

MÓDULO III PROJETO EXECUTIVO DA BARRAGEM TRAIRI

VOLUME 1 – ESTUDOS BÁSICOS

TOMO 2 – ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Rev.	Data	Descrição	Por	Ver.	Apr.	Aut.
00	Nov/01	Apresentação – Edição Preliminar	CONSÓRCIO	TAC	NKT	NKT
a	Fev/02	Complementações segundo recomendação do Painel de Segurança	CONSÓRCIO	TAD	NKT	NKT
b	Fev/02	Apresentação – Edição Definitiva	CONSÓRCIO	TAD	NKT	NKT

ÍNDICE

ÍNDICE

<u>APRESENTAÇÃO</u>	5
<u>1 - INTRODUÇÃO</u>	8
<u>2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO</u>	13
<u>3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA HIDROGRÁFICA</u>	16
<u>3.1 - ÍNDICES DE FORMA DA BACIA</u>	17
<u>3.2 - SOLOS E COBERTURA VEGETAL</u>	18
<u>4 - ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS</u>	21
<u>4.1 - TEMPERATURA</u>	22
<u>4.2 - UMIDADE RELATIVA</u>	24
<u>4.3 - INSOLAÇÃO MÉDIA</u>	25
<u>4.4 - VENTOS</u>	25
<u>4.5 - EVAPORAÇÃO MÉDIA</u>	26
<u>4.6 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO</u>	27
<u>4.7 - BALANÇO HÍDRICO</u>	28
<u>4.8 - CLASSIFICAÇÃO DO CLIMA</u>	29
<u>4.8.1 - Classificação segundo Köeppen</u>	29
<u>4.8.2 - Classificação Segundo Thornthwaite</u>	30
<u>5 - ESTUDOS PLUVIOMÉTRICOS</u>	31
<u>5.1 - DADOS UTILIZADOS</u>	32
<u>5.2 - CARACTERIZAÇÃO DO REGIME PLUVIOMÉTRICO</u>	33
<u>5.2.1 - Nível Anual</u>	33
<u>5.2.2 - Nível Mensal</u>	35
<u>5.2.3 - Nível Diário</u>	35
<u>5.2.4 - Chuvas Intensas</u>	36
<u>6 - ESTUDOS DE CHEIAS</u>	39

6.1 - INTRODUÇÃO	40
6.2 - METODOLOGIA	40
6.2.1 - Precipitação	41
6.2.2 - Precipitação Efetiva para aplicação do HEC-1	44
6.2.3 - Hidrograma Unitário - SCS	46
6.2.4 - Hidrograma Triangular	48
7 - CURVAS DE REGULAÇÃO DO RESERVATÓRIO	50
7.1 - INTRODUÇÃO	51
7.2 - METODOLOGIA	51
7.2.1 - Solução Direta da Equação do Balanço Hídrico	51
7.2.2 - O Diagrama Triangular de Regularização	54
7.3 - RESULTADOS	54
8 - DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO	58
8.1 - INTRODUÇÃO	59
8.2 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS	59
8.3 - ANÁLISE ECONÔMICA	59
8.4 - ESCOLHA DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO – ANÁLISE HIDROLÓGICO-ECONÔMICA	60
9 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO	61
9.1 - PROPAGAÇÃO DA CHEIA NO RESERVATÓRIO	62
9.2 - RESULTADOS	63
10 - ESTUDOS ADICIONAIS	66
10.1 - INTRODUÇÃO	67
10.2 - PROBABILIDADES DE ENCHIMENTO E Esvaziamento - EQUILÍBRIO ..	67
10.3 - ASSOREAMENTO DO AÇUDE TRAIRI	68

APRESENTAÇÃO

APRESENTAÇÃO

Os serviços executados pelo Consórcio JP ENGENHARIA – AGUASOLOS – ESC/TE, no âmbito do Contrato nº 005/PROGERIRH-PILOTO/CE/SRH/2001, assinado em 22/03/2001 com a Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH-CE), tem como objeto a Elaboração dos Estudos de Viabilidade Técnica, Ambientais e Econômicas, EIAS-RIMAS, Projetos Executivos, Levantamentos Cadastrais e Planos de Reassentamentos de Populações, Manuais de Operação e Manutenção e Avaliações Financeira e Econômica, referentes às Barragens GAMELEIRA, TRAIRI, JENIPAPEIRO, MARANGUAPE I e MARANGUAPE II e Aduadoras de ITAPIPOCA, TRAIRI, IPAUMIRIM/BAIXIO/UMARI e MARANGUAPE/SAPUPARA/URUCARÁ/LADEIRA GRANDE.

Os estudos desenvolvidos, em atendimento aos Termos de Referência, são constituídos por atividades multidisciplinares que permitem a elaboração de relatórios específicos organizados em Módulos, Volumes e Tomos. As partes e tomos que compõem o acervo do contrato são os apresentados na seqüência:

Módulo I – Estudos de Alternativas de Localização das Barragens e Aduadoras

VOLUME I – Estudo de Alternativas e Opções para a Localização dos Eixos Barráveis e Aduadoras

Módulo II – Estudos dos Impactos no Meio Ambiente

VOLUME I – Estudos Básicos e Diagnóstico

Tomo 1 – Estudos Básicos

Tomo 2 – Diagnóstico Ambiental

VOLUME II – EIA/RIMA

Tomo 1 – Relatório Preliminar dos Estudos Ambientais

Tomo 2 – Relatório Final EIA/RIMA

Módulo III – Projeto Executivo das Barragens

VOLUME I – Estudos Básicos

Tomo 1 – Relatório Geral

Tomo 2 – Estudos Hidrológicos

Tomo 3 – Estudos Cartográficos

Tomo 4 – Estudos Topográficos

Tomo 5 – Estudos Geológicos e Geotécnicos

VOLUME II – Anteprojeto

Tomo 1 – Relatório de Concepção Geral

Tomo 2 – Plantas

VOLUME III – Detalhamento do Projeto Executivo

Tomo 1 – Memorial Descritivo do Projeto

Tomo 2 – Memória de Cálculo

Tomo 3 – Especificações Técnicas

Tomo 4 – Quantitativos e Orçamentos

Tomo 5 – Síntese

Tomo 6 – Plantas

Módulo IV – Levantamento Cadastral e Plano de Reassentamento

VOLUME I – Levantamento Cadastral

Tomo 1 – Relatório Geral

Tomo 2 – Laudos Individuais de Avaliação

Tomo 3 – Levantamentos Topográficos

VOLUME II – Plano de Reassentamento

Tomo 1 – Diagnóstico

Tomo 2 – Programação das Ações

Tomo 3 – Detalhamento do Plano de Reassentamento

Tomo 4 – Relatório Final do Reassentamento

Módulo V – Projeto Executivo das Adutoras

VOLUME I – Estudos Básicos

Tomo 1 – Levantamentos Topográficos

Tomo 2 – Investigações Geotécnicas

VOLUME II – Anteprojeto

VOLUME III – Detalhamento do Projeto Executivo

Tomo 1 – Memorial Descritivo

Tomo 2 – Memória de Cálculo

Tomo 3 – Quantitativos e Orçamentos

Tomo 4 – Especificações Técnicas e Normas de Medição e Pagamento

Tomo 5 – Plantas

Módulo VI – Elaboração dos Manuais de Operação e Manutenção

VOLUME 1 – Manuais de Operação e Manutenção

Módulo VII – Avaliação Financeira e Econômica do Projeto

VOLUME 1 – Relatório de Avaliação Financeira e Econômica do Projeto

O presente relatório é nomeado como Volume I – Estudos Básicos, Tomo 2 – Estudos Hidrológicos, e é parte integrante do Módulo III.

1 - INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

Atendendo ao disposto nos Termos do Contrato N° 005-PROGERIRH/PILOTO/CE/SRH/2001 e seus correspondentes anexos, compostos do Edital de Concorrência SDP N° 05/00-PROGERIR/SRH/CE e a Proposta Técnica e de Preços, referente ao Projeto Executivo da Barragem Trairi, no Estado do Ceará, estamos apresentando o presente RELATÓRIO, descrevendo as etapas que foram empreendidas no “Módulo III” do mencionado contrato, inerentes aos Estudos Hidrológicos da Barragem Trairi.

Os estudos realizados tiveram como objetivo o conhecimento dos fenômenos hidroclimatológicos da bacia hidrográfica e que são diretamente relacionados com o processo de regularização de vazões.

Este relatório contém os elementos necessários à tomada de decisão sobre o porte da barragem e suas obras complementares, abordando os seguintes tópicos:

- Localização e Acesso
- Caracterização Física da Bacia Hidrográfica
- Caracterização Climática da Bacia Hidrográfica
- Regime Pluviométrico da Bacia Hidrográfica
- Regime Fluvial e o Dimensionamento do Reservatório
- Regime Fluvial Médio
- Emprego de Metodologias
- Dimensionamento do Vertedor

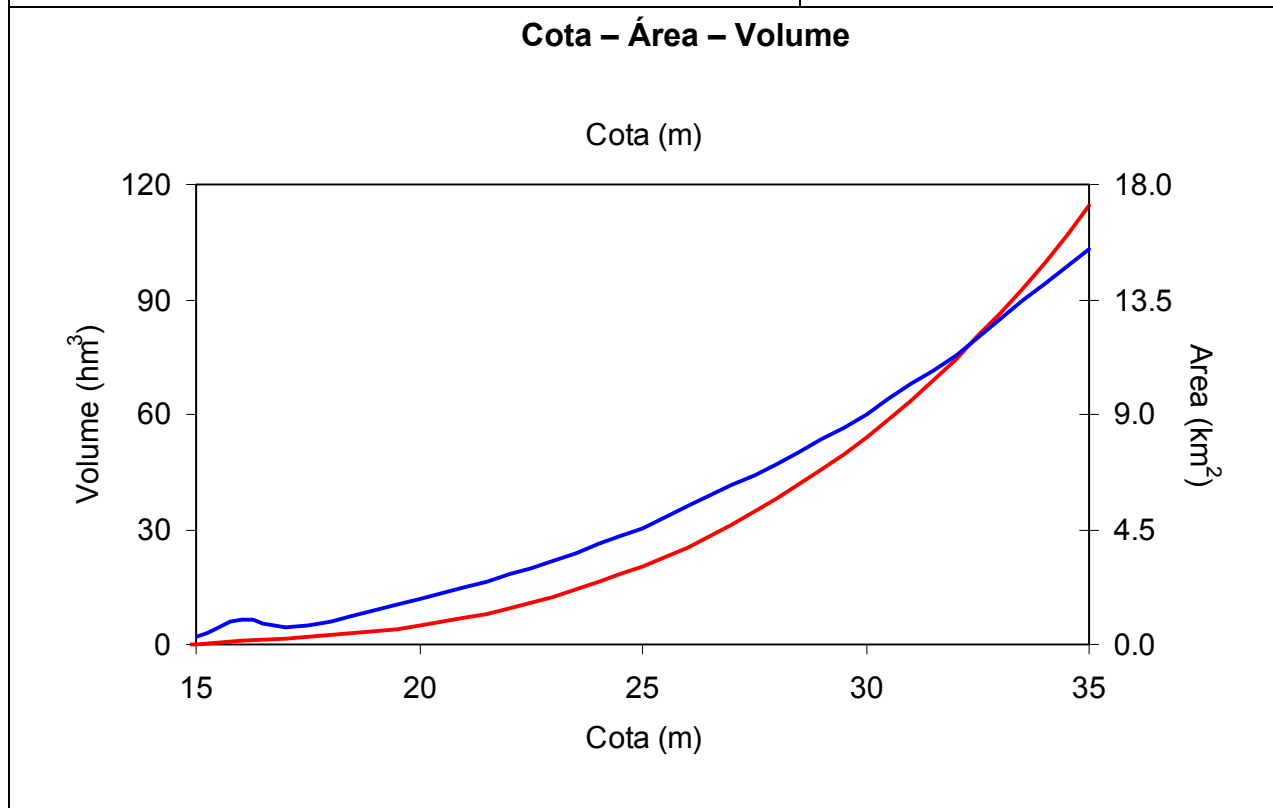
SUMÁRIO TÉCNICO DOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Caracterização da Bacia	
Área da bacia do Açude Trairi	327,02 km ²
Perímetro da bacia do Açude Trairi	81,7 km
Declividade média da bacia do Açude Trairi	5,85 m/km
Comprimento do rio principal	31,85 km
Fator de compacidade	1,31
Fator de forma	0,32
Tempo de concentração	7,25 hrs

Hidroclimatologia	
Pluviometria média anual	1150,5 mm
Evaporação média anual	1914,7 mm
Evapotranspiração potencial (Hargreaves)	1853,8 mm
Insolação média anual	2416,6 h
Umidade relativa média anual	67,9 %
Temperatura média anual: média das máximas	33,3 °C
Temperatura média anual: média das médias	26,6 °C
Temperatura média anual: média das mínimas	22,0 °C
Classificação climática segundo Köppen	BWx'
Classificação climática segundo Thornthwaite	C1SA'a'

Estudo de Cheias	
Precipitação efetiva	SCS
Propagação do escoamento na bacia	Hidrograma Unitário do SCS
CN	75
Vazão afluente – tempo de retorno = 1000 anos	661 m ³ /s
Vazão afluente – tempo de retorno = 10000 anos	845 m ³ /s

Capacidade do Reservatório	
Capacidade máxima	58,8 hm ³
Cota da soleira do sangradouro	30,5 m
Cota de coroamento	34,0 m
Custo anual do m ³ armazenado	0,009 R\$/ano
Custo anual do m ³ regularizado	0,04 R\$/ano



Capacidade de Regularização			
<i>Resolução Direta da Equação do Balanço Hídrico – Cota 30,5 m</i>			
Liberado - % (hm ³ /ano)	Sangrado - % (hm ³ /ano)	Evaporado - % (hm ³ /ano)	Qr 90% (m ³ /s)
19,190 – 28%	42,806 – 62,4%	6,575 – 9,6%	0,638

Dimensionamento do Sangradouro – Perfil Creager – Cota soleira 30,5 m			
Largura (m)	Cota de pico (m)	Lâmina (m)	Q_{out} (m³/s)
Tr = 1.000 anos - Q_{in} = 661 m³/s			
80	218	31,7	1,2
100	243	31,6	1,1
120	267	31,5	1,0
Tr = 10.000 anos - Q_{in} = 845 m³/s			
80	292	31,9	1,4
100	328	31,8	1,3
120	361	31,8	1,3

Estudos Adicionais	
<i>Probabilidade Esvaziamento/Enchimento</i>	
Demanda a partir da qual a probabilidade de esvaziamento é de 100%	54 hm ³ /ano
Demanda a partir da qual a probabilidade de enchimento é de 40,2%	54 hm ³ /ano
<i>Assoreamento</i>	
Volume final após 100 anos de simulação	44,42 hm ³
% assoreado	24,5 %
Descarga sólida média	212897 t/ano

2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Trairi localiza-se na região Norte do Estado do Ceará. Sua situação geográfica é definida pelas coordenadas 3°16'40" de latitude Sul e 39°16'08" de longitude Oeste. A altitude da sede é de 18 m. Os seus limites são: ao Norte o Oceano Atlântico; ao Sul os municípios de São Luiz do Curu e Tururu; a Leste Paraipaba e São Gonçalo do Amarante e a Oeste Itapipoca. A sua extensão territorial é de 756 km² e a distância a Fortaleza é de 130 km. O acesso a Fortaleza é feito pela BR-222 e pelas CE's-163 e 085.

O acesso ao sítio do barramento pode ser feito a partir de Fortaleza pela rodovia BR-222 até, aproximadamente, 4,2 km após a cidade de São Luiz do Curu. A partir desse ponto toma-se a direita (sentido norte) pela CE-163, na qual percorre-se cerca de 33 km, onde entra-se a esquerda, numa estrada carroçável na qual percorre-se cerca de 5 km e chega-se ao local do boqueirão, à 1 km da localidade denominada Córrego Fundo, bem próximo à rodovia CE-085. (ver Figura 2.1 a seguir).

Outra forma de acesso ao local do boqueirão partindo de Fortaleza é pela Rodovia Estruturante (CE-085) até a localidade de Córrego Fundo, aproximadamente 119 km. Deste ponto toma-se à esquerda em estrada carroçável e a 1 km chega-se ao local do boqueirão.

Mapa de localização

A3

3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA HIDROGRÁFICA

3 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia do Açude Trairi abrange uma área de 327,02 km², um perímetro de 83,7 km, uma declividade de 5,85 m/km e um comprimento do curso principal de 31,85 km. A forma desta bacia pode agora ser caracterizada utilizando estes dados. A forma de uma bacia hidrográfica é importante, pois afeta o tempo de concentração, ou seja, o tempo do início da precipitação para que toda a bacia contribua no seu exutório, podendo assim servir como um indicativo de tendência para enchentes de uma bacia. Bacias pequenas variam muito de formato, dependendo da estrutura geológica da região.

3.1 - ÍNDICES DE FORMA DA BACIA

A forma superficial de uma bacia hidrográfica está diretamente ligada à sua aptidão para formar ondas de cheias. Vários índices podem ser utilizados para determinar a forma de bacias, procurando-a relacioná-la com formas geométricas conhecidas. O fator de compacidade a relaciona com o círculo, enquanto que o fator de forma com o retângulo.

Assim, a bacia do açude Trairi pode ser caracterizada por estes índices calculados da seguinte forma.

$$k_c = \frac{P}{\frac{2\pi\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}}} \quad \text{Fator de compacidade}$$

$$k_f = \frac{A}{L^2} \quad \text{Fator de forma}$$

Onde A é a área, P o perímetro e L o comprimento do curso principal da bacia de interesse.

Para a bacia do açude Trairi, tem-se que A=327,02 km², P=83,73 km e L=31,85 km, o que resulta em um fator de forma (k_f) de 0,32 e um fator de compacidade (k_c) de 1,31.

Um fator de compacidade próximo a 1 corresponderia a uma bacia circular, e, se outros fatores forem iguais, uma bacia com este índice próximo a 1 teria uma tendência mais acentuada a maiores enchentes. O fator de compacidade da Bacia do Trairi não é tão próximo de 1, o que indica uma bacia não muito sujeita a enchentes.

Um fator de forma baixo indica que uma bacia é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho porém com maior fator de forma. Isso se deve ao fato de que uma bacia estreita e longa, com baixo k_c, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão, além de se afastar da condição de bacia circular onde os tributários do curso principal contribuem em um

único ponto. O fator de forma para a Bacia do Açude Trairi é baixo, o que ratifica a tendência do fator de compacidade, bacia não muito sujeita a enchentes. A Figura 3.1 mostra a altimetria da bacia hidrográfica do Açude Trairi. Na mesma figura é possível visualizar a bacia hidráulica do Açude Água Boa a montante do Açude Trairi, com um volume aproximado de 24 hm³.



Figura 3.1. Bacia do Açude Trairi.

3.2 - SOLOS E COBERTURA VEGETAL

As definições de solos e cobertura vegetal da área em estudo constituem elementos importantes na formação do regime de escoamento superficial. A cobertura vegetal representa o primeiro obstáculo encontrado pela precipitação e tem papel importante na interceptação e na evapotranspiração. Os solos através da sua capacidade de infiltração, capacidade de retenção de água próximo à superfície e da presença de depressões evaporativas, definem os movimentos das águas que ultrapassaram a cobertura vegetal.

A bacia do Açude Trairi tem predominantemente solos Latosol Vermelho Amarelo Distrófico - LVd10 e Regosol Distrófico - Red32, (ver Figura 3.2), o que associado com o relevo da bacia resulta em solos com moderada a elevada capacidade de drenagem (Figura 3.3). A vegetação predominante é o complexo vegetacional da zona litorânea (Figura 3.4) e o principal uso é a agricultura de culturas anuais, temporárias e permanentes (Figura 3.5).

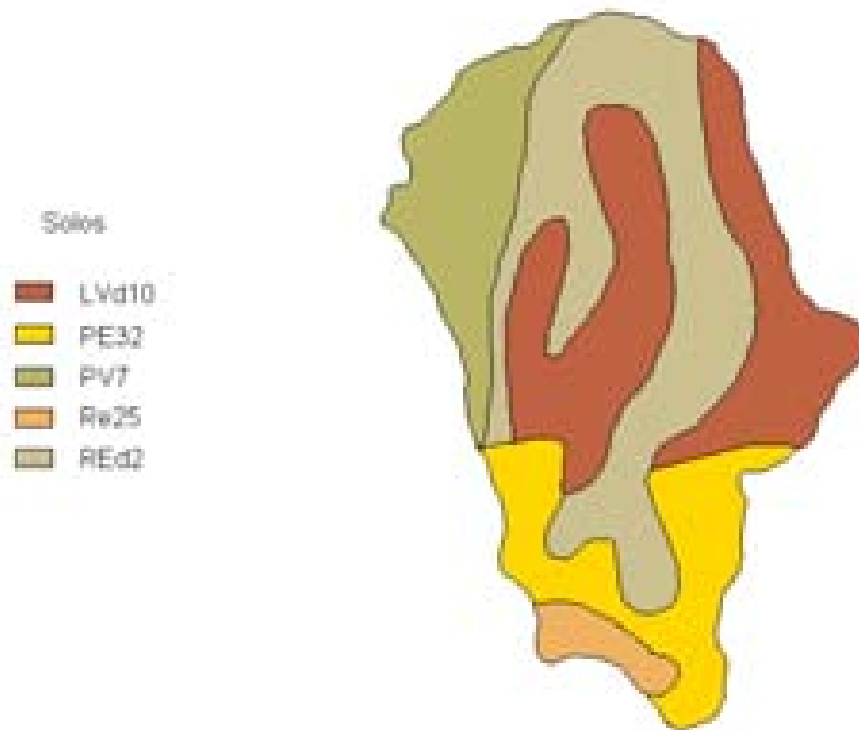


Figura 3.2. Solos da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).



Figura 3.3. Grupos Hidrológicos de Solos da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).



Figura 3.4. Vegetação da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).



Figura 3.5. Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Açude Trairi (Fonte: FUNCEME).

4 - ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

4 – ESTUDOS HIDROCLIMATOLÓGICOS

A abordagem da climatologia aqui desenvolvida visa dar subsídios as etapas subsequentes dos estudos realizados na bacia do rio Trairi, principalmente aquelas relacionadas ao aproveitamento dos seus recursos hídricos.

O rio Trairi tem sua nascente próxima a Lagoa Queimada e Serrote do Bringel desaguando em um complexo de lagoas (Lagamar da Rua, do Carrapicho, da Torta, do Livramento e do Sal) drenando uma área de 327,02 km². Não existe nenhuma estação hidroclimatológica nos domínios da bacia do rio Trairi, sendo por isso utilizada como estação representativa a de Sobral, com denominação homônima de sua localidade (INEMET, 1991). As normais climatológicas aqui apresentadas são referentes aos dados coletados pelo INEMET entre o período 1969-1989. Os principais parâmetros são:

4.1 - TEMPERATURA

A distribuição temporal das temperaturas diárias mostra pequenas variações para os três pontos discretos de monitoramento (12:00; 18:00 e 24:00 TMG - Tempo Médio de Greenwich), sendo tais flutuações processadas, sob uma visão contínua no tempo, com pequenos gradientes.

A temperatura média compensada é obtida por ponderação entre as temperaturas observadas nas estações meteorológicas T12 e T24 TMG, TMAX e TMIN do dia, pela seguinte fórmula estabelecida pela OMM (Organização Meteorológica Mundial) :

$$T_{\text{comp}} = \frac{T_{12} + 2 \cdot T_{24} + T_{\text{MAX}} + T_{\text{MIN}}}{5}$$

onde,

Tcomp - Temperatura média compensada

T12 - Temperatura observada às 12:00 TMG

T24 - Temperatura observada às 24:00 TMG

TMAX - Temperatura máxima do dia

TMIN - Temperatura mínima do dia

A temperatura compensada apresenta uma pequena variação de 2,6 °C, isso para os meses de abril (27,5°C) e junho (24,9°C). As médias máximas e mínimas extremas ocorrem respectivamente nos meses de Outubro (35,9°C) e Julho (21,2°C), conforme se observa no Quadro 4.1 e Figura 4.1.

**Quadro 4.1 - Temperaturas Máximas, Mínimas e Compensadas (°C)
na estação de Sobral**

Média	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Máxima	33,8	32,9	30,1	31,1	31,2	31,6	33,0	34,8	35,8	35,9	35,6	34,0
Comp.	26,7	27,1	26,2	27,5	26,2	24,9	26,4	27,2	26,3	26,7	27,1	27,1
Mínima	23,6	22,0	22,5	22,6	21,3	21,5	21,2	21,4	21,5	21,5	22,0	23,3

FONTE: INEMET (1991)

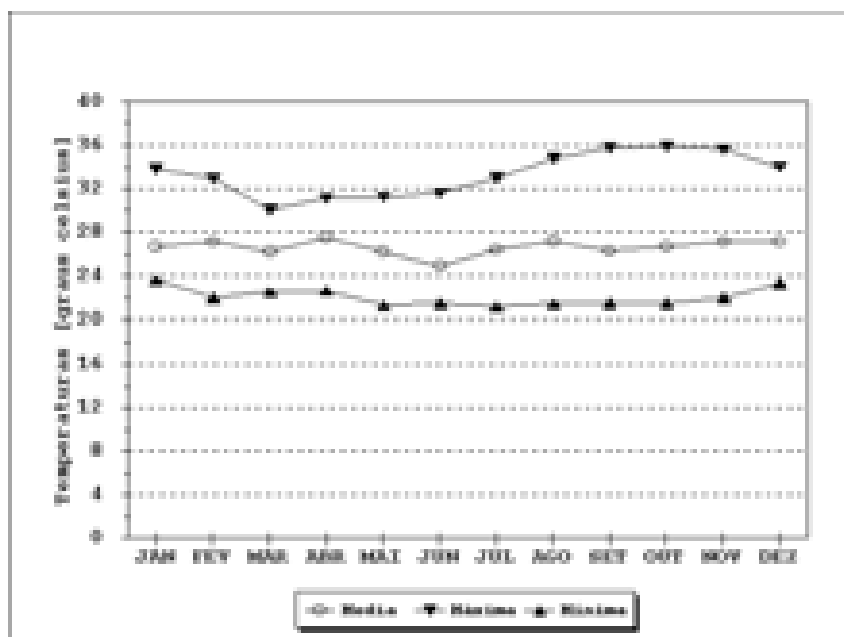


Figura 4.1 - Temperaturas Máximas, Mínimas e Médias Compensadas na estação de Sobral

4.2 - UMIDADE RELATIVA

A umidade relativa média apresenta uma variação máxima de 30%, referente aos meses de Abril (85%) e Agosto/Setembro (55%), como pode-se verificar no Quadro 4.2 e Figura 4.2.

Quadro 4.2 - Umidade Relativa na estação de Sobral

Média	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
%	69,0	74,0	81,0	85,0	80,0	74,0	66,0	55,0	55,0	58,0	57,0	61,0

FONTE: INEMET (1991)

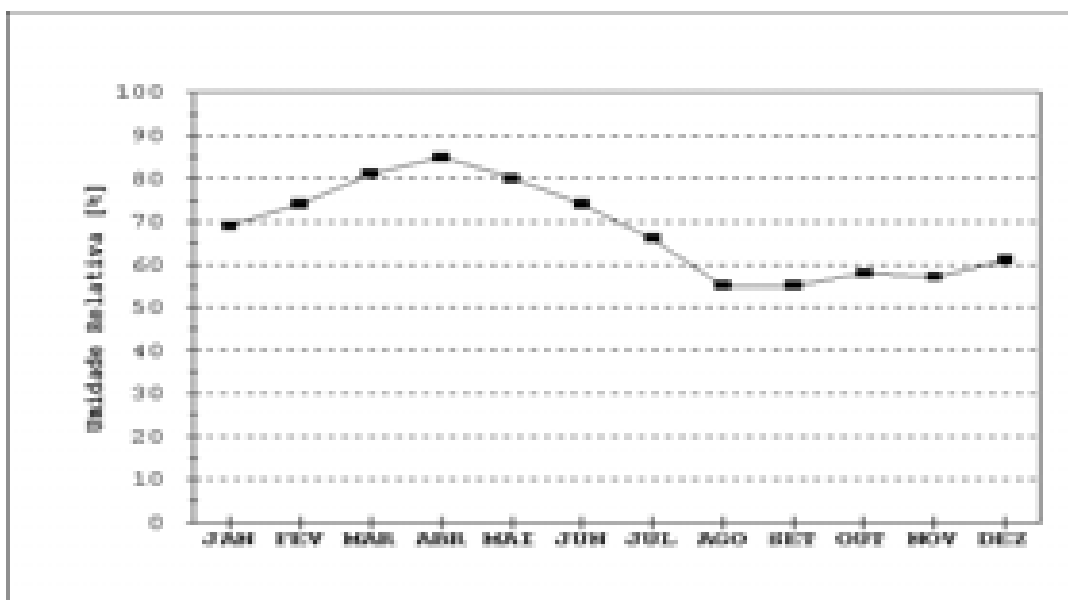


Figura 4.2 - Umidade Relativa na estação de Sobral

Os índices de umidade medidos resultam de uma composição de efeitos climatológicos, levando-se em conta, entre estes, a pluviometria que se constitui como o principal componente do fenômeno. Assim, considerando-se a inexistência de outras estações hidroclimatológicas nas proximidades da área de estudo, a umidade é resultante da homogeneidade pluviométrica, além das pequenas oscilações dos demais parâmetros influentes.

4.3 - INSOLAÇÃO MÉDIA

O Quadro 4.3 e a Figura 4.3 mostram, respectivamente, o número de horas de exposição no local da estação de Sobral e sua distribuição mensal. Em termos atuais, no mesmo período, tem-se 2416,6 horas de exposição, podendo-se concluir de maneira aproximada que cerca de 55% dos dias do ano possuem incidência solar direta. O trimestre fevereiro/março/ abril, apresenta, por razões óbvias, os menores valores.

Quadro 4.3 - Insolação Média na estação de Sobral

Média	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
horas	188,1	143,5	155,0	151,7	189,3	195,5	234,7	268,2	232,2	233,4	221,8	203,2

FONTE: INEMET (1991)

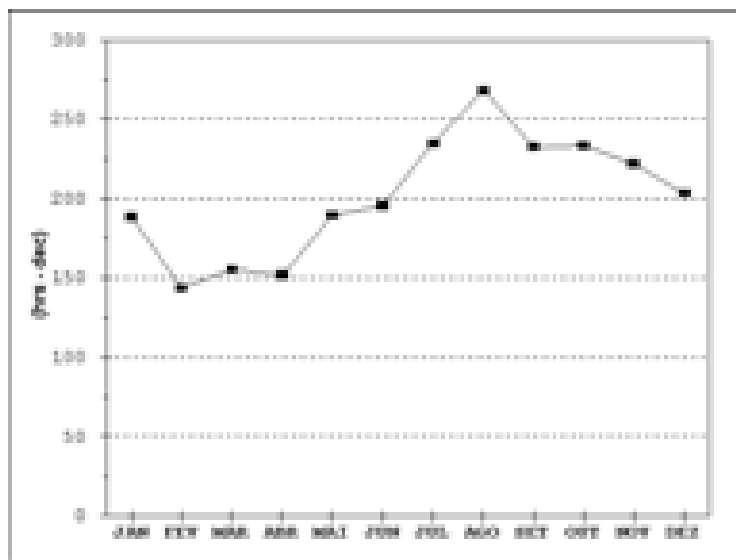


Figura 4.3 - Insolação Média na estação de Sobral

4.4 - VENTOS

A intensidade do vento é medida nos horários sinóticos de observação, a uma altitude de 10 m em relação a estação. Da mesma forma, a direção do vento também é medida nos três horários sinóticos, indicando a direção de onde o vento se origina.

Os dados para a estação de Sobral de velocidade de vento encontram-se apresentados no Quadro 4.4 e Figura 4.4. Além disto, verifica-se para esta região, que a direção predominante está dentro do quadrante Nordeste/Sudeste.

Quadro 4.4 - Velocidade de Vento Média na estação de Sobral

Média	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
horas	2,8	2,6	2,3	1,7	1,7	2,0	2,5	2,7	3,7	3,3	3,5	3,3

FONTE: INEMET (1991)

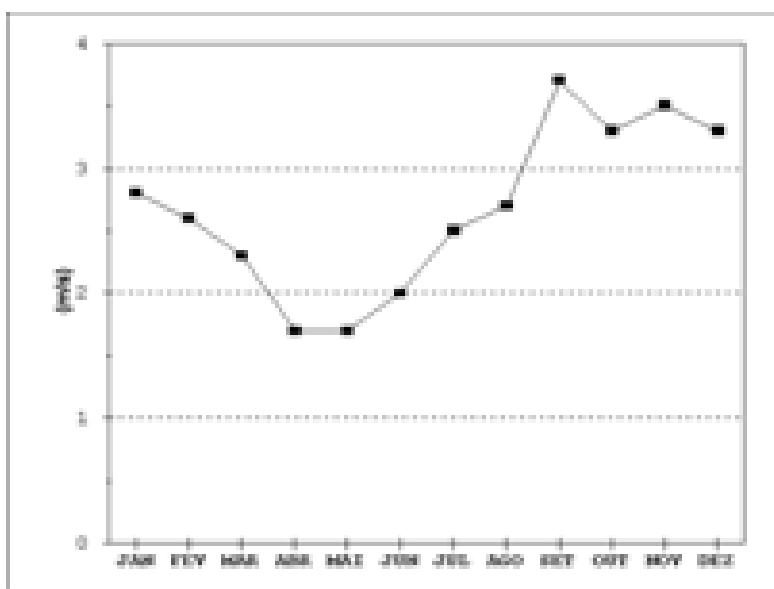


Figura 4.4 - Velocidade de Vento Média na estação de Sobral

4.5 - EVAPORAÇÃO MÉDIA

A evaporação anual observada em tanque-tipo classe “A” é de 1914,7 mm, distribuída ao longo dos meses segundo o Quadro 4.5 e Figura 4.5.

Quadro 4.5 - Evaporação Média na estação de Sobral

Média	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
mm	156,6	125,2	94,6	101,6	99,7	116,6	157,9	191,3	221,3	224,7	220,0	205,2

FONTE: INEMET

O trimestre que apresenta os maiores valores de evaporação corresponde a setembro/outubro/novembro, ocorrendo o máximo em outubro (224,7 mm). Deve-se ressaltar, entretanto, que para adotar estes valores como representativos da evaporação em açudes, principalmente pequenos e médios, deve-se multiplicar estes valores por um coeficiente entre a evaporação do açude e a evaporação no Tanque Classe A (K_a). Molle (1989) aconselha os valores mostrados no Quadro 4.6 para K_a , em função da superfície do espelho.

Quadro 4.6 – Coeficiente de Evaporação

Superfície (ha)	0 a 5	5 a 10	10 a 20	20 a 30	média
K_a	0,95	0,87	0,82	0,75	0,84

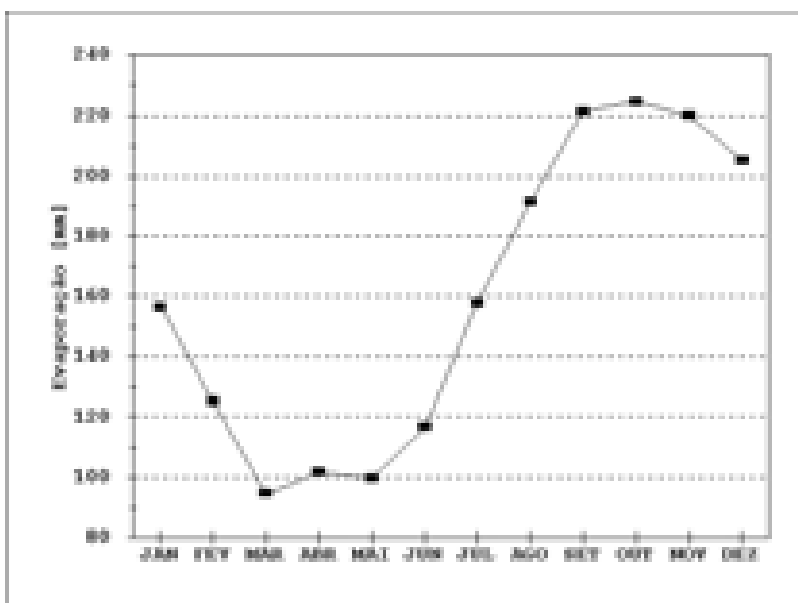


Figura 4.5 - Evaporação Média na estação de Sobral

4.6 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O Quadro 4.7 apresenta a evapotranspiração potencial mensal obtida segundo Hargreaves, totalizando 1853,8 mm. A Figura 4.6 confronta os valores do Quadro 4.7 com os valores da precipitação média em Trairi. Percebe-se, como característica, o déficit hídrico em praticamente todo o ano, com exceção dos meses de março e abril. Este fato demonstra, como é conhecido qualitativamente para as regiões semi-áridas, a necessidade da aplicação artificial de água.

Quadro 4.7 - Evapotranspiração Potencial (Hargreaves) na estação de Sobral

Média	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Mm	168,3	141,9	129,4	108,2	115,8	118,0	147,6	175,7	178,9	192,8	187,8	189,4

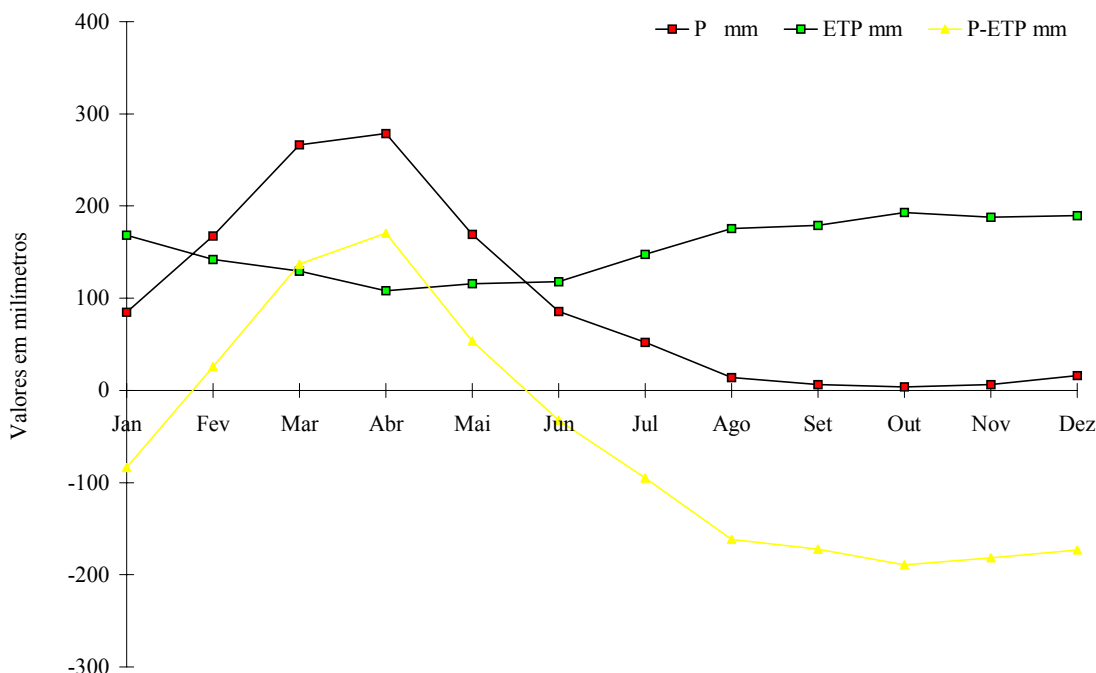


Figura 4.6 - Balanço Hídrico

4.7 - BALANÇO HÍDRICO

O princípio da conservação da massa à água aplicado a um determinado local ou área (em um dado volume de controle), nos fornece a diferença entre o ganho (precipitação) e o consumo (escoamento superficial e profundo, evaporação ou evapotranspiração). Este princípio é a base do balanço hídrico, concebido por Thornthwaite & Mather em 1955, e tem sido utilizado amplamente quando não se dispõe de muitos dados para um estudo mais apurado.

Aplicando-se a metodologia do balanço hídrico para a bacia em questão, supondo-se uma capacidade de armazenamento de 100 mm (PERH, 1990) , obtém-se o Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Balanço Hídrico segundo Thornthwaite e Mather

CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO = 100 mm

Mês	P mm	ETP mm	P-ETP mm	Neg mm	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Jan	84,60	168,30	-83,70	0,00	0,00	0,00	84,60	83,70	0,00
Fev	167,60	141,90	25,70	134,00	25,70	25,70	141,90	0,00	0,00
Mar	266,30	129,40	136,90	0,00	100,00	74,30	129,40	0,00	62,60
Abr	278,60	108,20	170,40	0,00	100,00	0,00	108,20	0,00	170,40
Mai	169,10	115,80	53,30	0,00	100,00	0,00	115,80	0,00	53,30
Jun	85,80	118,00	-32,20	32,20	72,00	-28,00	113,80	4,20	0,00
Jul	52,30	147,60	-95,30	127,50	27,00	-45,00	97,30	50,30	0,00
Ago	13,80	175,70	-161,90	289,40	5,00	-22,00	35,80	139,90	0,00
Set	6,50	178,90	-172,40	461,80	0,00	-5,00	11,50	167,40	0,00
Out	3,70	192,80	-189,10	650,90	0,00	0,00	3,70	189,10	0,00
Nov	6,10	187,80	-181,70	832,60	0,00	0,00	6,10	181,70	0,00
Dez	16,10	189,40	-173,30	1005,90	0,00	0,00	16,10	173,30	0,00
ANO	1150,50	1853,80	-703,30		429,70	0,00	864,20	989,60	286,30

A primeira coluna (P) representa os valores da precipitação mensal do posto Mundau, que foi escolhido como representativo da bacia hidrográfica do Trairi. A coluna da evapotranspiração potencial foi preenchida com os dados da estação climatológica de Sobral; a coluna NEG (negativo acumulado) representa um hipotético potencial matricial expresso em milímetros de déficit de água para o solo; ETR indica o valor da evapotranspiração real; a coluna DEF representa o déficit de água à planta e a última coluna EXC representa a quantidade de água que ultrapassou a capacidade de retenção máxima do perfil considerado.

4.8 - CLASSIFICAÇÃO DO CLIMA

4.8.1 - Classificação segundo Köppen

Segundo Köppen existem cinco zonas diferentes de clima na terra, associadas a valores de temperatura e precipitação de acordo com a vegetação.

De acordo com esta classificação, a região do estudo encontra-se classificada como Zona de Climas Secos, tipo B. As chuvas são classificadas como do tipo Bwx', uma vez que a distribuição temporal da precipitação da área abrange o verão e o outono. O clima, segundo o aspecto térmico, é do tipo muito quente, ou megatérmico.

4.8.2 - Classificação Segundo Thornthwaite

Segundo esta classificação, além da característica pluviométrica e térmica, a evapotranspiração potencial é também considerada elemento determinante do clima. Como forma de auxiliar na classificação de tipos e subtipos climáticos, três parâmetros foram introduzidos por Thornthwaite, a saber:

- Índice de aridez:

O índice de aridez vem a ser a deficiência hídrica expressa em porcentagem da evapotranspiração potencial, este índice apresentou o valor 53 (Quadro 2.8).

- Índice de umidade:

O índice de umidade é o excesso de água (EXC) expresso em porcentagem da necessidade que é representado pela evapotranspiração potencial (ETP), este índice apresentou o valor 15 (Quadro 2.8).

- Índice efetivo de umidade:

Este índice reflete o excesso ou déficit de água ao longo do ano, apresentando um valor igual a -17 (Quadro 2.8).

Com base nestes índices, os dados para a área de estudo, mostram um clima seco e sub-úmido; tipo C1, com índice efetivo de umidade variando entre 0% e -20%; clima seco, sub-tipo S, com índice de aridez superior a 33%; tipo A', megatérmico e sub-tipo a', baixa variação estacional (C1SA'a').

5 - ESTUDOS PLUVIOMÉTRICOS

5 - ESTUDOS PLUVIOMÉTRICOS

A pluviometria do Estado foi detalhadamente analisada por ocasião do PERH (Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, 1990), sendo esta análise iniciada com a coleta dos registros inventariados e atualizados até 1988 pela SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste). Esta etapa foi seguida por várias outras, entre as quais destacam-se, para os fins deste trabalho: a caracterização do regime pluviométrico em vários intervalos de tempo e o estabelecimento de série pluviométrica média para as bacias hidrográficas dos açudes de médio e grande porte.

5.1 - DADOS UTILIZADOS

A série pluviométrica bruta utilizada neste estudo foi inicialmente tratada pelo método do Vetor Regional (HIEZ, 1978), destinado à identificação de inconsistências nas séries históricas. Estas inconsistências podem ser originadas por erros de observação, podendo tais erros, ocorrerem sistematicamente ou isoladamente em um certo período.

Dois postos foram utilizados neste estudo, os mais próximos da área de interesse, bacia do rio Trairi, que possui uma área de 327,02 km², além de estar em uma altitude que representa melhor as características da área de estudo. Na estimativa dos dois vetores regionais, um a nível anual e o outro a nível mensal, foram utilizados postos reunidos nos denominados grupos regionais, (PERH, 1990), por apresentarem médias dos totais anuais mais próximas, além de estarem localizados em regiões de pouca variação de altitude.

Inicialmente foi considerado o intervalo anual, para o qual analisou-se as duplas massas entre a pluviometria anual e a série sintética obtida a partir do vetor regional associado. Esta análise permite a identificação de anomalias, ou seja, valores que divergem do padrão, este definido com base na informação de todos os postos pelo princípio da máxima verossimilhança.

A seguir prossegue-se com a análise, a nível mensal, utilizando o vetor regional mensal, buscando os meses que apresentam desvios consideráveis para aqueles anos de desvios consideráveis em relação ao valor sintético, sendo corrigidos os de maior contribuição para o desvio a nível anual. Os valores diários são compatibilizados pelo princípio da desagregação nos meses que sofreram a correção. Para maiores detalhes, consultar o PERH - SRH, 1990 - Relatório Geral - Diagnóstico.

O Quadro 5.1 mostra os postos pluviométricos que foram utilizados neste estudo e que compõem o grupo regional PARACURU. Foram utilizados dados até 1988, pois estes foram consistidos por ocasião do Plano Estadual de Recursos Hídricos (1992).

**Quadro 5.1 - Postos utilizados consistidos pelo método do Vetor Regional:
Grupo Paracuru**

Posto	Código	Período	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Mundaú	2861329	1912 - 1982	03°11'	39°22'	5
Trairi	2861553	1962 - 1988	03°17'	39°15'	20

Fonte: PERH-CE (1990)

5.2 - CARACTERIZAÇÃO DO REGIME PLUVIOMÉTRICO

5.2.1 - Nível Anual

As isoietas, linhas de mesma precipitação média, e iso-cv's (coeficientes de variação) estão apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2, que mostram a região norte do Estado onde se encontra a área do estudo, que apresenta, segundo análise destas figuras, média pluviométrica em torno de 1200 mm com um coeficiente de variação em torno de 0,40.

Uma análise freqüencial foi realizada para os postos de Mundaú e Trairi, sendo testadas várias distribuições, e escolhida a Log-Pearson III como a de melhor ajuste, sendo seus parâmetros estimados pelo método dos momentos. O Quadro 5.2 resume esta análise de freqüência.

**Quadro 5.2 - Análise de Freqüência dos Totais Anuais
Distribuição Log-Pearson III.**

Código	N	Período de Retorno					
		10	50	100	200	500	1000
2861329	53	1680,99	2051,20	2191,34	2324,61	2493,23	2616,58
2861553	12	2236,89	3570,49	4276,08	5083,93	6341,40	7465,03



Figura 5.1 – Isoietas



Figura 5.2 – Iso-cv's

5.2.2 - Nível Mensal

A análise da distribuição temporal mostra a concentração do total precipitado no primeiro semestre do ano, correspondendo a cerca de 90% do total anual.

A nível trimestral nota-se mais ainda a gravidade da concentração temporal, onde se constata que cerca de 60% do total anual precipita-se em apenas três meses do ano. Neste trimestre o mês de abril corresponde ao mais chuvoso, com cerca de 25% do total anual.

No Quadro 5.3 mostra-se um resumo dos índices nos três níveis (mensal, trimestral e semestral), enquanto que no Quadro 5.4 apresenta-se um resumo da análise de frequência utilizando a série de totais mensais para o mês mais chuvoso no posto considerado. Os períodos de retorno utilizados variam de 10 a 1000 anos, com totais pluviométricos obtidos por ajustamento da distribuição Log-Pearson III.

Quadro 5.3 - Índices de Concentração Pluviométrica - Série de Valores Médios Mensais.

Código	MÊS	VALOR	%TOT	TRIMES	VALOR	%	SEM	VALOR	%
2861329	ABRIL	277,7	24,2	FMA	712,1	62,1	1	1039,1	90,7
2861553	ABRIL	367,1	24,3	MAM	906,6	60,0	1	1321,3	87,5

Quadro 5.4 - Análise de Frequência-Nível Mensal-Distribuição Log-Pearson III.

Código	N	Período de Retorno					
		10	50	100	200	500	1000
2861329	70	475,13	661,91	739,68	817,01	919,36	997,29
2861553	20	708,75	1042,73	1189,84	1341,92	1553,09	1722,16

5.2.3 - Nível Diário

Os principais tipos de precipitações da região são em decorrência da elevação brusca das massas de ar por efeito térmico ou lenta, neste caso quando a massa de ar encontra obstáculos topográficos.

A probabilidade de ocorrência de dias chuvosos no período úmido é considerável. Em regiões de influência orográfica, a ocorrência de até vinte dias chuvosos no mês, não são incomuns.

Na análise hidrológica de prováveis obras hidráulicas, os eventos de alta frequência assumem uma importância maior com relação aos de baixa. Aqui foram utilizadas séries anuais de máximos diários.

Diversas distribuições podem ser utilizadas como teóricas para as frequências observadas. Depois de comparar diversas distribuições, foi escolhida a Log-Pearson III, cujas estimativas para vários períodos de retorno encontram-se no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 - Análise de Frequência-Nível Diário-Distribuição Log-Pearson III.

Código	N	Período de Retorno					
		10	50	100	200	500	1000
2861329	67	110,95	134,91	144,31	153,40	165,10	173,78
2861553	18	124,58	154,08	165,87	177,50	192,84	204,58

5.2.4 - Chuvas Intensas

Para projetos de obras hidráulicas em geral é importante a caracterização do regime pluviométrico em intervalos de tempo inferiores a 24 horas. A definição da vazão de projeto, por exemplo de canais integrantes da rede de drenagem, obras d’arte, está vinculada a determinação da relação intensidade-duração-frequência pluviométrica.

Na área em estudo inexistem registros de pluviógrafos, sendo o aparelho mais comum em estações pluviométricas o pluviômetro, capaz de registrar a “precipitação máxima de 1 dia”. Isto impossibilita o uso da metodologia convencional, na qual, a partir de chuvas intensas de várias durações registradas em pluviogramas, estabelece-se uma equação que relaciona intensidade, duração e frequência para a área de representatividade do aparelho.

Como alternativa ao método tradicional, tem-se o Método das Isozonas (TORRICO, 1975) , que partindo da transformação da chuva de 1 dia em 24 horas, permite estimar valores para intervalos de menor duração.

A desagregação da chuva de 24 horas em chuvas de menores durações consiste nas etapas de cálculo descritas a seguir:

1. multiplicar a chuva de um dia por 1,10 para obter-se a chuva pontual de 24 horas;
2. determinar a isozona onde está localizado o centro de gravidade da bacia hidrográfica - isozona C para a área em estudo (Figura 5.3);

3. estimar, para os diversos períodos de retorno, a chuva de 1 hora de duração a partir da chuva de 24 horas, através da multiplicação pelo fator R1h;
4. plotar os valores P24h e P1h em papel probabilístico para obtenção de chuvas de durações intermediárias.

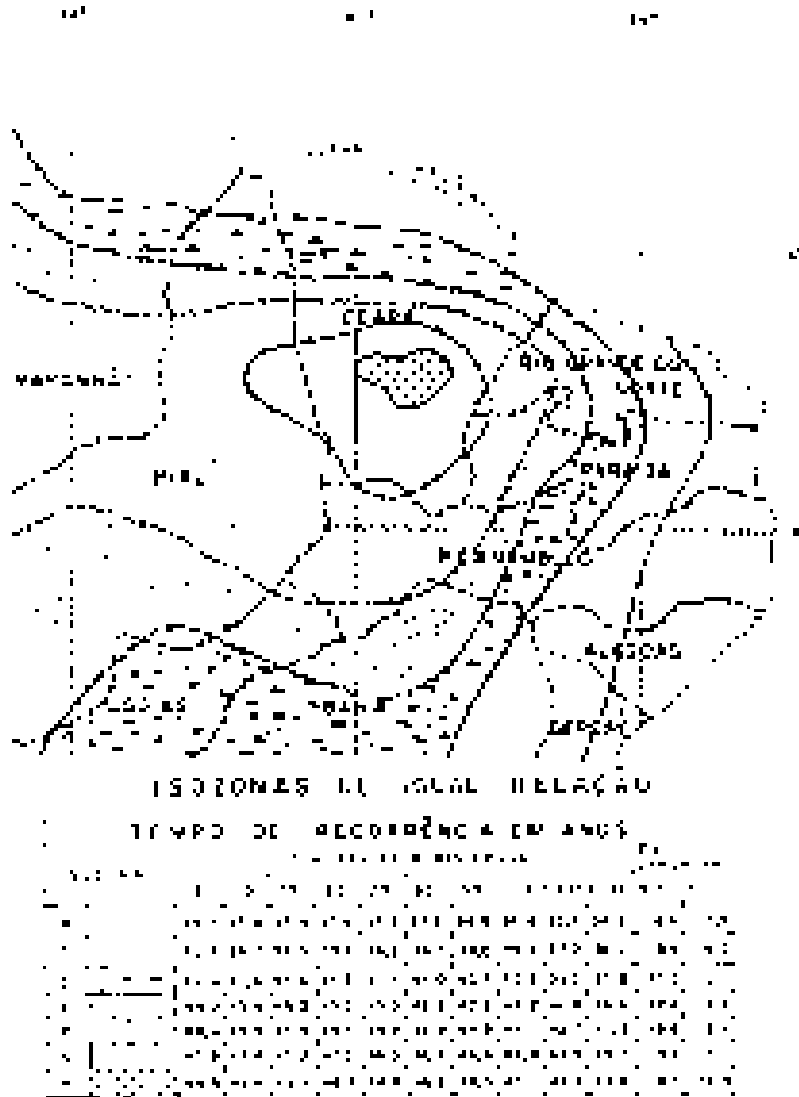


Figura 5.3 – Método das Isozonas de Taborga

O método das isozonas apresenta diferenças bem significativas quando comparado com o método tradicional, conforme mostra Silva, Kern e Henrique (1989), o que sugere que os resultados obtidos pelo método das isozonas sejam observados com certas restrições.

O posto de Mundaú (2861329) foi escolhido uma vez que o de Trairi tem uma extensão bem menor e muitas falhas. A Figura 5.4 mostra as curvas intensidade-duração-freqüência para diferentes tempos de retorno.

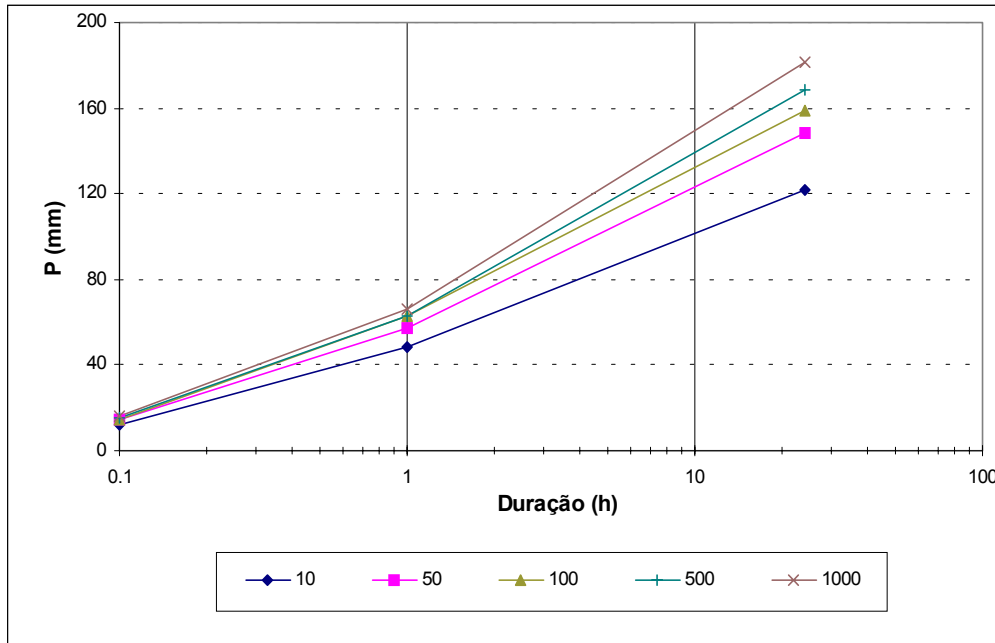


Figura 5.4 - Curvas Intensidade-Duração-Freqüência

6 - ESTUDOS DE CHEIAS

6 - ESTUDO DE CHEIAS

6.1 - INTRODUÇÃO

A determinação da cheia de projeto para dimensionamento do sangradouro pode ser realizada com base em dados históricos de vazão (métodos diretos) e com base na precipitação (métodos indiretos), estando em ambos os casos associados a um risco previamente escolhido. Diante da escassez de registros históricos de vazões, é mais usual a determinação do hidrograma de projeto com base na precipitação. A utilização de métodos diretos ficou impossibilitada diante a inexistência de registros fluviométricos na Bacia Litoral, região hidrográfica que engloba a Bacia do Açude Trairi.

O estudo da cheia de projeto é de fundamental importância para a segurança e economia da barragem, podendo o hidrograma de projeto estar baseado em:

- PMP (precipitação máxima provável) para projetos de importantes obras hidráulicas;
- cheia padrão para obras hidráulicas de risco intermediário;
- precipitações associadas a um risco ou probabilidade de ocorrência.

Em pequenas barragens, onde grandes riscos não estão envolvidos, pode-se utilizar o hidrograma de projeto baseado no último caso. Foram calculadas aqui as cheias de projeto de 1000 e 10000 anos.

6.2 - METODOLOGIA

Os métodos estatísticos de obtenção de vazões máximas que utilizam séries históricas de vazões observadas, procedimento comum para bacias naturais, não podem ser aplicados pela escassez de dados ou, ainda, sua inexistência. Esta falta de dados dos eventos na bacia a ser estudada indicaram a escolha de métodos de transformação chuva-deflúvio como metodologia a ser adotada.

A metodologia procura descrever as diversas hipóteses de cálculo da cheia de projeto: a escolha da chuva de projeto, o hidrograma utilizado, a definição da precipitação efetiva, o hidrograma da cheia na bacia e, por fim, o seu amortecimento no sangradouro. A ferramenta utilizada para a implementação desta metodologia foi o programa HEC-1 .

As relações chuva-deflúvio para a bacia do Rio Trairi foram estabelecidas utilizando-se o modelo HEC-1, um modelo projetado para simular o escoamento

superficial em uma bacia, sendo esta representada como um sistema de componentes hidrológicos e hidráulicos. Para esta bacia foi estudada a sua resposta aos hietogramas de projeto correspondentes a 1000 e a 10000 anos (T_r = tempo de retorno).

O modelo HEC-1 permite o uso de várias metodologias para determinação da chuva efetiva, simulação do escoamento superficial em bacia (overland flow) e propagação do escoamento em canais e reservatórios. No caso da bacia do Rio Trairi, diante dos dados disponíveis, foi adotado o seguinte:

1. Método Curva-Número (*Soil Conservation Service*) na determinação da chuva efetiva;
2. Método do *Soil Conservation Service* na determinação do hidrograma unitário sintético - Escoamento Superficial na bacia (Overland flow);
3. Método do Hidrograma Triangular como alternativa do cálculo do escoamento superficial na bacia.

6.2.1 - Precipitação

Para o cálculo do escoamento superficial da bacia do Rio Trairi foi assumida uma precipitação uniformemente distribuída sobre a referida bacia. O HEC-1 permite a entrada de tormentas históricas ou sintéticas, sendo as últimas freqüentemente utilizadas para planejamento e estudos de projetos.

O hietograma adotado baseia-se nas curvas altura-duração-freqüência obtida nos estudos hidroclimatológicos, sendo ajustado à área da bacia usando a seguinte equação:

$$P_A = P_0 \cdot (1 - W \cdot \log(\frac{A}{A_0}))$$

onde $W = 0,15$ (coeficiente regional para zonas áridas e semi-áridas); P_A = Precipitação sobre toda a área; P_0 = Chuva pontual; $A = 320,02 \text{ km}^2$ (área da bacia); $A_0 = 25 \text{ km}^2$ (área base para chuva pontual), obtendo-se um fator de redução igual a $0,87$ ($1 - W \cdot \log(A/A_0)$). O Quadro 6.1 apresenta a chuva pontual e com a aplicação do fator redutor de área correspondente, as curvas i-d-f. A partir das curvas de chuva reduzida, foi obtida a precipitação associada aos tempos de retorno de 1000 e 10000 anos para as durações de 5 min, 15 min, 60 min, 2 h, 3 h, 6 h, 12 h e 24 h.

Quadro 6.1 - Valores de Chuva (mm) de 24 horas - Pontual e Reduzida.

Chuva Pontual (mm)								
Duração	5 min	15 min	60 min	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
P(mm) – TR 1000	13,6	36,7	65,7	91,0	105,8	131,1	140,4	181,6
P(mm) – TR 10000	15,8	42,6	76,4	105,8	122,9	152,3	163,2	211,0
Chuva Reduzida (mm)								
Duração	5 min	15 min	60 min	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
P(mm) – TR 1000	10,6	28,5	51,1	70,7	82,2	101,8	109,1	141,1
P(mm) – TR 10000	12,3	33,1	59,3	82,1	95,5	118,3	126,8	163,9

O HEC-1 utiliza estes dados para construir uma distribuição triangular da precipitação, onde é assumido que cada total precipitado para qualquer duração ocorre durante a parte central da tormenta (tormenta balanceada). Alturas correspondentes a 10 e 30 minutos são interpoladas das alturas precipitadas de 5, 15 e 60 minutos através das equações do HYDRO-35 (National Weather Service, 1977):

$$P_{10min} = 0,41.P_{5min} + 0,59.P_{15min}$$

$$P_{30min} = 0,51.P_{15min} + 0,49.P_{60min}$$

onde P_n é a precipitação para a duração de n minutos.

A chuva de projeto associada ao tempo de retorno de 1000 e 10000 anos para a aplicação da metodologia do hidrograma triangular foi aquela correspondente a uma duração igual ao tempo de concentração da bacia. Obteve-se a partir das curvas altura-duração-freqüência os totais precipitados aos intervalos $1/6 \cdot t_c$. A partir desta série de precipitação acumulada calcula-se a precipitação efetiva utilizando-se o método curva número. Depois de obtida a precipitação efetiva, procede-se uma reordenação dos valores precipitados de modo a manter o pico no terceiro intervalo (Quadros 6.2 e 6.3).

Quadro 6.2 - Cálculo do Hietograma de Projeto para a bacia contribuinte do reservatório Trairi usando o Hidrograma Triangular (Tr = 1000 anos) – CN = 75.

DT (h)	Pacum (mm)	S (mm)	Pef Ac (mm)	Pef (mm)	Pef Ord (mm)	Dpef (mm)	Qp	Tp	Tb	Q pico (m3/s)
1,21	55,18	84,67	11,90	11,90	1,11	5,62	77,23	4,95	13,23	485,38
2,42	75,49		23,94	12,04	5,62	7,28	100,03	6,16	13,23	
3,62	86,28		31,23	7,28	5,67	12,04	165,30	7,37	13,23	
4,83	94,18		36,85	5,62	7,28	11,90	163,42	8,58	13,23	
6,04	101,85		42,52	5,67	11,90	5,67	77,86	9,79	13,23	
7,25	103,32		43,63	1,11	12,04	1,11	15,20	11,00	13,23	

DT - tempo

Precipitação Efetiva: Pef

Dpef – Pef Ord Desagregada

Tp - Tempo de pico de cada hidrograma

Vazão de Pico: Qp - de cada hidrograma

S – Armazenamento

Pef Ac - Acumulada

Tb - Tempo de base de cada hidrograma

Qpico - do hidrograma total (após convolução).

Pacum - Precipitação Acumulada

Pef Ord - Ordenada

Quadro 6.3 - Cálculo do Hietograma de Projeto para a bacia contribuinte do reservatório Trairi usando o Hidrograma Triangular (Tr = 10000 anos) – CN = 75.

DT (h)	PAcum (mm)	S (mm)	Pef Ac (mm)	Pef (mm)	Pef Ord (mm)	DPef (mm)	Qp	Tp	Tb	Q pico (m3/s)
1,21	65,76	63,50	24,15	24,15	1,47	7,60	104,34	4,95	13,23	756,02
2,42	87,68		40,60	16,45	7,60	10,14	139,29	6,16	13,23	
3,62	100,25		50,74	10,14	7,65	24,15	331,61	7,37	13,23	
4,83	109,43		58,40	7,65	10,14	16,45	225,84	8,58	13,23	
6,04	118,36		66,00	7,60	16,45	7,65	105,08	9,79	13,23	
7,25	120,07		67,47	1,47	24,15	1,47	20,22	11,00	13,23	

DT - tempo

Precipitação Efetiva: Pef

Dpef – Pef Ord Desagregada

Tp - Tempo de pico de cada hidrograma

Vazão de Pico: Qp - de cada hidrograma

S – Armazenamento

Pef Ac - Acumulada

Tb - Tempo de base de cada hidrograma

Qpico - do hidrograma total (após convolução).

Pacum - Precipitação Acumulada

Pef Ord - Ordenada

6.2.2 - Precipitação Efetiva para aplicação do HEC-1

O modelo utilizado pelo HEC-1 refere-se a interceptação superficial, armazenamento em depressões e infiltração como perdas de precipitação, ou seja, a parcela da precipitação que não contribui para gerar escoamento é considerada perda, sendo o restante, considerado precipitação efetiva.

O cálculo das perdas de precipitação pode ser usado nos outros componentes do modelo HEC-1, em especial, hidrograma unitário. No caso do hidrograma unitário, estas perdas são consideradas uniformemente distribuídas sobre a bacia (ou sub-bacia).

De maneira geral, existem três metodologias utilizadas para determinação da chuva efetiva: equações de infiltração, índices e relações funcionais. Especificamente, o HEC-1 possibilita o uso de 5 métodos: 1) taxa de perda inicial e uniforme; 2) taxa de perda exponencial; 3) Curva-Número; 4) Holtan; 5) Função de Infiltração Green e Ampt. Foi considerado mais adequado, diante dos dados disponíveis, o método curva número do Soil Conservation Service.

O método Curva Número é um procedimento desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo USDA, no qual a lâmina escoada (isto é, a altura de chuva efetiva) é uma função da altura total de chuva e um parâmetro de abstração denominado Curva-Número, CN. Este coeficiente varia de 1 a 100, sendo uma função das seguintes propriedades geradoras de escoamento na bacia: (1) tipo de solo hidrológico; (2) uso do solo e tratamento; (3) condição da superfície subterrânea, e (4) condição de umidade antecedente. Para a bacia do Rio Trairi foi adotado um CN = 75 com base nos mapas de solos (grupos hidrológicos), uso e ocupação e relevo contidos no PERH (1990).

A equação de escoamento do SCS é dada por

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

Onde Q = escoamento; P = precipitação; S = capacidade máxima de armazenamento do solo; I_a = perdas antes do início do escoamento.

As perdas antes do início do escoamento (I_a) incluem água retida em depressões superficiais, água interceptada pela vegetação, evaporação, e infiltração. I_a é altamente variado, mas a partir de dados de pequenas bacias I_a é aproximado pela seguinte relação empírica:

$$I_a = 0,20.S \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) elimina-se la , resultando em:

$$Q = \frac{(P - 0,20.S)^2}{P + 0,80.S}$$

Onde S está relacionado às condições de solo e cobertura através do parâmetro CN por

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{unidades métricas})$$

Onde CN varia de 0 a 100. CN foi tabelado para diferentes tipos de solos e cobertura, sendo estes valores tabelados apresentados para condições de umidade antecedente normal (AMC II). Para condições secas (AMC I) e úmidas (AMC III), CNs equivalentes podem ser calculados pelas seguintes fórmulas:

CONDIÇÕES SECAS

$$CN(I) = \frac{4,2.CN(II)}{10 - 0,058.CN(II)}$$

CONDIÇÕES ÚMIDAS

$$CN(III) = \frac{2,3.CN(II)}{10 + 0,13.CN(II)}$$

Alternativamente, os CNs para estas condições podem ser obtidos, a partir da condição normal (AMC II), utilizando-se tabelas.

Como já mencionado, o CN foi tabelado para diferentes tipos de solos, os quais foram classificados pelo SCS em quatro grupos de solos hidrológicos (A, B, C e D) de acordo com sua taxa de infiltração. Estes quatro grupos são descritos a seguir:

- A - solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração, solos arenosos profundos com pouco silte e argilla.
- B - solos menos permeáveis que o anterior, solos arenosos menos profundos que o do tipo A e com permeabilidade superior à média.
- C - solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundos.
- D - solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Desde que o método do SCS dá o excesso total para uma tormenta, o excesso incremental de precipitação para um período de tempo é calculado como a diferença entre o excesso acumulado no fim do presente período e o acumulado do período anterior.

6.2.3 - Hidrograma Unitário - SCS

A técnica do hidrograma unitário é usada para transformar a precipitação efetiva em escoamento superficial de uma sub-bacia. Este método foi escolhido por ter sido idealizado para bacias de áreas entre 2,5 e 1000 km², e por ser construído exclusivamente a partir de informações hidrológicas. Além disso, este modelo necessita apenas de um parâmetro: o T_{LAG}. Este parâmetro, T_{LAG}, é igual à distância (lag) entre o centro de massa do excesso de chuva e o pico do hidrograma unitário.

O tempo de concentração da bacia foi estimado aqui pela fórmula do Califórnia Highways, também conhecida como fórmula de Kirpich:

$$T_C = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0.385}$$

Onde T_C = tempo de concentração em minutos; L = comprimento do maior talvegue em km; ΔH = diferença de elevação entre o ponto mais remoto da bacia e o exutório. Logo, para a bacia do Rio Trairi tem-se:

Seção Barragem: L = 31,87 km ΔH = 165 m S = 5,18 m/km, o que resulta T_C = 7,25 h ; T_{LAG} = 4,35 h para a Barragem Trairi.

A vazão de pico e o tempo de pico são calculados por:

$$Q_p = 208 \cdot \frac{A}{t_p} \qquad t_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{LAG}$$

Onde Q_p = é a vazão de pico (m³/s), t_p = tempo de pico do hidrograma (h), A = área da bacia em km² e Δt = o intervalo de cálculo. No quadro 6.2 a seguir estão indicados os dados dos hidrogramas de cheia milenar e decamilenar.

QUADRO 6.2

Cheia	Δt (minutos)	Chuva Total (mm)	Perdas (mm)	Chuva efetiva (mm)
1.000	10	130,31	65,40	64,91
10.000	10	151,37	68,88	82,48

Uma vez determinados estes parâmetros e o intervalo de cálculo (duração do hidrograma unitário), o HEC-1 utiliza-os para interpolar um hidrograma unitário a partir de um hidrograma unitário adimensional do SCS. A seleção do intervalo de cálculo é baseado na relação Δt = 0,20 t_p , não devendo exceder 0,25 t_p. Estas relações baseiam-se nas seguintes relações empíricas.

$$t_{lag} = 0,60 T_C \qquad \text{e} \qquad 1,7 t_p = \Delta t + T_C$$

Onde T_C = é o tempo de concentração da bacia. O HEC-1 sugere que Δt ≤ 0,29 T_{LAG}. O intervalo escolhido pelo HEC-1 foi de 10 minutos. Para o cálculo do hidrograma de projeto por esta metodologia, é necessário uma estimativa do tempo de concentração da bacia. Este tempo de concentração foi avaliado através da aplicação da fórmula de Kirpich.

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam os hietogramas de projeto (precipitação total) e os hidrogramas afluentes a barragem Trairi obtidos através do uso do modelo HEC-1 correspondentes aos tempos de retorno 1000 e 10000 anos, conforme metodologia acima. A vazão de pico do hidrograma foi 661 m³/s para o período de retorno de 1000 anos e 845 m³/s para o período de retorno de 10000 anos.

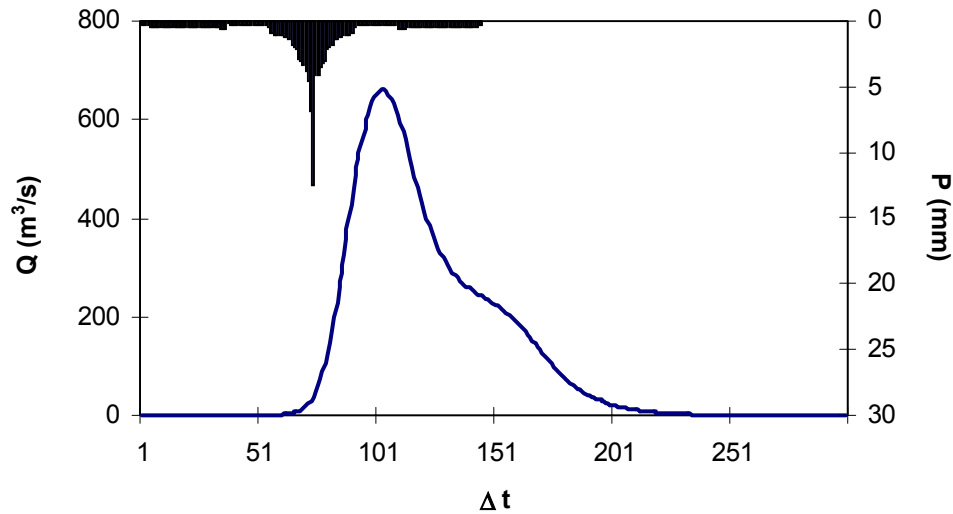


Figura 6.1 - Hidrograma total afluente - Bacia 327,02 km² (Tr = 1000 anos).

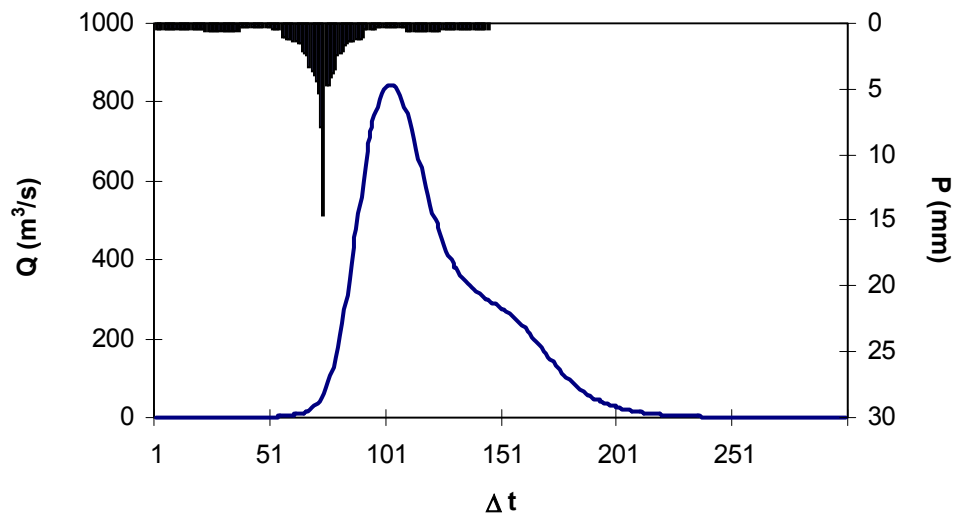


Figura 6.2 - Hidrograma total afluente - Bacia 327,02 km² (Tr = 10000 anos).

6.2.4 - Hidrograma Triangular

Com o hietograma de projeto determinado conforme descrito anteriormente para o período de retorno de 1000, calculou-se a cheia de projeto utilizando o critério do Hidrograma Unitário Triangular do Soil Conservation Service (S.C.S.), sendo o excesso de precipitação determinado a partir de um parâmetro (CN) que define o complexo solo, vegetação.

O cálculo é feito como se segue:

A vazão de pico do hidrograma unitário, em $\text{m}^3/\text{s}/\text{cm}$, é assim definida para uma chuva efetiva igual a 1 cm de altura e para um tempo unitário:

$$q_p = \frac{2,08A}{t_p},$$

Onde t_p é o tempo de pico, em horas, dado por $t_p = \frac{\delta_t}{2} + 0,6t_c$, $\delta_t = t_c/6$ é o tempo unitário em horas, e t_c é o tempo de concentração em horas calculado conforme Kirpich.

O tempo de base do hidrograma, em horas, é dado por:

$$t_b = 2,67t_p$$

Para a bacia contribuinte ao reservatório tem-se, $t_c = 7,25$ horas, então $t_b = 13,23$ horas, $\Delta t = 1,21$ horas, $t_p = 4,95$ horas e, $q_p = 137,31 \text{ m}^3/\text{s}/\text{cm}$.

Então, já podemos traçar o Hidrograma Unitário Triangular (HUT) correspondentes aos tempos de retorno de 1000 e 10000 anos (Figuras 6.3 e 6.4). Uma vez determinado o HUT correspondente a cada intervalo de chuva efetiva, faz-se a convolução obtendo-se assim, o hidrograma total. Após a convolução dos seis hidrogramas, obteve-se as vazões de pico associadas a 1000 anos ($485,38 \text{ m}^3/\text{s}$) e a 10000 anos ($756,02 \text{ m}^3/\text{s}$).

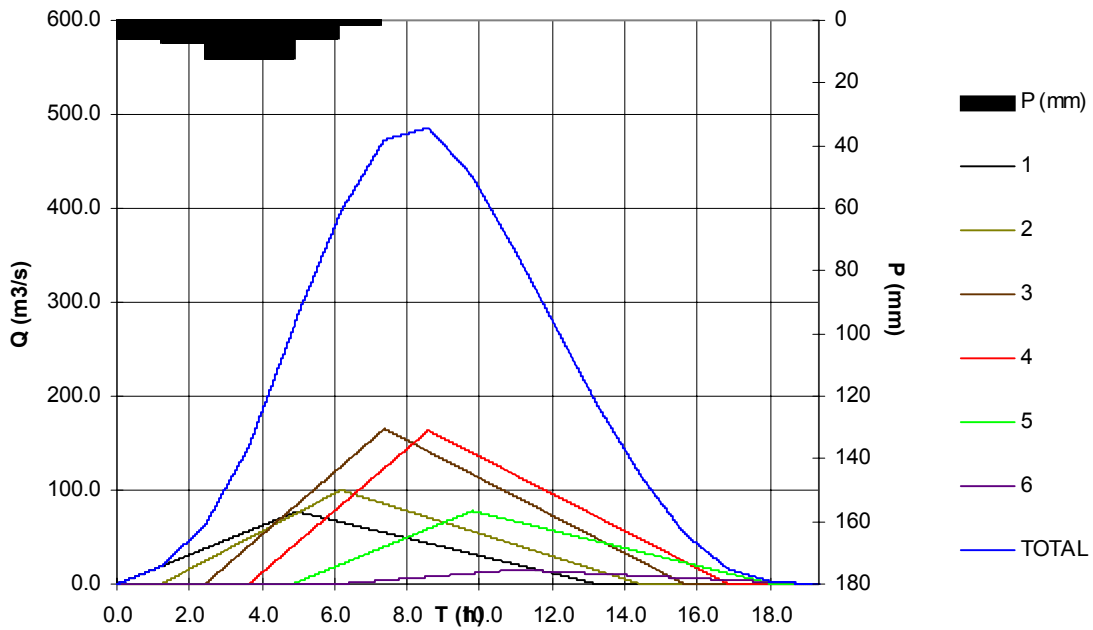


Figura 6.3 - Hidrograma total afluente - Bacia 327,02 km² (Tr = 1000 anos).

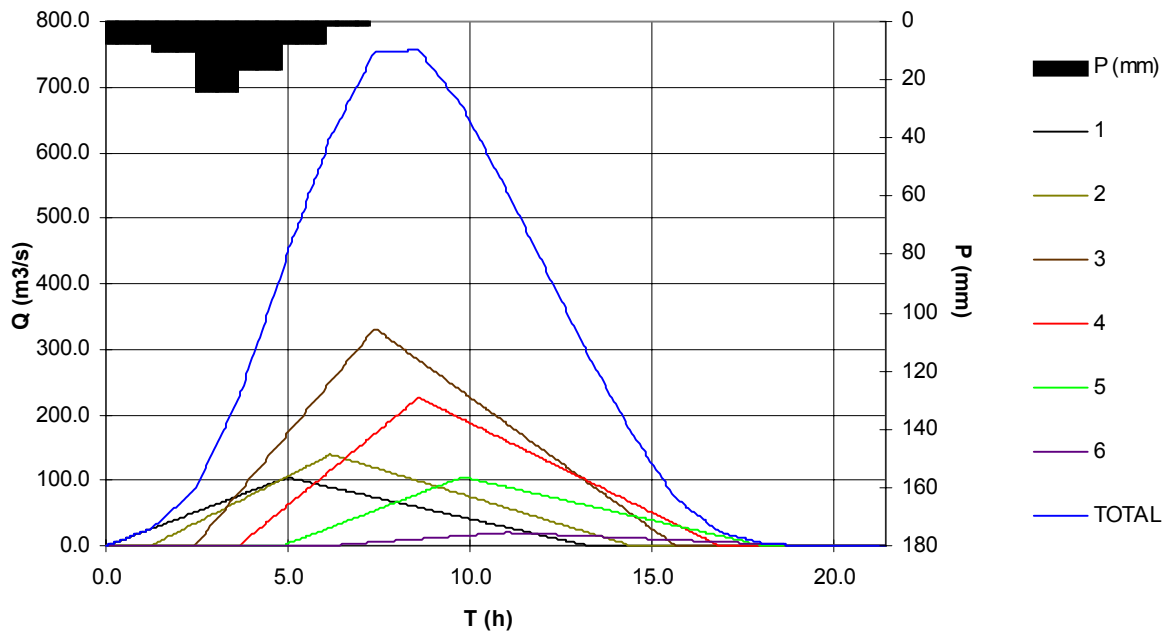


Figura 6.4 - Hidrograma total afluente - Bacia 327,02 km² (Tr = 10000 anos).

7 - CURVAS DE REGULAÇÃO DO RESERVATÓRIO

7 - CURVAS DE REGULAÇÃO DO RESERVATÓRIO

7.1 - INTRODUÇÃO

A importância do estudo da capacidade de regularização de um reservatório está ligada ao conhecimento das mudanças temporais e espaciais dos deflúvios naturais, visando o atendimento das demandas da sociedade. Busca-se aqui avaliar o tamanho que deve ser a obra de maneira que ganhos em regularização de águas justifiquem os investimentos a serem realizados.

Hidrologicamente, os objetivos centrais deste capítulo são:

1. Análise incremental do ganho em volume regularizado em relação ao aumento da capacidade para a Barragem Trairi;
2. Estimativa das perdas por evaporação e sangria da Barragem Trairi;

O traçado das curvas de regulação, inclui: volumes evaporado (E), liberado (M) e sangrado (S) versus capacidade (K) e dM/dK versus K.

O estudo foi feito em duas etapas, as quais consistem em:

1. Determinar série de sangrias do açude a montante do açude Trairi pelo balanço hídrico utilizando o deflúvio correspondente à parte alta da bacia hidrográfica (bacia do açude a montante do Trairi);
2. Simular balanço hídrico do açude Trairi considerando a influência das sangrias calculadas em 1, utilizando o deflúvio correspondente à bacia hidrográfica do Trairi retirada a porção correspondente à bacia do açude a montante do Trairi.

7.2 - METODOLOGIA

Na determinação das curvas de regulação do reservatório foram utilizados dois métodos, a saber:

1. Solução direta da equação de balanço hídrico;
2. Diagrama Triangular de Regularização – sem influência do açude de montante.

7.2.1 - Solução Direta da Equação do Balanço Hídrico

A equação do balanço hídrico de um reservatório pode ser dada por

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - \frac{A_{t+1} + A_t}{2} E - M - S_t$$

$$S_t = \max(B - K; 0)$$

Com

$$B = Z_t + I_t - \frac{A_{t+1} + A_t}{2} E - M$$

Onde:

Z_t = volume armazenado no início do ano t;

I_t = volume afluente ao reservatório durante o ano t;

A_t = área do espelho d'água no início do ano t;

E = lâmina evaporada durante o ano t, suposta constante ao longo dos anos;

K = capacidade do reservatório;

S_t = volume perdido por sangria durante o ano t.

Representando-se a bacia hidráulica por

$$Z(h) = \alpha \cdot h^3 \quad \text{e} \quad A(h) = 3 \cdot \alpha \cdot h^2,$$

h - altura d'água α - fator de forma (obtido por regressão entre z e h^3)

Supondo um modelo mutuamente exclusivo com volume contínuo e uma série de vazões afluentes com uma extensão de 2000 anos seguindo uma distribuição Gamma de 2 parâmetros, pode-se resolver a equação de balanço hídrico segundo o processo descrito por CAMPOS (1990) [CAMPOS, J.N.B. 1990, REGULARIZAÇÃO DE VAZÕES EM RIOS INTERMI-TENTES. TESE PARA CONCURSO DE PROF. TITULAR. UFC.], a saber:

1. Estabelece-se um valor inicial para a retirada M ;
2. Considera-se um volume inicial igual $\text{MIN}(0,5 K; 0,5 \mu)$;
3. Calcula-se

$$Z_U = Z_t + I_t \quad \text{p/ } Z_t + I_t \leq K$$

$$Z_U = K \quad \text{caso contrário}$$

$$D_S = \text{MAX}(Z_t + I_t - K; 0)$$

Onde Z_U é o volume armazenado no final da estação e D_S o volume sangrado no ano t ;

4. Calcula-se o volume no fim da estação seca (início do próximo ano) por;

a) divide-se M e E em L partes (no caso $L=6$);

b) retirada da reserva, se disponível, de M/L

ATUALIZAÇÃO DO VOLUME ARMAZENADO

$$Z_2 = Z_1 - M / L \quad \text{se } Z_1 - M / L > Z_{MIN}$$

$$Z_2 = Z_{MIN} \quad \text{caso contrário (ANO FALHO)}$$

$$Z_{MIN} = MAX(0,05.K;0,20.\mu)$$

VOLUME UTILIZADO

$$D_M = Z_1 - Z_2$$

ATUALIZAÇÃO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

$$h_2 = \left(\frac{Z_2}{\alpha} \right)^{1/3}$$

c) retirada da reserva, se disponível, de E/L

ATUALIZAÇÃO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

$$h_3 = h_2 - E / L \quad \text{se } h_2 - E / L \geq 0$$

$$h_3 = 0 \quad \text{caso contrário}$$

ATUALIZAÇÃO DO VOLUME ARMAZENADO

$$Z_3 = \alpha . h_3^3$$

VOLUME UTILIZADO

$$D_E = Z_3 - Z_2$$

d) retorna-se a b) até completar as L fases da integração.

5. Prossegue-se com os passos 3 e 4 até que se complete os 2000 anos da série gerada, totalizando os volumes evaporado, sangrado e liberado;

6. Concluído os 2000 anos, verifica-se se a frequência de falha está entre 9,95 e 10,05 %, ou se o erro em retirada é menor do que 0,5 unidades. Caso afirmativo aceita-se o valor de M, caso contrário atribui-se novo valor de M e retorna-se a 1.

7.2.2 - O Diagrama Triangular de Regularização

O método do Diagrama Triangular baseia-se no balanço de massas de um reservatório para um período longo:

$$\sum I = \sum M + \sum S + \sum E + Z$$

Onde $\sum I$, $\sum M$, $\sum S$, $\sum E$ representam as somas dos volumes afluente, retirado, sangrado e evaporado, enquanto Z representa a diferença entre os volumes final e inicial do reservatório. Dividindo-se a equação de balanço de massas acima por N, sendo N suficientemente grande, obtém-se:

$$\mu = E \{M\} + E \{S\} + E \{E\}$$

Onde $E \{.\}$ representa o operador valor esperado e μ o deflúvio afluente médio. Pela última equação verifica-se que o volume afluente divide-se em três componentes, o que sugere o uso do Diagrama Triangular para estabelecer como esta divisão se processa em função dos parâmetros estatísticos dos deflúvios e das características do reservatório (CAMPOS, 1990).

7.3 - RESULTADOS

As características do escoamento estabelecidas no PERH (1990) foram utilizadas aqui para a geração de séries sintéticas de vazão, a saber:

- lâmina média escoada: 202 mm

- volume afluente médio escoado (μ): 66.058.040 m³

O coeficiente de variação de CV = 1,1 foi adotado com base no valor indicado por CAMPOS et al. (1995).

Para aplicação dos dois métodos faz-se necessário a determinação do fator de forma α , lâmina evaporada e fator adimensional de evaporação e capacidade. No caso do fator adimensional de capacidade, este é variável uma vez que se pretende analisar o ganho na regularização em função do aumento da capacidade. Assim, para o açude Trairi tem-se:

$$\alpha = 10649$$

$$E_L = 0,80 \cdot (158+191+221+225+220+205) = 976 \text{ mm (evaporação na estação seca)}$$

$$f_E = 3\alpha^{1/3} E_L / \mu^{1/3} = 0,16,$$

e para o açude a montante do Trairi tem-se:

$$\alpha = 3000$$

$$E_L = 0,80 \cdot (158+191+221+225+220+205) = 976 \text{ mm (evaporação na estação seca)}$$

$$f_E = 3\alpha^{1/3} E_L / \mu^{1/3} = 0,13$$

No Quadro 7.1 apresenta-se o percentual e seu valor correspondente dos volumes regularizados, evaporados e sangrados para o reservatório a montante do açude Trairi.

Quadro 7.1 – Volumes evaporado, sangrado e liberado, vazão regularizada com 90% de garantia para o açude a montante do Açude Trairi.

K (hm ³)	Fk=K/μ	%LIB	LIB (hm ³ /ano)	%EV	EV (hm ³ /ano)	%SG	SG (hm ³ /ano)	Q90 (m ³ /s)	M90 (hm ³ /ano)
24	0,71	26,43	8,905	7,03	2.368	66,55	22,426	0,297	9,363

No Quadro 7.2 apresenta-se o percentual e seu valor correspondente dos volumes regularizados, evaporados e sangrados em função de f_K (fator de capacidade = K/μ) para o açude Trairi. A Figura 7.1 apresenta as curvas de regulação para o reservatório Trairi, que nada mais é que a graficação dos valores apresentados no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 - Estudo incremental de capacidades do Reservatório Trairi

K (hm ³)	F _k =K/μ	%LIB	LIB (hm ³ /ano)	%EV	EV (hm ³ /ano)	%SG	SG (hm ³ /ano)	DM/dK	Q90 (m ³ /s)	M90 (hm ³ /ano)
16,515	0,25	10,67	7,319	4,11	2,817	85,22	58,467	-----	0,241	7,612
33,029	0,50	18,36	12,591	6,63	4,546	75,01	51,448	0,330	0,414	13,060
49,544	0,75	25,63	17,578	8,48	5,818	65,89	45,185	0,327	0,585	18,453
66,058	1,00	29,82	20,444	10,45	7,163	59,73	40,955	0,179	0,679	21,410
82,573	1,25	34,08	23,363	12,10	8,298	53,81	36,888	0,186	0,777	24,489
99,087	1,50	38,08	26,095	13,53	9,276	48,39	33,163	0,179	0,870	27,439
115,602	1,75	41,30	28,300	14,88	10,194	43,83	30,038	0,144	0,946	29,821

A análise da Figura 7.1 e dos dados apresentados no Quadro 7.2 sugere que a faixa de volumes estudada está bem aquém da hidrológicamente possível, fato este refletido pelo baixo fator de capacidade ($f_k < 1,75$). Entretanto, a topografia do eixo barrável impede a análise para maiores fatores de capacidade, o que nos leva a escolha do volume em torno de 58,8 hm³ ($f_k = 0,89$) pelas condições físicas do local, correspondente a cota de 30,5 m (cota de coroamento = 34 m). Para esta capacidade o reservatório regulariza cerca de 28,8% do volume afluente médio anual, ou em termos de volume, 20,1 hm³/ano, conforme a resolução direta da equação do balanço hídrico. Este volume regularizado anualmente corresponde a uma vazão regularizada com 90% de garantia de 0,638 m³/s.

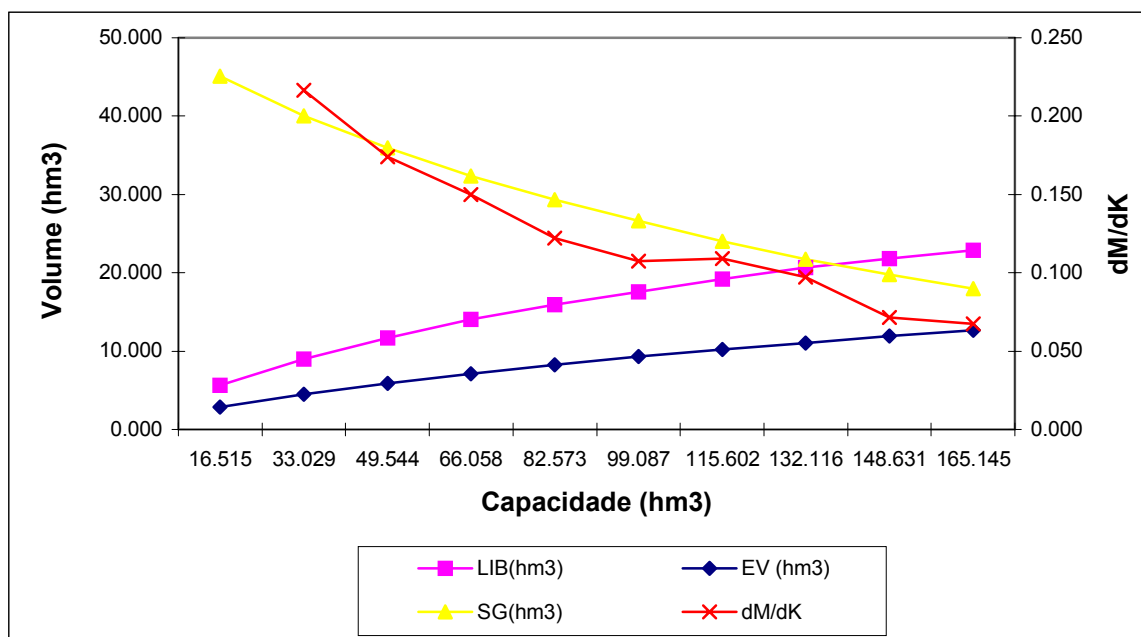


Figura 7.1 - Curvas de Regulação do Reservatório Trairi – Resolução direta da equação do balanço hídrico.

Utilizando-se o método do Diagrama Triangular de Regularização com $f_E = 0,16$, $f_K = 0,89$ e $CV = 1,1$, obtém-se um volume de $19,48 \text{ hm}^3$ regularizado anualmente, ou em termos de vazão, $Q_{90} = 0,618 \text{ m}^3/\text{s}$. Este valor está bem próximo ao valor obtido pela solução direta da equação do balanço hídrico (Quadro 7.2). A Figura 7.2 apresenta o Diagrama Triangular ($CV = 1,1$) e nele o caso da Barragem Trairi.

Quadro 7.2 - Distribuição do volume afluyente e Q_r (90%) para a Barragem Trairi

Equação do Balanço Hídrico			
LIB - %	SG - %	EV - %	Q_r 90%
19,190 – 28,0%	42,806 – 62,4%	6,575 – 9,6%	0,638
Diagrama Triangular de Regularização (sem interferência do açude de montante)			
19,487 – 29,5%	40,626 – 61,5%	5,945 – 9,0%	0,618

EV - Volume Evaporado (hm^3/ano) SG - Volume Sangrado (hm^3/ano)
 LIB- Volume Liberado (hm^3/ano) Q_r 90% - Vazão regularizada com 90% de garantia (m^3/s)

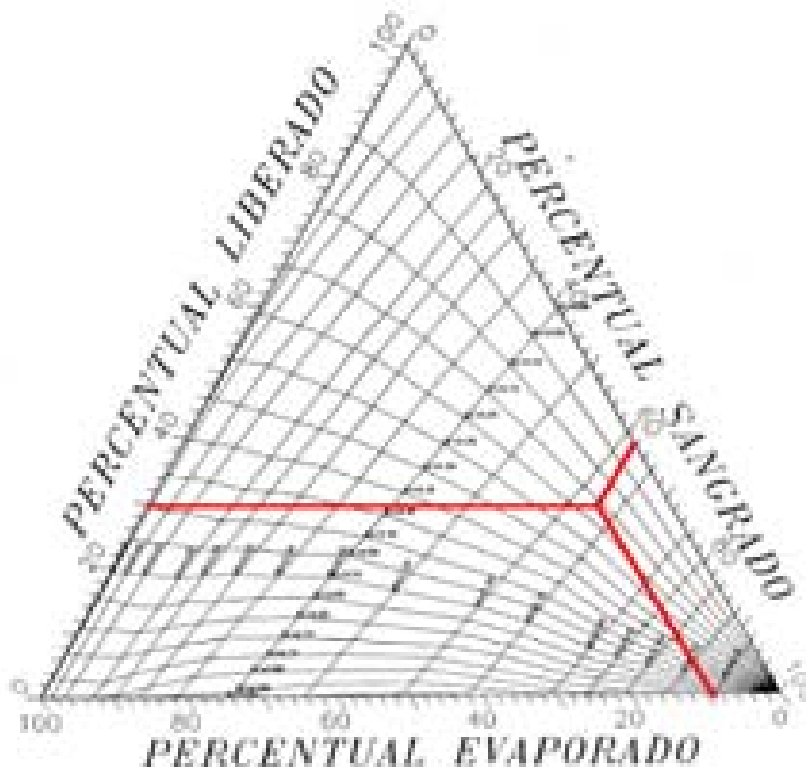


Figura 7.2 – Diagrama Triangular de Regularização aplicado a Barragem de Trairi sem levar em consideração a interferência do açude de montante.

8 - DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO

8 - DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO

8.1 - INTRODUÇÃO

O presente capítulo reúne os resultados dos estudos hidrológicos e dados de custos da barragem Trairi, com vistas a dar suporte à decisão sobre a capacidade de acumulação da mesma.

8.2 - ESTUDOS HIDROLÓGICOS

O capítulo 7 demonstrou que faixa de volumes estudada está bem aquém da hidrológicamente possível, fato este refletido pelo baixo fator de capacidade ($f_K < 1,75$). Entretanto, a topografia do eixo barrável impede a análise para maiores fatores de capacidade, o que nos leva a escolha do volume em torno de $58,8 \text{ hm}^3$ ($f_K = 0,89$) pelas condições físicas do local, correspondente a cota de 30,5 m (cota de coroamento = 34 m). Para esta capacidade o reservatório regulariza cerca de 28,8% do volume afluente médio anual, ou seja, $20,1 \text{ hm}^3/\text{ano}$, conforme a resolução direta da equação do balanço hídrico. Este volume regularizado anualmente, corresponde a uma vazão regularizada com 90% de garantia de $0,638 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.3 - ANÁLISE ECONÔMICA

Para facilitar a escolha da capacidade da barragem foi elaborado um gráfico contendo as seguintes informações:

- variação do custo anual do m^3 de água acumulada em função da cota de soleira do reservatório para um período de 30 anos à uma taxa de 8%;
- variação do custo anual do m^3 de água regularizada com 90% de garantia, em função da cota de soleira do reservatório, para um período de 30 anos à uma taxa de 8%;
- variação do ganho em unidades de volume regularizado por unidade de volume acrescido na capacidade do reservatório (dM/dK);

A análise dos resultados da Figura 8.1 mostra que:

- o custo anual do m^3 regularizado variou entre R\$ 0,037 (cota 31 m) e R\$ 0,032 (cota 34 m).
- o custo anual do m^3 de acumulação variou entre R\$ 0,008 (cota 31 m) e R\$ 0,006 (cota 34 m).

8.4 - ESCOLHA DA CAPACIDADE DO RESERVATÓRIO – ANÁLISE HIDROLÓGICO-ECONÔMICA

Apesar de tanto o custo anual do m^3 regularizado como também de custo anual do m^3 acumulado terem uma tendência negativa ao aumentarmos a cota da soleira de 31 para 34 m, existem limitantes topográficos que determinaram a escolha da cota da soleira. Assim, considerando os aspectos hidrológico-econômicos e os limitantes topográficos (cota de coroamento no máximo = 34 m) sugere-se a adoção da cota de soleira = 30,5 m (volume de armazenamento = $58,8 \text{ hm}^3$).

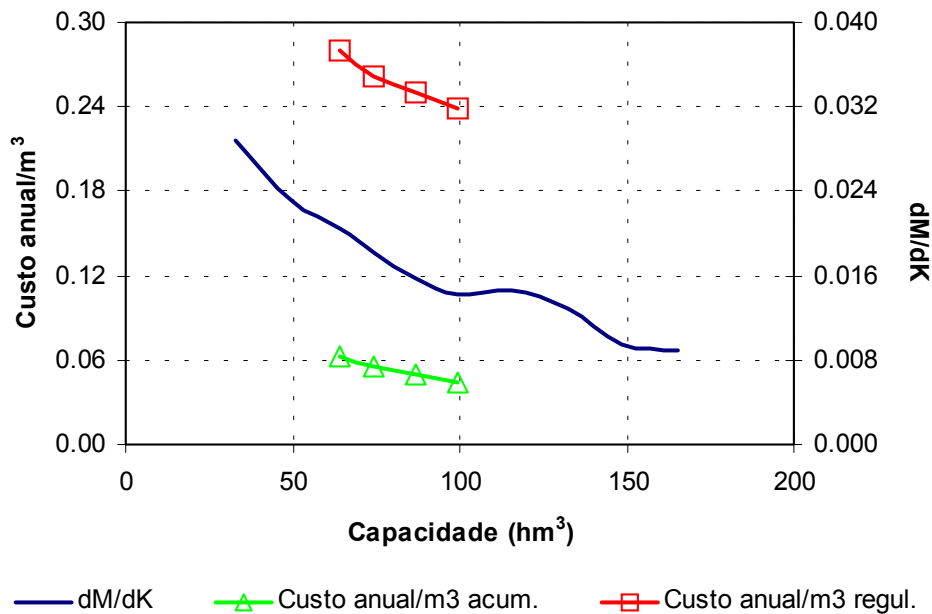


Figura 8.1. Análise hidrológico-econômica para seleção da capacidade da barragem Trairi.

9 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO

9 - DIMENSIONAMENTO DO SANGRADOURO

Uma vez realizado o dimensionamento do reservatório com base nos estudos hidrológicos e econômicos do capítulo anterior, faz-se necessário agora o dimensionamento do sangradouro visando a definição de sua largura, seu tipo e a cota de coroamento da barragem associada à alternativa adotada.

No dimensionamento do sangradouro foi adotada a cheia associada ao tempo de retorno de 1.000 anos, realizando-se para esta os estudos de laminação, e será determinada a cota de coroamento da barragem com base na cheia associada a 10.000 anos, para garantir o não galgamento nesta cheia.

Não havia marcas de cheias históricas no local da barragem, o que impossibilitou o uso desta informação.

Com base nestes princípios, apresenta-se neste capítulo o dimensionamento do sangradouro.

9.1 - PROPAGAÇÃO DA CHEIA NO RESERVATÓRIO

Técnicas de propagação em reservatórios são baseadas no conceito de armazenamento, sendo o método de Puls um dos mais conhecidos para propagação em reservatórios. Este método consiste em uma expressão discretizada da equação de continuidade concentrada e na relação entre vazão e armazenamento.

A equação discretizada da continuidade é dada por

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t + I_{t+1}}{2} - \frac{Q_t + Q_{t+1}}{2} \quad (1)$$

Onde I_t e I_{t+1} = vazões afluentes ao reservatório em t e $t+1$; Q_t e Q_{t+1} = vazões de saída ao reservatório em t e $t+1$; S_t e S_{t+1} = armazenamento em t e $t+1$; Δt = intervalo de tempo. As incógnitas Q_{t+1} e S_{t+1} podem ser colocadas em um mesmo lado, resultando em

$$Q_{t+1} + 2 \cdot \frac{S_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} - Q_t + 2 \cdot \frac{S_t}{\Delta t} \quad (2)$$

Conhecendo-se a função $Q = f(S)$, constrói-se uma função $Q = h(Q + 2S/\Delta t)$, resultando no seguinte processo de cálculo:

1. determinação do volume inicial S_0 (conforme objetivo do estudo), e a partir deste, determina-se Q_0 ;
2. cálculo do termo direito da equação 2, uma vez que o hidrograma de entrada foi determinado pelo método do hidrograma unitário do SCS;
3. com este valor $(Q_{t+1} + 2.S_{t+1}/\Delta t)$ é possível obter Q_{t+1} através de $Q = h(Q + 2S/\Delta t)$ e S_{t+1} através de $S_{t+1} = f^{-1}(Q_{t+1})$;
4. repete-se 2 e 3 para todos intervalos de cálculo.

O vertedouro é do tipo perfil creager, sendo o seu coeficiente de descarga adotado 2,1, ficando sua equação característica:

$$Q = 2,1 L (Z - Z_w)^{1.5}.$$

9.2 - RESULTADOS

Uma vez escolhida a dimensão do açude, elaborou-se o estudo de laminação para a cheia de 1.000 anos, para dimensionamento do sangradouro, e para a cheia de 10.000 anos, visando garantir que a barragem não seja galgada nesta cheia, servindo assim para a definição da cota de coroamento da barragem.

Os picos dos hidrogramas de entrada e saída, a cota e altura da lâmina vertida encontram-se no Quadro 9.1, usando-se como hidrograma de projeto aquele associado ao tempo de retorno de 1.000 e 10.000 anos. A Figura 9.1 abaixo mostra para o tempo de retorno $T_r=1.000$ anos, o hietograma de projeto, o hidrograma de entrada e o de saída ao reservatório Trairi. Os resultados para o tempo de retorno de 10.000 anos são apresentados na Figura 9.2.

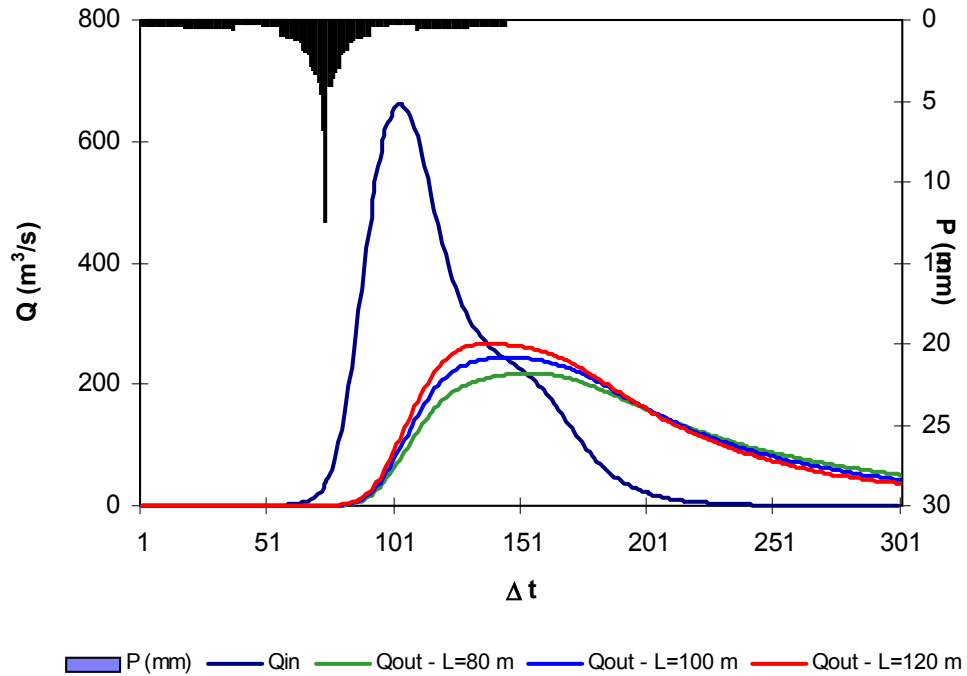


Figura 9.1 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Trairi - Tr=1000 anos. Perfil Creager. Cota 30.5 m. L = 80, 100 e 120.

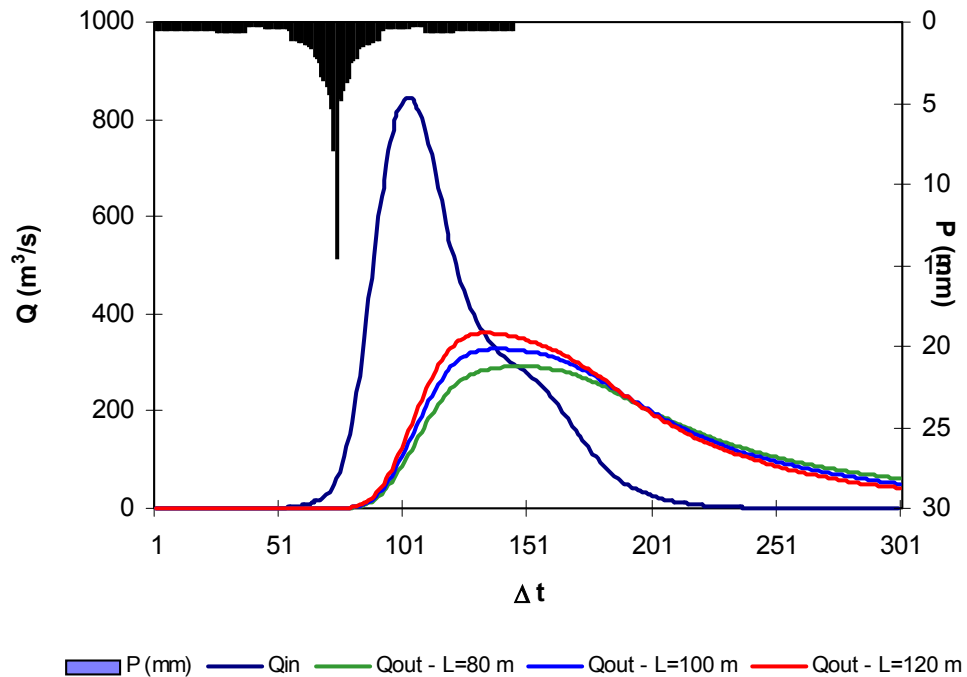


Figura 9.2 - Hidrogramas de Entrada e de Saída do Reservatório Trairi - Tr=10000 anos. Perfil Creager. Cota 30.5 m. L = 80, 100 e 120.

Quadro 9.1 - Resultado da simulação acima descrita

L (m)	Q_{out} (m³/s)	Cota (m)	Lâmina (m)
Perfil Creager: Z_w = 30.5 m			
Tr = 1.000 anos - Q_{in} = 661 m³/s			
80	218	31,7	1,2
100	243	31,6	1,1
120	267	31,5	1,0
Tr = 10.000 anos - Q_{in} = 845 m³/s			
80	292	31,9	1,4
100	328	31,8	1,3
120	361	31,8	1,3

L = Largura do Sangradouro

Z_w = cota da soleira do sangradouro

Q_{in} = Vazão afluente ao reservatório

Q_{out} = Vazão de saída (sangradouro)

10 - ESTUDOS ADICIONAIS

10 - ESTUDOS ADICIONAIS

10.1 - INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta alguns estudos adicionais visando identificar as características do açude Trairi quanto a: probabilidade de enchimento, probabilidade de esvaziamento e assoreamento.

10.2 - PROBABILIDADES DE ENCHIMENTO E ESVAZIAMENTO - EQUILÍBRIO

Neste tópico foi utilizada a teoria de Matriz de Transição para cálculo da probabilidade de esvaziamento e enchimento em equilíbrio. Para tanto, foi utilizada a formulação proposta pelo Prof. Nilson Campos (Campos, J.N.B., A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under high evaporation rates, PhD Thesis, Colorado State University, Fort Collins, 1987, pp. 133.)

Também foi realizada a análise probabilística de esvaziamento e de enchimento na fase de equilíbrio. A última análise mostra que, no equilíbrio, em cerca de 40% dos anos ocorre sangria para uma retirada anual de 50 hm³. A Figura 10.1 apresenta as duas curvas probabilísticas de esvaziamento e enchimento. Nesta Figura pode-se observar que para uma retirada igual a 20 hm³/ano tem-se uma probabilidade de esvaziamento na fase de equilíbrio próximo de 10%, o que implica em uma garantia de 90%.

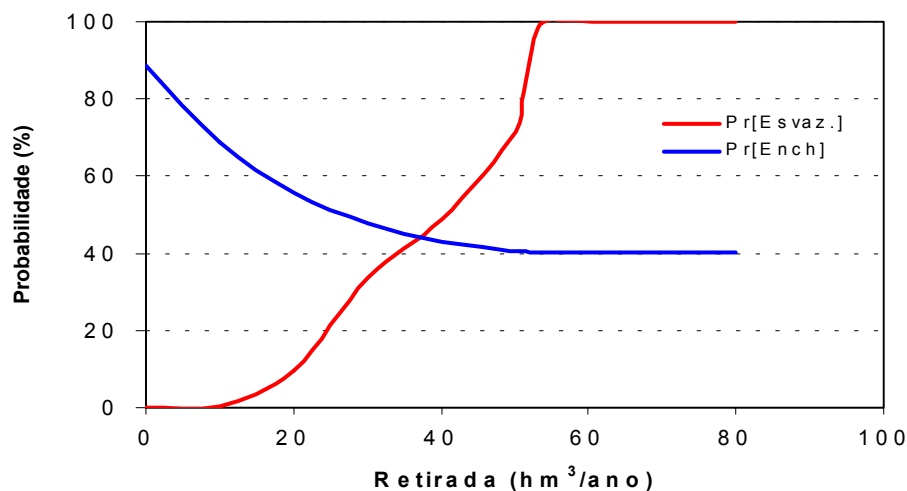


Figura 10.1. Probabilidades de esvaziamento e enchimento do açude Trairi.

10.3 - ASSOREAMENTO DO AÇUDE TRAIRI

O assoreamento de um reservatório ao longo da sua vida útil é inevitável porquanto a erosão e o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica são processos naturais que, com a formação do lago, sofrem interferência no seu equilíbrio. O menor ou maior grau de assoreamento a que estará sujeito o reservatório depende de vários fatores onde se podem destacar, aqueles inerentes à hidrologia da bacia hidrográfica, capacidade de armazenamento do açude frente ao volume afluente, conformação geométrica da bacia hidráulica e a composição dos sedimentos.

A composição média dos sedimentos adotada, baseada nos tipos predominantes de solos, foi 10% de Argila, 11% de Silte e 79% de Areia. A partir destas características e outros dados da bacia (área da bacia, volume afluente médio anual, precipitação média anual da bacia e precipitação do mês mais chuvoso) foram utilizadas fórmulas empíricas para cálculo dos seguintes parâmetros para utilização da metodologia de Veiga (1993) para previsão do assoreamento do reservatório.

Peso específico aparente inicial - γ_i (t/m ³):	1,409
Coefficiente de consolidação médio - K :	0,017
Descarga sólida média (t/ano):	212897
Descarga sólida média específica (t/km ² /ano):	651,02
Razão de transporte ("delivery ratio") – T	0,12

A estimativa do volume assoreado e, conseqüentemente, do volume efetivo ou útil do reservatório ao longo do tempo é feita através da simulação simplificada da operação do reservatório em intervalos Δt igualmente espaçados durante um tempo suficientemente longo. O açude Trairi foi simulado durante 100 anos com Δt igual a 10 anos. O Quadro 10.1 apresenta os valores obtidos de acordo com a metodologia de Veiga (1993). A tabela mostra o acompanhamento, a cada intervalo de simulação, das variáveis utilizadas bem como do sedimento acumulado e do volume efetivo. Foi assim obtido um volume final ao período de 100 anos de 44,42 hm³, havendo uma redução de 24,5% no volume útil do açude Trairi, o qual era inicialmente de 58,8 hm³. Deve-se ressaltar entretanto que a aplicabilidade desta metodologia ao semi-árido não foi verificada face a inexistência de registros de dados sedimentológicos.

Quadro 10.1 - Simulação do assoreamento do reservatório ao longo do tempo

Período Parcial (anos)		Volume inicial (hm ³)	Volume/ μ	Er	γ_r (t/m ³)	Sedimento Período (10 ³ t)	Sedimento Acumulado (hm ³)	Volume Efetivo ou útil (hm ³)
0	10	58,800	0,890	0,968	1,420	2060,0	1,451	57,349
10	20	57,349	0,868	0,967	1,424	2059,3	2,896	55,904
20	30	55,904	0,846	0,967	1,427	2058,6	4,339	54,461
30	40	54,461	0,824	0,967	1,429	2057,8	5,779	53,021
40	50	53,021	0,802	0,966	1,430	2057,1	7,217	51,583
50	60	51,583	0,780	0,966	1,432	2056,2	8,653	50,147
60	70	50,147	0,759	0,965	1,433	2055,3	10,088	48,712
70	80	48,712	0,737	0,965	1,434	2054,4	11,521	47,279
80	90	47,279	0,715	0,965	1,434	2053,4	12,952	45,848
90	100	45,848	0,694	0,964	1,435	2052,4	14,382	44,418

Veiga Lopes, Ayde, Aplicação de Métodos de Previsão de Assoreamento de Reservatórios. Dissertação de Mestrado, Campinas, SP (1993).

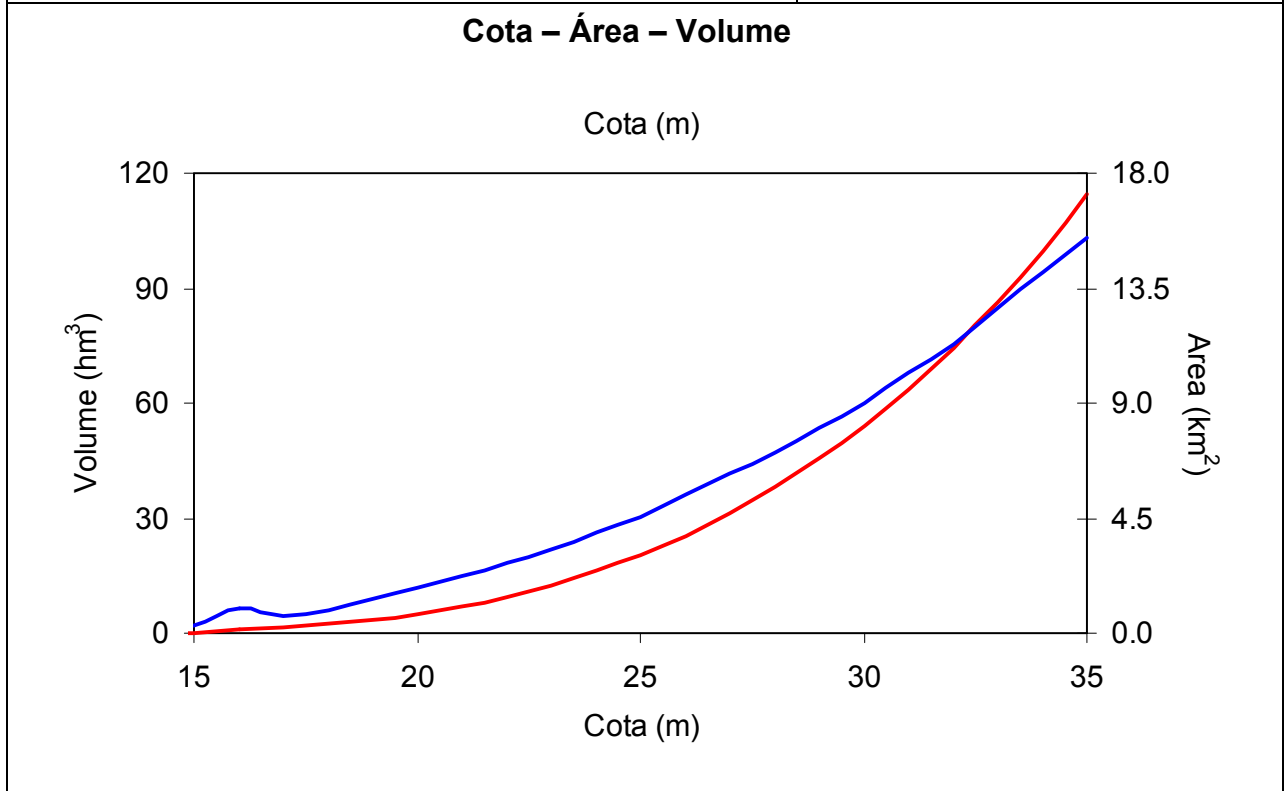
SUMÁRIO TÉCNICO DOS ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Caracterização da Bacia	
Área da bacia do Açude Trairi	327,02 km ²
Perímetro da bacia do Açude Trairi	81,7 km
Declividade Média da bacia do Açude Trairi	5,85 m/km
Comprimento do rio principal	31,85 km
Fator de compacidade	1,31
Fator de forma	0,32
Tempo de concentração	7,25 hrs

Síntese Hidroclimatológica	
Pluviometria média anual	1150,5 mm
Evaporação média anual	1914,7 mm
Evapotranspiração Potencial (Hargreaves)	1853,8 mm
Insolação média anual	2416,6 h
Umidade relativa média anual	67,9 %
Temperatura média anual: média das máximas	33,3 °C
Temperatura média anual: média das médias	26,6 °C
Temperatura média anual: média das mínimas	22,0 °C
Classificação climática segundo Köppen	BWx'
Classificação climática segundo Thornthwaite	C1SA'a'

Estudo de Cheias	
Precipitação Efetiva	SCS
Propagação do Escoamento na Bacia	Hidrograma Unitário do SCS
CN	75
Vazão afluyente – Tempo de retorno = 1000 anos	661 m ³ /s
Vazão afluyente – Tempo de retorno = 10000 anos	845 m ³ /s

Capacidade do Reservatório	
Capacidade máxima	58,8 hm ³
Cota da soleira do sangradouro	30,5 m
Cota de coroamento	34,0 m
Custo anual do m ³ armazenado	0,009 R\$/ano
Custo anual do m ³ regularizado	0,004 R\$/ano



Capacidade de Regularização			
<i>Resolução Direta da Equação do Balanço Hídrico – Cota 30,5 m</i>			
Regularizado - % (hm ³ /ano)	Sangrado - % (hm ³ /ano)	Evaporado - % (hm ³ /ano)	Qr 90% (m ³ /s)
19,190 – 28,%	42,806 – 62,4%	6,575 – 9,6%	0,638

Dimensionamento do Sangradouro – Perfil Creager – Cota soleira 30,5 m			
Largura (m)	Cota de pico (m)	Lâmina (m)	Q_{out} (m³/s)
Tr = 1.000 anos - Q_{in} = 661 m³/s			
80	218	31,7	1,2
100	243	31,6	1,1
120	267	31,5	1,0
Tr = 10.000 anos - Q_{in} = 845 m³/s			
80	292	31,9	1,4
100	328	31,8	1,3
120	361	31,8	1,3

Estudos Adicionais	
<i>Probabilidade Esvaziamento/Enchimento</i>	
Demanda a partir da qual a probabilidade de esvaziamento é de 100%	54 hm ³ /ano
Demanda a partir da qual a probabilidade de enchimento é de 40,2%	54 hm ³ /ano
<i>Assoreamento</i>	
Volume final após 100 anos de simulação	44,42 hm ³
% assoreado	24,5 %
Descarga sólida média	212897 t/ano

ÁREA(m²)	COTA
-	79
5.371,00	80
12.536,00	81
49.754,00	82
114.339,00	83
199.549,00	84
311.523,00	85
422.985,00	86
590.481,00	87
750.203,00	88
890.834,00	89
1.061.998,00	90
1.180.511,00	91
1.292.000,00	92
1.441.689,00	93
1.647.543,00	94
1.781.960,00	95
1.933.957,00	96
2.027.896,00	97
2.132.312,00	98
2.229.843,00	99
2.356.594,00	100
2.443.123,00	101
2.531.220,00	102
2.706.036,00	103
2.790.972,00	104
2.875.132,00	105
2.972.384,00	106
3.240.173,00	107
3.363.091,00	108
3.459.715,00	109
3.550.515,00	110

