidades pluviométricas superiores aos valores da CPRM e de Sérgio Vieira de Araujo.

A tabela II mostra que as precipitações médias anuais em Ubatuba são superiores às observadas nas estações pluviométricas localizadas no município de Paraty. Pela análise da localização do município verifica-se que a bacia do rio Perequê-Açu drena para a baía de Paraty, e fica protegida das frentes frias por uma barreira orográfica. Já o município de Ubatuba recebe as frentes frias diretamente o que justifica os elevados índices pluviométricos em relação à Paraty.

Por este motivo, e considerando ainda que a equação de Ubatuba foi ajustada com base em um histórico muito curto, apenas 7,6 anos de observações, sua utilização foi descartada.

Assim, a equação de chuvas intensas estabelecida pela CPRM foi escolhida para aplicação no projeto em estudo.

DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES DE CHEIA

Para determinação das vazões de cheia na bacia do rio Perequê-Açu foram utilizadas duas metodologias diferentes. A primeira consistiu na utilização de método de transformação de chuva em vazão, no qual as vazões de pico dos hidrogramas de cheia são determinadas a partir da chuva de projeto¹, o que exige o conhecimento das chuvas intensas associadas a diversas probabilidades de ocorrência. Para aplicação desta metodologia foi utilizado o modelo Hidro-Flu desenvolvido pela COPPE/UFRJ

(Magalhães, et. al, 2005) que tem como principal característica a transformação da chuva na bacia em vazão no ponto de interesse.

A segunda metodologia utilizada consistiu na determinação das vazões de cheia através de ajuste de distribuição de probabilidades com os dados da estação fluviométrica de Paraty que possui uma série de cerca de 40 anos de observações.

A descrição das metodologias empregadas bem como os resultados encontrados, é apresentada nos itens a seguir.

VAZÕES DE CHEIA COM O MODELO HIDRO-FLU

DESCRIÇÃO DO MODELO

Para a modelagem hidrológica utilizou-se como ferramenta o Sistema Hidro-Flu, um programa computacional desenvolvido na COPPE/UFRJ que, entre múltiplas aplicações, pode servir exclusivamente como um modelo chuva-vazão do tipo concentrado.

No Hidro-Flu, o cálculo de um hidrograma a partir de um hietograma de projeto é dividido em quatro etapas principais:

- Caracterização da Bacia Hidrográfica;
- Hietograma de Projeto;
- Separação dos Escoamentos;
- Hidrograma de Projeto.

Essas etapas são representadas no esquema a seguir (figura 6) que descreve a sequência metodológica para cálculo das vazões de cheia em uma bacia hidrográfica.

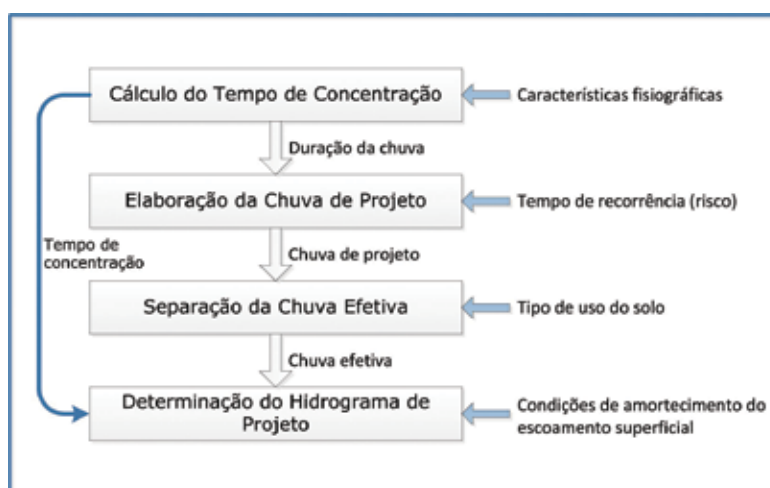


Figura 6 – Diagrama das etapas de cálculo de vazões do programa Hidro-Flu.

¹ A chuva de projeto é utilizada no dimensionamento de obras hidráulicas. É aquela que gera condições críticas de escoamento.

CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDRO-GRÁFICA

Esta etapa tem por objetivo a determinação do tempo de concentração da bacia, sendo necessários dados referentes às seguintes variáveis:

- Área de Drenagem da Bacia Hidrográfica, em km² (A);
- Extensão do Curso d'Água Principal, em km (L);
- Declividade do Curso d'Água Principal, em m/m (S);
- Desnível entre o ponto mais elevado e o exutório, em metros;

- Velocidade Média do Escoamento no Curso d'Água Principal, em m/s (v);
- Vazão de Base, em m³/s (Q_b);
- Coeficiente de Cobertura Vegetal (p);

A partir destes dados, o modelo determina o tempo de concentração da bacia hidrográfica utilizando equações empíricas disponíveis na literatura técnica, apresentadas na tabela X. Os resultados servem de apoio para a escolha do tempo de concentração que se mostrar mais apropriado ao caso em estudo.

Tabela X - Equações para cálculo do Tempo de Concentração - Hidro-Flu

Nome	Equação
Cinemática	$t_c = \sum \frac{L}{v}$
Dooge	$t_c = 21,88 \frac{A^{0,41}}{S^{0,385}}$
Kirpich	$t_c = 3,99 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$
George Ribeiro	$t_c = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p)(100S)^{0,04}}$

HIETOGRAMA DE PROJETO

A chuva de projeto a ser utilizada na simulação poderá ser calculada a partir de equações de chuvas intensas (*Equação do tipo Otto Pfafstetter* ou *Equação Clássica de Chuvas Intensas*) ou poderá ser utilizada uma sequência de chuva qualquer, como em casos de simulação de eventos já ocorridos, requerendo apenas a entrada direta dos valores de precipitação.

Nesta mesma etapa, deve-se definir também como será feita a *Distribuição Temporal da Chuva*. O sistema possui duas opções para esta distribuição:

- **Método do Bureau of Reclamation:** Cada temporal é dividido em uma sequência de blocos de chuva de forma que o mais intenso é colocado na posição central, e os demais são colocados alternadamente à direita e à esquerda.
- **Chuva Constante no Tempo:** Para a forma de chuva constante é feita uma média das precipitações geradas para cada intervalo de tempo por uma das equações, e adota-se esta média como a precipitação por toda a sua duração.

Com relação à distribuição espacial da chuva na bacia, o usuário pode utilizar a opção de redução do volume de chuva gerada em função da área de drenagem da bacia. O sistema faz essa redução baseada no cálculo do coeficiente de redução, através de uma equação ajustada para algumas bacias de médio porte. A equação apresenta-se da seguinte forma onde A corresponde a área de drenagem:

SEPARAÇÃO DOS ESCOAMENTOS

$$c = -0,0915 \times \ln(A) + 1,1894 \quad \text{Equação 6}$$

O programa Hidro-Flu possui três métodos implementados, que manipulam parâmetros dos principais fenômenos hidrológicos atuantes na separação do escoamento superficial em bacias de pequeno e médio porte: *Método Racional*, *Método dos Índices* e *Método do Soil Conservation Service (SCS)*, sendo o último utilizado no presente estudo.

O método do SCS tem como premissa a razão entre o volume infiltrado e a capacidade de infiltração como sendo diretamente proporcional à razão entre a chuva excedente e a precipitação total. Matematicamente, esta premissa pode ser expressa por:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad \text{Equação 7}$$

$$\text{Sendo:} \quad I_a = k \times S \quad S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Onde:

P_e – Chuva excedente;

P – Chuva;

I_a – Abstração Inicial;

S – Armazenamento no Solo.

O coeficiente k expressa uma porcentagem do armazenamento e o CN, que pode variar de 0 a 100, representa as características do solo e do uso da terra. As tabelas XI e XII apresentam valores do CN para bacias rurais e urbanas, de acordo com os tipos de solo e condições de umidade, listados a seguir, para diferentes padrões de uso do solo. A tabela XIII apresenta correções nos valores de CN para outras condições iniciais de umidade.

TIPOS DE SOLO

Solo A: solos que produzem baixo escoamento

superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com silte e argila.

Solo B: solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.

Solo C: solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila e pouco profundo.

Solo D: solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Tabela XI - Valores do CN para Bacias Hidrográficas Rurais

Uso do Solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações Regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantação de Cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	84
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curva de nível	47	67	81	88
	Normais, em curva de nível	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	79
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	93
	Normais	36	60	73	79
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras / Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

CONDIÇÕES DE UMIDADE

AMC I: situação em que os solos estão secos. Na estação de crescimento, a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 36 mm e em outro período, menor que 13 mm.

AMC II: situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo.

AMC III: situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. No período de crescimento, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores, são menores que 53mm e no outro maior que 28 mm.

Tabela XII - Valores do CN para Bacias Hidrográficas Urbanas

Uso do Solo	Superfície		A	B	C	D
Zonas cultivadas	Sem conservação do solo		72	81	88	91
	Com conservação do solo		62	71	78	81
Pastagens ou terrenos baldios	Em más condições		68	79	86	89
	Em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições			30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	Cobertura ruim		45	66	77	83
	Cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, boas condições	Com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80
	Com relva de 50% a 75% da área		49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios			89	92	94	95
Zonas industriais			81	88	91	93
Zonas residenciais	Área dos lotes	Percentual médio de área impermeável				
	< 500 m ²	65%	77	85	90	92
	1000 m ²	38%	61	75	83	87
	1300 m ²	30%	57	72	81	86
	2000 m ²	25%	54	70	80	85
	4000 m ²	20%	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.			98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
	Paralelepípedos		76	85	89	91
	Terra		72	82	87	89

Tabela XIII - Correções de CN para outras condições iniciais de umidade

Valores Médios	Valores Corrigidos AMC I	Valores Corrigidos AMC III
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	22
5	2	13

HIDROGRAMA DE PROJETO

A última etapa consiste na transformação da chuva excedente em um hidrograma de projeto. No programa Hidro-Flu esta etapa é executada através da aplicação do método de Hidrograma Unitário Sintético (HUS) que pode ser interpretado como uma composição entre o Hidrograma Triangular do Método Racional adaptado para chuvas complexas e o Hidrograma Unitário Sintético do SCS.

Como o Hidrograma Triangular do Método Racional superestima a vazão de pico, o programa acrescenta a este uma equação que representa a passagem por um reservatório linear, promovendo assim um amortecimento segundo um coeficiente de depleção (k), calibrado automaticamente para ajustar a vazão de pico à vazão de pico do método do SCS. Este procedimento não só corrige as vazões de projeto, como também reflete

o amortecimento do escoamento superficial decorrente do fluxo e do armazenamento deste sobre a superfície da bacia e na calha fluvial.

Esse amortecimento é feito utilizando-se a Equação da Continuidade aplicada a um volume de controle, dada por:

$$I - O = \frac{dS}{dt}$$

E o Princípio do Reservatório Linear:

$$S = KO$$

Onde:

I – vazão de entrada no reservatório;

O – vazão de saída do reservatório;

S – armazenamento no reservatório;

K – coeficiente de depleção do reservatório linear.

A equação da continuidade é resolvida através do Método das Diferenças Finitas, considerando um esquema explícito e progressivo no tempo, resultando em:

$$O^{t+1} = \left(\frac{\Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) I^{t+1} + \left(\frac{\Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) I^t + \left(\frac{2 - \Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) O^t$$

Assim, o reservatório linear promove o amortecimento do hidrograma e tem seu funcionamento definido pelo valor do *Coefficiente de Depleção*. De fato, a atuação

do reservatório linear é dependente tanto da relação $\Delta t/K$ quanto do próprio Δt . Este parâmetro pode ser definido manualmente ou calibrado automaticamente pelo sistema.

Na etapa de calibração automática deste parâmetro é utilizado um procedimento baseado no Hidrograma Unitário Triangular (HUT) do SCS. Neste método a recessão apresenta duração igual ao produto da ascensão por um Coeficiente Beta (β), usualmente igual a 1,67. A tabela XIV apresenta alguns valores típicos para β .

Tabela XIV - Valores típicos para o coeficiente β (Wanielista *et al.*, 1997)

Descrição da Bacia	Coeficiente Beta	Razão de Amortecimento
Fórmula do Método Racional	1,00	1,00
Área Urbana, alta declividade	1,25	0,89
Valor típico SCS	1,67	0,75
Ocupação mista (urbana e rural)	2,25	0,62
Área rural, alta declividade	3,33	0,46
Área rural, declividade suave	5,50	0,31
Área rural, declividade muito baixa	12,00	0,15

Uma descrição mais detalhada do programa pode ser vista no artigo “Sistema Hidro-Flu para apoio a projetos de drenagem” (MAGALHÃES *et al.*, 2005) e no manual do programa.

APLICAÇÃO DO MODELO HIDRO-FLU

Na modelagem hidrológica da bacia do rio Perequê-açu, foram adotados os seguintes dados e critérios para o cálculo das vazões de enchente:

- Tempo de recorrência igual a 20 anos;
- Tempo de duração da precipitação igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica;

- Tempo de concentração calculado pela equação de *Kirpich*, dividindo-se o rio principal em dois trechos com declividades distintas, de acordo com a tabela a seguir (Tabela XV).
- Separação da precipitação efetiva através do método SCS;
- Distribuição temporal da chuva através do Método do Bureau of Reclamation;
- Distribuição espacial da chuva na bacia em função da área de drenagem da bacia;
- Características dos solos de cada bacia, uso e forma de ocupação, representadas pela curva número (Curve Number do SCS), considerando um valor de CN

Tabela XV – Tempo de Concentração do rio Perequê-Açu, Paraty, RJ

Trecho	Extensão (m)	Declividade (m/m)	Tempo de concentração (min)
Foz - 9,37 km	9,37	0,0043	182,61
9,37 km – 23,34	13,97	0,1074	71,7

- igual a 70 em função das características da bacia;
- Chuvas intensas obtidas pelo estudo de regionalização elaborado pela CPRM.
 - Os dados de entrada e de saída do Sistema Hidroflu, considerando os critérios e dados utilizados, são apresentados na tabela XVI que também

reúne as vazões de cheia associadas a 20 anos de recorrência. A figura 7 apresenta o hidrograma de vazões.

Tabela XVI - Modelagem Hidrológica do rio Perequê-Açu na Foz

Dados de Entrada	
Área da Bacia	111,4
Tempo de Concentração	254,31
Tempo de Duração da Chuva	250 min
CN – Curva Número	70
Coeficiente K	0,2
Coeficiente de Depleção	5750s
Coeficiente Beta	1,67
Tempo de Recorrência	20 anos
Dados de Saída	
Tempo de Base do Hidrograma	17h 50min
Vazão de Pico do Hidrograma	171,45 m ³ /s
Tempo da Vazão de Pico	6h 20min

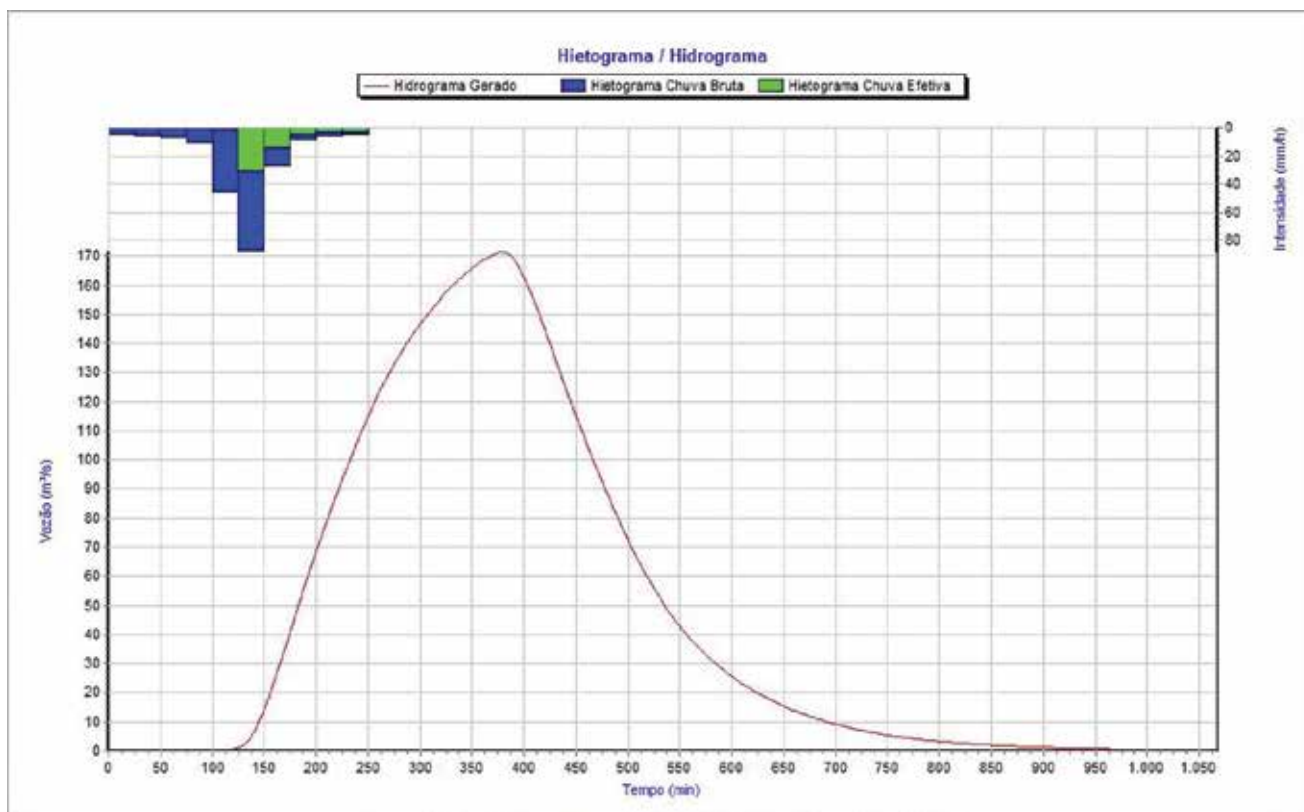


Figura 7 - Hidrograma de cheia do rio Perequê-Açu na Foz com TR = 20 anos

VAZÕES DE CHEIA COM O POSTO FLU- VIOMÉTRICO DE PARATY

A série de vazões médias diárias máximas anuais do posto de Paraty no período 1963 a 2004 é apresentada na

tabela XVII, que reúne também as estatísticas desta série: média ($\bar{x}$), desvio padrão (s), coeficiente de variação e assimetria (g).

Tabela XVII - Séries de Vazões Médias Diárias Máximas Anuais Observadas e Estatísticas
Estação de Paraty

Ano Hidrológico	Vazões Máximas (m³/s)	Ano Hidrológico	Vazões Máximas (m³/s)
1963	114	1984	42,9
1964	33,3	1985	62,3
1965	33,8	1986	36,6
1966	40,5	1987	35,5
1967	-	1988	47,9
1968	44,8	1989	28,2
1969	54,5	1990	25,8
1970	51,1	1991	27,2
1971	79,5	1992	89,7
1972	25,8	1993	21
1973	94	1994	66
1974	21,8	1995	20,1
1975	47,9	1996	47,9
1976	40,5	1997	18,9
1977	31,2	1998	27,7
1978	21,2	1999	18,2
1979	46	2000	16,6
1980	32,3	2001	18,9
1981	24	2002	54,8
1982	74,5	2003	42,2
1983	27,7	2004	19,5
Nº Eventos		41	
Máximo (m³/s)		114,0	
Média (m³/s)		41,6	
Mínimo (m³/s)		16,6	
Desvio Padrão		22,8	
Coeficiente de Variação		0,55	
Assimetria		1,394	
Distribuição		Gumbel	

Após a definição das séries de vazões máximas anuais, foram ajustadas as distribuições de Gumbel e Exponencial de dois parâmetros, utilizando-se o método dos momentos. Para seleção da distribuição de probabilidades a ser empregada, foi considerada a recomendação das “Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas” (ELETROBRÁS, 2000), que indica a utilização da distribuição de Gumbel

para séries com assimetria inferior a 1,5 e Exponencial com 2 Parâmetros para assimetrias superiores. Para a distribuição de Gumbel foram consideradas as seguintes equações:

$$x(T) = \mu - \alpha \left[\ln \left[-\ln \left(\frac{T-1}{T} \right) \right] \right] \quad \text{Equação 8}$$

Onde α e μ são parâmetros a estimar, representados por:

$$\alpha = 0,78s$$

$$\mu = \bar{x} - 0,577\alpha$$

Para a distribuição Exponencial de 2 Parâmetros têm-se as equações:

$$x(T) = \mu - \frac{\ln(1/T)}{\alpha}$$

Onde α e μ são parâmetros a estimar, dados por:

$$\alpha = \frac{1}{s} \quad \mu = \bar{x} - s$$

Como a assimetria das séries de vazões máximas anuais das duas estações é inferior a 1,5, foi utilizada a distribuição de Gumbel, de acordo com a recomendação dos estudos da Eletrobrás.

Para avaliação dos graus de aderência obtidos entre a distribuição e as amostras, foi calculada a estatística $D2 = \max|F_x(x) - \hat{F}_x(x)|$ para o teste de Kolmogorov - Smirnov, que reflete o maior desvio observado entre a probabilidade de ocorrência de cada valor amostral, calculada a partir da distribuição ajustada, e a probabilidade empírica do elemento dentro da própria amostra. A aplicação do teste, resumido na tabela XVIII, indicou que, para a série de vazões analisadas, a hipótese de adequação de ajuste ($D2 < D2$ crítico) é aceita para um nível de significância de 5 %.

Tabela XVIII - Ajuste distribuição de probabilidades Teste Kolmogorov - Smirnov para a série de máximos anuais Rio Perequê-Açu na Estação de Paraty

Nº Eventos	41
D2 Crítico	0,21
$D2 = \max F_x(x) - \hat{F}_x(x) $	0,09

Na tabela XIX são apresentadas as vazões máximas anuais associadas a diversas recorrências, calculadas para o rio Perequê-Açu na estação de Paraty.

Visto que as vazões de cheia podem apresentar flutuações em questões de horas ou até minutos, principalmente em bacias hidrográficas pequenas, foi utilizado o critério de Füller para determinação da vazão máxima instantânea, que apresenta a

seguinte expressão:

$$Q_{inst} = Q \cdot \left(1 + \frac{2,66}{AD^{0,3}} \right) \quad \text{Equação 9}$$

Onde, AD é área de drenagem controlada pela estação de Paraty em km².

Tabela XIX - Vazões máximas anuais e máximas instantâneas associadas a diversas recorrências Rio Perequê-Açu na Estação de Paraty

Tempo de Recorrência (anos)	Vazões Máximas Anuais (m ³ /s)	Vazões Máximas Instantâneas (m ³ /s)
5	58	99,6
10	71	122,5
20	84	144,5
25	88	151,5
50	101	172,9
100	113	194,2
150	120	206,7
200	125	215,5
300	133	227,9
500	142	243,5
1000	154	264,6
5000	183	313,8
10000	195	334,9

A tabela XIX reúne as vazões máximas instantâneas calculadas pelo critério de Füller.

As vazões máximas anuais e máximas instantâneas na foz do rio Perequê-Açu, para diversos tempos de retorno, foram determinadas através de relação de áreas

$$Q_{Foz} = Q_{Paraty} \frac{A_{Foz}}{A_{Paraty}} \quad \text{Equação 10}$$

de drenagem, tendo como base o posto de Paraty, de acordo com a seguinte expressão:

Onde:

A_{Foz} – área de drenagem na foz do rio Perequê-Açu, igual a 111,4km²;

A_{Paraty} – área de drenagem no posto fluviométrico de Paraty, igual a 79 km².

As vazões resultantes são apresentadas na tabela XX.

Tabela XX - Rio Perequê-Açu na foz
Vazões Máximas Anuais e Máximas Instantâneas Associadas a Diversas Recorrências

Tempo de Recorrência (anos)	Vazões Máximas Anuais (m ³ /s)	Vazões Máximas Instantâneas (m ³ /s)
5	81,8	140,5
10	100,6	172,8
20	118,7	203,7
25	124,4	213,6
50	142,0	243,8
100	159,5	273,9
150	169,7	291,4
200	176,9	303,8
300	187,1	321,3
500	199,9	343,3
1000	217,3	373,2
5000	257,7	442,5
10000	275,0	472,3

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As metodologias utilizadas para determinação das vazões de cheia apresentaram diferenças entre os resultados de cerca de 20%. Assim, de forma conservadora adotou-

se como base para os estudos hidráulicos do rio Perequê-Açu no seu trecho urbano, para o tempo de recorrência de 20 anos, a vazão de 203,7 m³/s, determinada através de ajuste de distribuição de probabilidades com os dados da estação de Paraty.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - Agencia Nacional de Águas, Sistema de Informações Hidrológicas, <http://hidroweb.ana.gov.br>. Brasília, 2012.
- ARAUJO, S. B. 2011 *Sistema Integrado de Engenharia Ambiental no Controle de Inundações – Estudo de Caso: Bacia do Rio Perequê-Açú - Paraty R.J.* Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental – PEA. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.
- DAVIS, E.G. & NAGHETTINI, M.G. (orgs). 2000. Estudo de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro. Organizado por Elisabeth Guelman Davis e Mauro Cunha Naghettini. Brasília: CPRM, 2ª edição. 50pp.
- ELETROBRÁS. 2000. *Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Ministério das Minas e Energia, Brasília,
- INMET. *Normais Climatológicas do Brasil*. 1961-1990. Brasília. 1992.
- MAGALHÃES, L.P.C.; MAGALHÃES, P.C.; MASCARENHAS, F.C.; MIGUEZ, M.G.; COLONESE, B.L. & BASTOS, E.T. 2005. Sistema HIDRO-FLU para apoio a projetos de drenagem. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, João Pessoa, 2005.
- PFAFSTETTER, O. 1982. Chuvas Intensas no Brasil. DNOS, Rio de Janeiro, 1982.

Impressão e Acabamento: *Corbã Editora Artes Gráfica Ltda.*
Tels.: (21) 2573-7342 / 2573-8602
Capa: triplex 250 g / Miolo: couchet brilho 115 g / Tipologia: Adobe Garamond