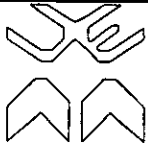


EXT. R. 55  
55



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL**

21489

**TESE DE LICENCIATURA**

**TEMA:**

A relação entre o caudal do rio e a área de inundação na bacia hidrográfica do rio  
Limpopo

Estudante: Albertino Thenesse Sinate

Supervisores: Prof. Doutor Roland Brower

Prof. Doutor Rui Brito

Maputo, Outubro de 2002

EXT. R. LG

*Tese de Licenciatura:  
Relação entre o caudal do rio e área inundada*

---

**Dedicatória**

Dedico aos meus pais, Thennesse Sinate e Laurinda Colher que com muito esforço fizeram que este dia se tornasse uma realidade.

### **Agradecimentos**

Aos professores, Doutores Roland Brower e Rui Brito, de que tive o privilégio de ser tutorado, o meu agradecimento.

Aos técnicos, Pedro Machado e Orlando da FAEF, a quem presto agradecimentos por terem me apoiado durante a realização do trabalho de campo até a elaboração do relatório.

Ao técnico Egídio Florindo João da HICEP, quem me orientou a realização do trabalho de campo.

À DNA, ARA-Sul, HICEP, INIA, MICOA e outras instituições vai o meu agradecimento pela paciência que tiveram em autorizar a consulta bibliográfica e outras informações necessárias.

Ao estudante Richard van der Lelie, quem me ajudou na recolha de todos os dados necessários, na interpretação de certos artigos importantes para o meu trabalho de licenciatura, para ele vai um grande abraço.

Ao meu colega e amigo Avêncio Matenga que sempre esteve ao meu lado desde a parte curricular até a elaboração do relatório final, um grande abraço.

Ao Eng<sup>o</sup> Assane Amade que sempre impulsionou-me para a concretização deste sonho.

Ao meu colega Revés Meneses que juntos perdemos tantas noites nos estudos.

## Índice geral

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	1
1.2 OBJECTIVOS.....	2
1.3 A ÁREA DE ESTUDO .....	3
2. CARACTERÍSTICAS DA BACIA .....	6
2.1 LOCALIZAÇÃO .....	6
2.2 GEOLOGIA .....	8
2.3 CLIMA.....	9
2.4 A REDE HIDROGRÁFICA .....	10
2.5 INFRA-ESTRUTURAS DE PROTECÇÃO.....	11
2.6. A CHEIA DE 2000.....	13
3. MODELOS.....	15
3.1. MODELOS DE CÁLCULO DOS CAUDAIS.....	15
3.2 PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA DE CAUDAIS EXTREMOS .....	22
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 DADOS NECESSÁRIOS .....	27
4.2 MÉTODO DA RECOLHA DOS DADOS.....	27
4.3 MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS .....	29
4. RESULTADOS.....	30
4.1 A HIDROLOGIA DA BACIA DO LIMPOPO NA CHEIA 2000 .....	30
4.2. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO .....	30
4.3. CÁLCULO DO CAUDAL DE CHEIA 2000.....	31
4.4. CALIBRAGEM DO COEFICIENTE DE CHÉZY C .....	34
4.5. PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE CAUDAIS EXTREMOS .....	37
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	40
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	42

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>Pág.</b>
Tabela 1: Ocupação das áreas de regadio de Chókwè.	4
Tabela 2: Subdivisão da bacia do rio Limpopo.	6
Tabela 3: Área das sub-bacias do Limpopo mais importantes em Moçambique.	8
Tabela 4: Precipitação média anual em alguns pontos ao longo da bacia.	10
Tabela 5: Níveis e caudais máximos registados nas quatro ondas das cheias de 2000.	13
Tabela 6: Dia e horas de registo das quatro ondas de cheia.	14
Tabela 7: Equações das curvas de vazão nas estações do rio Limpopo em Moçambique.	17
Tabela 8: Tempo de Leitura recomendado do equipamento.	28
Tabela 9: Informação hidrológica da bacia do Limpopo.	30
Tabela 10: Caracterização de alguns pontos chaves da bacia.	31
Tabela 11: Caudais de cada secção do corte transversal da bacia em E-35.	32
Tabela 12: Caudais de cada secção do corte transversal da bacia em E-372.	33
Tabela 13: Calibragem de C para secção transversal de Chókwè E-35.	34
Tabela 14: Calibragem de C para secção transversal de Macarretane E-372.	34
Tabela 15: Caudais e larguras de cheias registadas no Limpopo na E-35.	35
Tabela 16: Análise de frequências de caudais extremos.	38
Tabela 17: A relação entre picos de cheias e a largura de inundação	38
<b>Lista de figuras</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1: Localização da área de estudo	5
Figura 2: Localização da bacia hidrográfica do Limpopo na África Austral.	7
Figura 3: Esquema de aproximação do modelo de Jansen.	17
Figura 4: Divisão do corte transversal da bacia em secções homogéneas.	18
Figura.5: Exemplo de secções homogéneas num corte transversal da bacia.	21
Figura 6: Histograma e curva de densidade de frequências	25

<b>Lista de gráficos</b>	<b>Pág.</b>
<b>Gráfico 1:</b> A relação entre o nível hidrométrico $h$ e o caudal $Q$ na E-35.	36
<b>Gráfico 2:</b> Curvas de vazão dadas pelos dois modelos (ARA-Sul e de Jansen) na e-35.	37
<b>Gráfico 3:</b> Correlação dos dois modelos de cálculo de caudais de cheia na E-35.	37
<b>Lista de equações</b>	<b>Pág.</b>
1. Caudal de um rio pela equação de Manning-Stricker	15
2. Equação de Chézy para determinar caudais dum rio	15
3. Expressão geral e analítica da curva de vazão	16
4. Estimativa de caudais para a elaboração da curva de vazão	16
5. Caudal total da secção dum ri na elaboração da curva de vazão	16
6. Determinação do parâmetro $b$ da equação 3	17
8. Caudal dum rio no seu leito normal (Jansen)	19
9. Caudal da planície inundada (Jansen)	19
10. Caudal de cheia	19
11. Caudal da subsecção da bacia de um rio	20
12. Área molhada numa secção transversal da bacia	20
13. Caudal de cheia para calibrar $C$	20
14. Estimativa de $C$	21
15. Cálculo de $C$ para as secções da bacia	21
16. Determinação do período de retorno	23
17. Expressão geral da probabilidade	24
18. Caudal médio logaritmizado	24
19. Desvio padrão logaritmizado	24
20. Coeficiente de assimetria	25
21. Determinação da magnitude de cheia dado o período de retorno	25
22. Cálculo de $K_T$	25
23. Determinação da variável normal $Z$	26
24. Determinação da variável intermediária $w$ .	26

**Lista de abreviaturas**

- ARA-Sul:** Administração Regional de Águas de Sul
- D50, D48:** Postos udométricos n.º 50 e 48
- DINAGECA:** Direcção Nacional de Geografia e Cadastro
- GDOP:** *Geometric Dilution Of Precision*
- GIS:** Sistema de Informação Geográfica
- GPS:** *Global Positioning System*
- HICEP:** Hidráulica de Chókwè- empresa pública
- JFS:** João Ferreira dos Santos
- MICOA:** Ministério da Coordenação e Acção Ambiental
- MOHP:** Ministério das Obras Públicas e Habitação
- LOMACO:** Lonhro-Mozambique Agricultural Company.
- SEMOC:** Sementes de Moçambique
- SKI:** *Static Kinematics Software*
- SNAP:** Serviço Nacional de Agricultura e Pecuária
- UIP:** Unidade de Implementação do Projecto
- UTM:** Sistema de Coordenadas Geodésicas
- Z:** variável normal padrão
- G:** Coeficiente de assimetria
- K<sub>T</sub>:** factor de frequência
- FAEF:** Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal

<b>Lista de anexos</b>	<b>Pág.</b>
<b>Anexo 1:</b> Dados de levantamento do campo para os transectos de Chókwè e Macarretane com o GPS	1
<b>Anexo 2:</b> Determinação de altura hidrométrica $h$ para diferentes pontos nos dois transectos, tendo em conta a $h$ máxima da cheia 2000	3
<b>Anexo 3:</b> Descrição do uso de terra em termos do tipo e do uso, da vegetação em termos de estrutura e cobertura de capim na altura de observação	5
<b>Anexo 4:</b> Estimação dos coeficientes de rugosidade $k_m$ a partir das tabelas do anexo 3 e tendo comparado com a tabela de estimação de rugosidade para cursos de água naturais	11
<b>Anexo 5:</b> Níveis e caudais máximos anuais registados na bacia do limpopo na estação E-35	13
<b>Anexo 6:</b> Probabilidade de ocorrência de caudais de cheias e período de retorno	14
<b>Anexo 7:</b> Curvas de níveis para zonas de Chókwè e Macarretane	16
<b>Anexo 8:</b> Perfil transversal da bacia do Limpopo em Chókwè e Macarretane	18



## SUMÁRIO

O estudo da previsão e prevenção dos caudais das cheias é importante, pois o conhecimento profundo destes contribui para a segurança das vidas humanas e do desenvolvimento sócio-económico rural.

*obj* O objectivo geral da investigação é desenhar um mapa de riscos de inundação da bacia do Limpopo a partir das estações hidrométricas de Chókwè e de Macarretane.

Na investigação usou-se os dados históricos de níveis hidrométricos das estações de medição e as curvas de vazão para converter as alturas de água em caudais. Teve como dados do campo as cotas e as distâncias dos pontos e entre os pontos em cada transecto da secção transversal da bacia inundada do rio Limpopo. Também, foi feita a descrição da ocupação e do uso da terra na área de estudo. A série de dados de alturas de águas compreendem ao período que vai desde 1954 até 2000 para as estações E-35 e E-372 no rio Limpopo.

Os caudais de cheias no vale do Limpopo na estação de Chókwè E-35, foram determinados recorrendo os modelos das equações de curvas de vazão aplicados naquele ponto. Encontrapartida, a cheia de 2000 estava fora dos padrões e a determinação da sua magnitude foi necessário recorrer o modelo *river with floodplains* descrito por Jansen (1994) e é considerado o mais adequado nas condições topográficas da secção. Na equação de Jansen, o factor de rugosidade foi considerado o valor mínimo, tendo em conta a época em que ocorreu as cheias, em que a cobertura vegetal era maior e a hipótese de reduzir o erro de cálculo

*obj* Não foi possível cobrir na totalidade o levantamento no campo para aquilo que foi o desenho das actividades a ser desenvolvido no terreno. A informação em falta, recorreu-se as curvas de níveis da região a partir do *software Arcview GIS*. Assim, a cheia de 2000 para a estação E-35 teve como pico máximo de 10,54 metros correspondente a uma cota de 31,57 metros, um caudal de 12973 m<sup>3</sup>/s e uma largura inundada de cerca de 8770 metros. A partir da relação caudal do rio e a largura de cheia foi desenhado o mapa de inundação com ajuda do perfil da secção transversal da bacia.

A análise de período de retorno das cheias, usou-se a distribuição Pearson 3 parâmetros. A cheia de 2000 foi caracterizada por um período de retorno de 5000 anos

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Descrição do problema

A água é um recurso natural que o homem utiliza em seu benefício para vários fins, tais como: abastecimento doméstico e industrial, irrigação, pecuária, aquacultura, actividades recreativas, pesca navegação, produção de energia hidroeléctrica, etc. (Cunha *et al.*, 1980). As actividades humanas alteram os vários componentes do ciclo hidrológico (precipitação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo e evapotranspiração) e os processos geomorfológicos (erosão, transporte sólido e sedimentação) nas bacias. Isto pode causar o excesso ou deficiência da água (Partidária e Júlio, 1994).

As principais consequências de excesso da água em períodos chuvosos são as inundações que podem causar prejuízos consideráveis, tais como: destruição de infra-estruturas e campos cultivados, morte de pessoas e animais. Segundo Cunha *et al.* (1980), as inundações para além dos estragos, trazem benefícios que estão relacionados com a deposição de sedimentos fluviais sobre terrenos das margens dos cursos inferiores dos rios. Esta deposição tem acção fertilizante nos campos agrícolas praticados nelas. Um exemplo típico para realçar este fenómeno foram as cheias do rio Nilo. Antes da construção da barragem da Assuão, as inundações tinham um carácter benéfico para os habitantes agricultores (Lencastre e Franco, 1984)

Entre os meses de Fevereiro e Março do ano 2000, a região Austral de África registou-se as mais catastróficas cheias dos últimos 50 anos. A bacia do rio Limpopo foi uma das mais assoladas (Chivambo, 2000). As cheias que ocorrem no vale do Limpopo é um fenómeno de carácter cíclico; é normal a ocorrência periódica de cheias com um período de retorno de seis a sete anos. O seu efeito de inundação atinge por vezes largas proporções da bacia, principalmente depois da confluência dos rios Limpopo e dos Elefantes (Kazanov e Quemisse, 1992 citado por Conzo, 1999). Porém, a cheia de 2000 estava fora do padrão das restantes cheias registadas no vale do Limpopo. Os danos e os prejuízos gerados pela cheia 2000 foram enormes. Estimativas indicam que no sector agrário do distrito de Chókwè, dos 32.800 ha de área semeada ficaram perdidas cerca de 29.500 ha (cerca de 90%) e muito gado morreu e/ou desapareceu.

As águas que inundaram o território nacional resultaram dos altos níveis de precipitação nos países à montante (Botswana, Zimbabwe e a República da África do Sul) que ocupam cerca de 80,7% da área total da bacia (Bereslawski, 1988). Paralelamente a isso, cerca de 80% das terras húmidas na África do Sul foram usados para efeitos de urbanização, as prática de agricultura de subsistência com impacto da

destruição extensiva das florestas e a pastagem intensiva. O resultado foi um baixar da capacidade de absorção da bacia e um aumento de escoamento superficial devido a compactação dos solos (Trucatos *et. al.*, 2001)

Os prejuízos causados pelas inundações podem ser substancialmente reduzidos por meio de medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais incluem a construção de barragens para regularização do regime de caudais dos rios e os diques marginais de protecção. As medidas não estruturais consistem na delimitação de zonas nos vales destinadas a certas finalidades como a habitação e a agricultura conforme o risco de inundação. Em Moçambique quase não existem infra-estruturas de defesa contra as cheias, o que torna a população mais vulnerável a essa calamidade. As estruturas de defesas são a melhor medida, mas as obras são muito caras e o país não tem capacidade para as suportar. Da mesma maneira, existem limitações em relação aos métodos de previsão de cheias que são consequências da fraqueza da rede hidrométrica, e à definição de riscos potenciais que as cheias podem causar (Shaw, 1994).

Deste modo, surge como oportunidade de estudo, a necessidade de se aprofundar os conhecimentos na caracterização da bacia do rio Limpopo e o seu leito, com finalidades de gestão do seu sistema fluvial para situações de cheias, funcionamento do sistema de alerta e a tomada de possíveis precauções em caso de inundações causadas por cheias.

## **1.2 Objectivos**

O estudo tem como objectivo geral desenhar um mapa de riscos de inundação da bacia do Limpopo a partir das estações hidrométricas de Chókwè e de Macarretane e tem como objectivos específicos:

1. Determinar o perfil do vale de Limpopo em duas zonas, nomeadamente Chókwè e Macarretane;
2. Identificar o modelo adequado às condições em Moçambique para relacionar o caudal, altura de água e a largura da faixa inundada;
3. Determinar, com base nos registos históricos, o risco de inundação nas margens de Chókwè e Macarretane.

### 1.3 A área de estudo

O Distrito de Chókwè localiza-se na província de Gaza (figura 2), a sudoeste da margem direita do rio Limpopo, a uma distância de 100 Km da sua foz e cobrindo uma extensão de 1595 Km<sup>2</sup>, com um número total de habitantes de 200.565 (DNA, 2000). A capital do distrito (a cidade de Chókwè) fica a cerca de 220 Km a Noroeste da capital do país (Maputo) e a cerca de 100 Km da capital da província (Xai-Xai). Nele foi construída uma infra-estrutura de irrigação cobrindo uma área de cerca de 32.000 ha de terras para o uso agrícola. Segundo a mesma fonte, o distrito de Chókwè possui 13 vilas: cidade Chókwè, Macarretane, Metuba, Lionde, Conhane, Nwachicoloane, Massavassa, Muianga, Hókwè, Malhazene, Xilembene, Chiguidela e Mapai. Possui infra-estruturas industriais como a do decasque do arroz, do descarroçamento do algodão na vila de Chókwè, fábrica de leite no Lionde e outras importantes (Gomes, *et al.* 1998).

#### *Ocupação do vale de Limpopo*

O Distrito de Chókwè é basicamente agrário com uma área agrícola a rondar os 80 mil hectares dos quais cerca de 40% da área cultivada, perfazendo um total de 32.000 hectares são irrigadas por um sistema de gravidade sob gestão da empresa pública HICEP e também por um grupos de motobombas.

A produção agrícola está distribuída em explorações familiares que é dos pequenos agricultores e explorações empresariais que é dos médios e dos grandes produtores. Os pequenos agricultores têm, em geral uma área agrícola de 3 hectares e em média 1 hectare, ocupando menos da metade da terra agrícola do distrito. A agricultura empresarial, desenvolvida em unidades que variam de 4 a 200 hectares é explorada por cerca de 900 agricultores e ocupam cerca de 30% da área agrícola.

Este distrito possui o maior regadio do país (25000 ha)<sup>1</sup>, dos quais cerca de 10.000 ha estão actualmente distribuídos a pequenos camponeses. A restante área é ocupada pelo sector privado empresarial, distribuído por unidades com áreas variando de 50 a 200 hectares (tabela 1). O regadio de Chókwè estende-se sobre um comprimento de 8 km à montante do açude de Macarretane e 50 Km a jusante deste ao longo do rio Limpopo (Gomes, *et al.* 1998).

Fazem parte das companhias comerciais a LOMACO, SEMOC e JFS. A LOMACO tem parcelas destinadas à produção de milho e vegetais e outras à produção do algodão no tempo quente. A

---

<sup>1</sup> A área em exploração no período em que se fez o estudo (1998).

agricultores locais. JFS produz milho e algodão. As especificações de categoria, os utentes e área explorada estão numeradas na tabela 1.

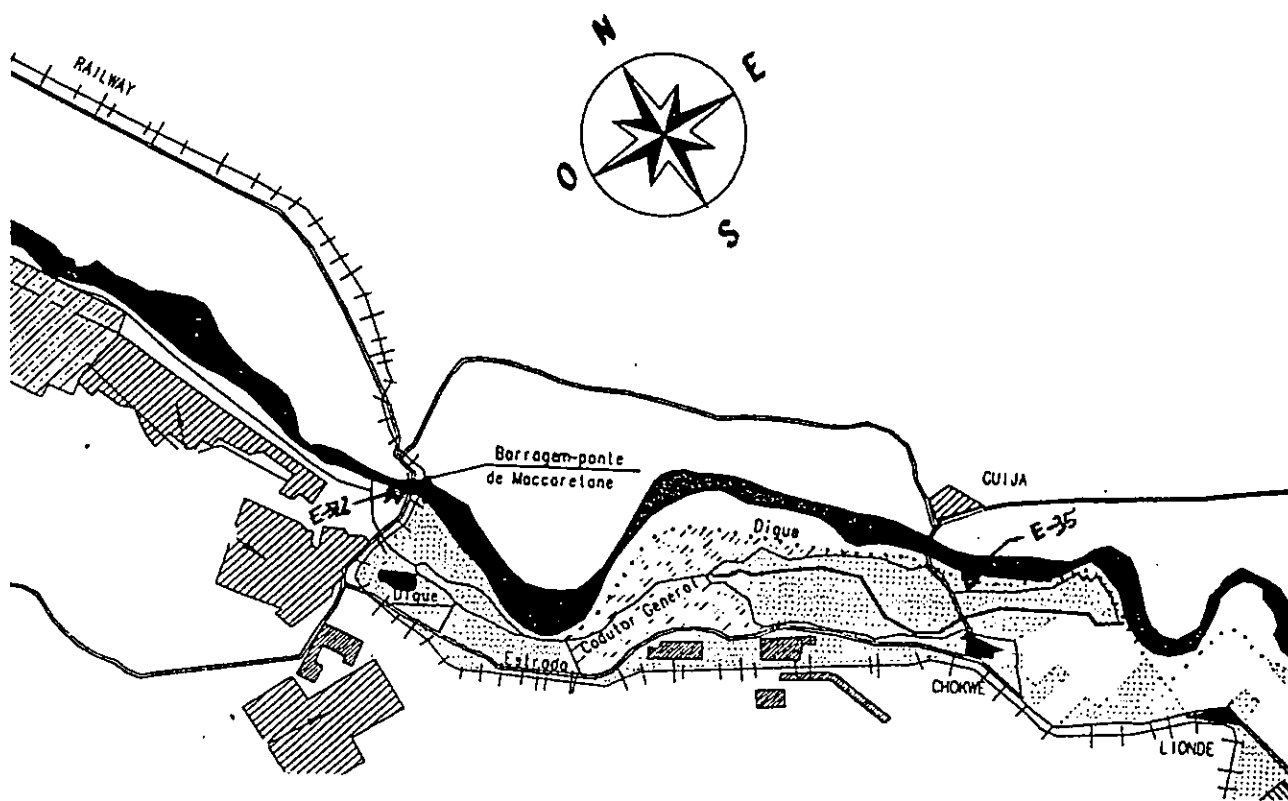
Fora das áreas do regadio, encontram-se extensas áreas de pastagem e uma agricultura de sequeiro. As principais culturas nas zonas altas de sequeiro são: o milho, a mandioca, o feijão e a batata-doce. O gado é uma das fontes de energia para a preparação do solo na campanha agrícola a partir da tracção animal e pode gerar rendimentos para a família. A produção pecuária neste distrito constitui um tipo de uso de terra muito importante e o mais apropriado para as planícies da mananga e sazonalmente inundáveis (Serno *et al.*, 1987).

No quadro deste estudo foram escolhidos os pontos das estações hidrométricas de Chókwè E-35 e de Macarretane E-372. Estes localizam-se no rio Limpopo à jusante depois da confluência entre o rio Limpopo e o dos Elefante (figura 2). A estação de Chókwè encontra-se a 5 Km do posto administrativo de Chókwè (figura 1), com as coordenadas geográficas de 24°30'10"S e 33°00'20"E a uma altitude de 28,08 metros. Cobre uma área de recepção de 342.000 Km<sup>2</sup> da área total drenada na bacia, e possui uma série de dados de caudais e de alturas de água medidos desde os anos 1954. A estação de recepção de Macarretane E-372 no açude do mesmo nome está situada a cerca de 20 Km a Noroeste de Chókwè à montante (figura 1), com coordenadas geográficas 24° 24' 10" S e 32° 52'30" E, a uma altitude de cerca de 39 metros. Com uma área de captação (*catchment área*) de 341320 Km<sup>2</sup>, o açude de Macarretane foi projectado para assegurar a rega dos campos de Chókwè (Consultec, 1996).

**Tabela 1:** Ocupação das áreas do regadio

Utente	N.º de utentes	Área (ha)	Área (%)
Sector familiar e privado	12499	17103,25	78,23
Associação de agricultores		142,00	0,65
LOMACO		1980,00	9,05
SEMOC		2087,00	1,54
JFS		555,10	2,53
TOTAL	12499	21865,35	100

Fonte: UIP, 1995.



Escala original: 1:50000

Fonte: HICEP

Figura 1: Localização da área de estudo.

## 2. CARACTERÍSTICAS DA BACIA

### 2.1 Localização

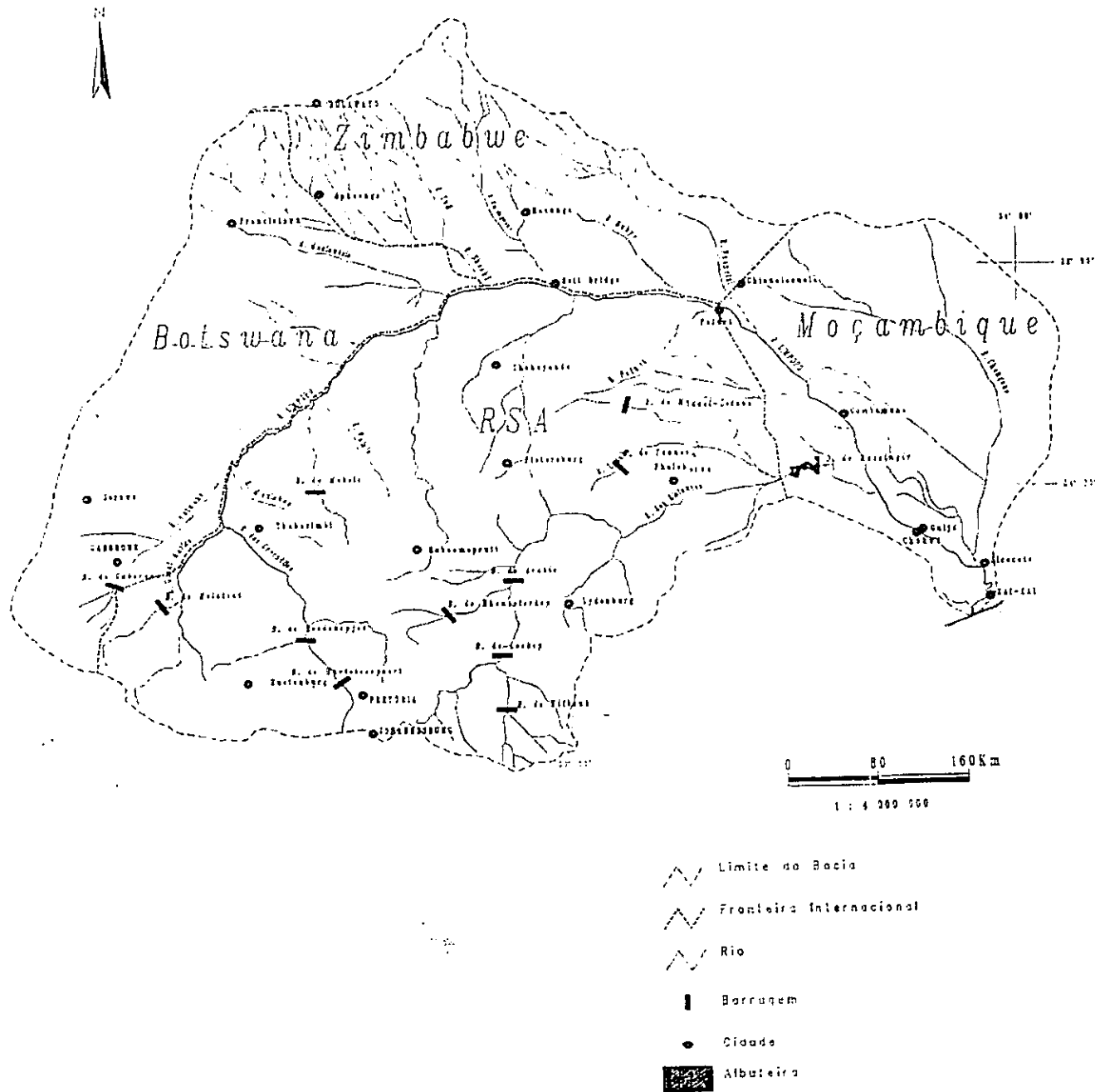
Segundo Mertens *et al.* (1970), o curso de água que toma o nome do rio Limpopo é formado pela junção dos rios Marico e Crocodilo (figura 2) que têm as suas nascentes a altitudes de 1500 metros a oeste da cidade de Pretória (África do Sul) e desagua as suas águas no Oceano Índico na província de Gaza, num percurso total de cerca de 1460 Km. No seu percurso recebe muitos afluentes cuja maioria se encontra nos países vizinhos (figura 2). Em território moçambicano, o Limpopo recebe três grandes afluentes: o rio dos Elefantes na margem direita e os rios Nuanetzi e o Changana na margem esquerda (tabela 2).

A bacia do rio Limpopo localiza-se na região Austral de África e é partilhada por quatro países (tabela 2): Botswana, Zimbabwe, África do Sul e Moçambique, particularmente na província de Gaza. De forma arredondada, a bacia situa-se entre os paralelos 22° e 26° S e entre os meridianos 26° e 35° E, e tem uma área total de cerca de 412000 Km<sup>2</sup>. Em território nacional enquadra-se entre os paralelos 21° e 26° S e meridianos 31° e 35° E. É limitada a norte pela bacia do Save, a sul pela bacia de Incomáti e a este pelo rio Govuro e a faixa costeira (Zinting, 1996).

**Tabela 2:** Subdivisão da bacia do rio Limpopo

País	Área drenada [Km <sup>2</sup> ]	% da área total	Principais afluentes
África do Sul	193500	47	Marico, Crocodilo, Magalakwin e Macolo
Botswana	73000	18	Notwane, Madoutsie
Zimbabwe	66000	16	Shashe, Umzingwani, Bubi
Moçambique	79500	19	Nuanetzi, Elefantes, Changane,

Fonte: Zinting, 1996.



Fontes: DAN/1984/94 E DINAGECA/1992

Figura 2: Localização da bacia hidrográfica de Limpopo na região Austral de África.

De acordo com o autor referenciado, a altitude máxima da bacia é de 2300 metros perto da cidade de Lydenburg na África do Sul. Tem na totalidade uma altitude média de 840m, sendo em Beitbridge, Mapai, Chókwe e Xai-Xai de 977, 133, 23 e 7 respectivamente

A área da bacia hidrográfica do rio Limpopo em Moçambique é de cerca de 19% da área total (tabela 2). O maior afluente é o Changane com uma área de drenagem de cerca de 14% da área total da bacia do Limpopo em Moçambique (tabela 3). A sub-bacia do rio dos Elefantes, apesar de ter uma pequena área de recepção no território nacional de apenas 2% (tabela 3), forma uma larga área



de captação nos países vizinhos, e é nesses países onde se registam elevadas precipitações (Zinting, 1996).

**Tabela 3:** Área das sub-bacias mais importantes em Moçambique

Sub-bacia	Área [Km <sup>2</sup> ]	% da área total
Changane	58500	14
Elefantes	6900	2
Limpopo	14200	3

Fonte: Zinting, 1996.

## 2.2 Geologia

Em Moçambique, a bacia do rio Limpopo faz parte da bacia sedimentar do Sul de Moçambique. É limitada no extremo Oeste por riolitos e basalto (Karoo Superior) da cadeia dos Libombos. A série das rochas sedimentares varia em idade desde o Cretáceo Inferior à Oeste junto a fronteira com África do Sul e o Zimbabwe até ao Quaternário na zona costeira. A sequência sedimentar é dominada por depósitos continentais e deltaicos como a formação dos Elefantes que é do Cretáceo Superior-Terceário Inferior e a formação de Mazamba/Magude que corresponde ao Mioceno Inferior/ Plioceno (Bowman e Smidt, 1986).

A distribuição dos principais tipos de solo é fortemente influenciada pela geomorfologia da área. Ao longo do rio Limpopo, nas curvas e meandros do rio foram depositados sedimentos fluviais recentes. A distribuição destes depósitos fluviais é típica, com a formação de diques naturais mais elevados e depósitos arenosos mais próximos do rio e as depressões pantanosas de sedimentos argilosos mais afastados do rio. A cobertura vegetal e as cheias periódicas contribuíram bastante na formação destes solos na bacia hidrográfica (Zinting, 1996). A maior parte dos solos da bacia são de textura pesada com baixos coeficientes de infiltração que influencia na baixa capacidade de armazenamento do solo e maior escoamento superficial (Pereira, 1983). E também os mesmos estudos hidrogeológicos, indicam que o fundo do leito é constituído de argila impermeável de baixa capacidade de infiltração.

### **2.3 Clima**

Pelo critério de Thornthwait, o clima da bacia do Limpopo em território nacional é árido junto à fronteira, semi-árido na região central e megatérmico sub-húmido seco na região interior da bacia, com déficit de água em toda a bacia (Zinting, 1996). Segundo a mesma fonte, a evaporação da bacia é mais elevada que a pluviosidade média mensal em todos meses excepto em Fevereiro. Os valores médios anuais registados nas estações evaporimétricas situam-se entre 2300mm e 1700mm.

A temperatura média anual para a bacia é de 24,3°C, verificando-se os valores médios anuais mais baixos no litoral (22°C) e os mais elevados no interior da bacia (cerca de 25°C). As temperaturas máximas e mínimas diárias dos meses mais quente (Janeiro), e mais frio (Junho) variam de 30° a 35°C e 9° a 12°C, respectivamente. A temperatura média anual na estação do Chókwè é de 23,6°C correspondente ao período de 20 anos (1952-1971) (Loureiro, 1973).

De acordo com o Loureiro (1973), a humidade média ultrapassa os 75% no litoral e, nas restantes partes da bacia, varia entre 62 e 64%. No distrito de Chókwè, o valor de médio de humidade relativa situa-se próximo dos 70%.

Segundo Siyka (1979), a bacia hidrográfica do rio Limpopo encontra-se delimitada pelas isoetas 350 e 1200mm, sendo a maior parte desta caracterizada por baixa precipitação (400-600mm). As precipitações registadas no território nacional têm pouco a ver com as cheias do vale do Limpopo, dada a precipitação média anteriormente descrita. A faixa costeira recebe maior quantidades de precipitação, particularmente na região de Xai-Xai, com cerca de 980 mm. Esta diminui em direcção ao interior da bacia, atingindo um mínimo de cerca de 390 mm na região do Pafúri (tabela 4). O período chuvoso vai desde os meses de Outubro a Março, o que corresponde 85% da queda pluviométrica de toda bacia.

**Tabela 4:** Precipitação média anual em alguns pontos ao longo da bacia

Rio	Estação	Localidade	Precipitação [mm]
Limpopo	P849	Pafúri	389
	P393	Combomune	470
	P772	Chókwè	632
	P864	Xai-Xai	977
Elefante	P944	Tiobine	406

Fonte: Zinting, 1996.

#### 2.4 A rede hidrográfica

O rio Limpopo possui grande área de drenagem, que inclui mais que a metade do Transvaal (Mpumalanga e Northern Province) e uma grande parte do Zimbabwe (Mertens, 1970). Estimativas indicam que apenas 10% do fluxo medido na estação hidrométrica de Chókwè é gerado no território nacional. Nele, o escoamento médio é de 5326 milhões de m<sup>3</sup> por ano. (MOPH, 1995; MICOA, 1998). De acordo com o Mertens (1970) no território nacional, o rio Limpopo divide-se em três partes:

- Alto Limpopo, o percurso que vai desde o Pafúri até a Mabalane (confluência com o rio dos Elefantes), com uma inclinação de 0,25%.
- Médio Limpopo: desde a confluência até Chibuto e tem uma inclinação de 0,018%.
- Baixo Limpopo: o percurso que vai de Chibuto até a foz e com 0,009% de inclinação.

A inclinação média do rio é 0,103%. Na parte moçambicana desde Pafúri à Xai-Xai tem uma inclinação média de 0.35% e com margens planas. O baixo valor de inclinação conduz a uma baixa velocidade do fluxo da água o que contribui no alagamento das largas planícies em estações de ano com elevada precipitação.

O seu regime hidrológico segundo Bereslawiski (1989) é bastante irregular e é consequência directa dos factores climáticos na bacia hidrográfica. O seu caudal é extremamente variável, sendo na época de estiagem bastante reduzido e no tempo chuvoso tem-se registado valores de caudais muito elevados. A profundidade média do rio é de 8,1 metros e corresponde um caudal de 5206,89m<sup>3</sup>/s na estação de captação de Chókwè. Quer dizer um nível de água acima de 8,1m, conduz um escoamento fora do leito normal (cheia). No alto Limpopo, o leito do rio é arenoso e o caudal de cheia é bem demarcado. Para o médio Limpopo, o leito de cheias alarga-se até 10 a 15 Km. No

baixo Limpopo onde recebe o afluente Changane, vastas áreas são propensas a inundações e não por causa da contribuição deste, mas devido a topografia da região. A contribuição do Changane em cheias é insignificante pela sua constituição geológica nos solos da sub-bacia. Os solos são permeáveis e têm maior capacidade de armazenar grandes volumes de água (amortecimento das cheias). Sendo as regiões de Chókwè até Xai-Xai bastante planas onde o rio percorre, as águas inundam grandes extensões de terras, dependendo da magnitude da cheia. Estes caudais são aumentados pelas descargas das pequenas barragens construídas nos seus afluentes da margem direita em África do Sul (Bereslawski 1989).

O caudal do rio Limpopo num regime natural concretamente na estação hidrométrica no Chókwè foi observado no período que vai desde o ano hidrológico 1951/52 até 1975/76. Nela estima-se um caudal máximo médio no valor de  $614,7\text{m}^3/\text{s}$ , um caudal mínimo médio no valor de  $4,13\text{m}^3/\text{s}$  e o médio anual de  $166,9\text{m}^3/\text{s}$ , (Siyka, 1979).

### **2.5 Infra-estruturas de protecção**

O Limpopo é um vale potencialmente agrícola com terras férteis para a prática de diversas culturas alimentares e comerciais. Devido ao regime climático seco, foram construídas algumas infra-estruturas hidráulicas com finalidade de armazenamento de água para garantir a irrigação e ao mesmo tempo a prevenção contra as cheias. Trata-se do açude de Macarretane, a barragem de Massingir e os sistemas de diques de defesas contra as inundações em Chókwè e Xai-Xai (Zinting, 1996)

O açude de Macarretane construída sobre o rio Limpopo localiza-se a 20 Km da cidade de Chókwè. Tem uma capacidade de armazenamento de apenas 4 milhões de metros cúbicos e garante uma regularização diária dos caudais necessários para o perímetro de irrigação do Chókwè, sobretudo porque eleva o nível de água de até 3,2 metros em relação à soleira da barragem para a tomada de água no canal de transporte por gravidade. Também desempenha um papel importante no amortecimento das grandes cheias. Porém, a cheia de 2000 foi um caso extremo e foi difícil amortecê-la através das estruturas hidráulicas nela existente. Para valores de caudais iguais ou superiores a  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as comportas dotadas dum sistema automático abrem totalmente e o escoamento é feito sobre a soleira afogada (Consultec, 1996).

A barragem de Massingir localiza-se no rio dos Elefantes a 30 Km a jusante da fronteira com a África do Sul (RSA); tem uma capacidade de armazenamento de 150 milhões de metros cúbicos e um caudal de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ . Construído para regular o caudal de Limpopo no projecto de regadio, controla os caudais das cheias e assegura um abastecimento da água rural e urbano na bacia (Consultec, 1996).

A construção de diques de defesas sobre o rio Limpopo nas margens esquerda e direita decorreu entre os anos 1950 e 1960 (Conzo, 1999 citando Kazanov e Quemisse, 1992). O dique da margem direita foi concebido para defender a cidade de Chókwè e o sistema de regadio numa área de 27000 ha. Compreende o troço desde o açude de Macarretane até Sangene (zona final do regadio) com um comprimento total de 90 Km. O dique de margem esquerda tem uma extensão de 75Km e compreende os troços entre o lago Chiozore até próximo da foz no distrito de Xai-Xai com cerca de 55 Km e de Xai-Xai a Chilaulene com cerca de 20 Km. Este foi concebido para defender a cidade de Xai-Xai e o sistema de regadio do Baixo Limpopo das cheias de pequenas e médias dimensões. Antes das cheias de 2000, os diques encontravam-se num avançado estado de degradação o que contribui negativamente no seu funcionamento durante a cheia de 2000 (Maluvane, 2000).

As construções de protecção contra as cheias são muitas vezes projectadas para mitigar ou prevenir as inundações nos centros urbanos de modo a evitar os riscos e danos que pode causar (Shaw, 1994). Por alguns ambientalistas, a construção e exploração de obras para o aproveitamento de recursos hídricos e pelas necessidades impostas para diversas utilizações dos mesmos recursos tem sido contestado e é considerado como factor determinante na degradação do meio ambiente. Alguns dos principais inconvenientes associados a construção de grandes barragens são de acordo com Cunha (1980):

- Erosão e assoreamento do leito dos rios – a jusante da barragem ocorre assoreamentos em resultado de deposição de sedimentos transportados pelos afluentes em que o rio principal deixou de ser capaz de arrastar em consequência da modificação do regime de caudais promovida pelas barragens.
- Assoreamento das albufeiras – a retenção de sedimentos vem muitas vezes privar os campos situados a jusante da acção fertilizante dos sedimentos de origem orgânica que se depositavam nestes campos antes da construção dessas barragens.
- Ocorrência das inundações catastróficas em caso de roturas das barragens: a rotura de uma obra hidráulica (barragem) provoca sempre prejuízos associados a própria perda da obra e as imensas destruições a jusantes.

Um exemplo concreto para reforçar esta hipótese esta relacionado com o açude de Macarretane. O mau funcionamento das comportas da barragem fez desviar as água no leito. A recolha de grandes quantidades de sedimentos por parte da barragem reduziu a sua capacidade de armazenamento e a função de amortecimento das cheias tornou nula. A acumulação dos sedimentos no estuário do rio conduziu a uma descarga lenta e a água na zona de Xai-Xai permaneceu muito tempo (Trucatos *et. al.*, 2001).

## 2.6. A cheia de 2000

Segundo Chivambo (2000), as cheias de 2000 foram originadas das precipitações intensas e simultâneas caídas em toda área da bacia. As inundações ocorreram principalmente depois da confluência dos rios Limpopo e dos Elefantes com grande impacto na região de Chókwè e outras zonas baixas à jusante.

A cheia 2000 da bacia do Limpopo teve quatro picos: um pico no mês de Janeiro, dois picos em Fevereiro e o último no mês de Março. A tabela 5 resume os quatros picos de ondas de cheias registadas no ano 2000. A onda de cheia originou a inundação de todo Limpopo, sobretudo as regiões baixas de Chókwè e cidade de Xai-Xai, onde o nível de água atingiu cerca de três a quatro metros acima do pavimento, comparado a altura das palhotas. Os danos causados pelas cheias de 2000 foram enormes. Extensas áreas ficaram inundadas e, conseqüentemente, colheitas perdidas, gado morto e desaparecido, infra-estruturas e habitações destruídas (SNAP, Março 2000).

**Tabela 5:** Níveis e caudais máximos registados nas 4 ondas da cheia 2000

Est.	1 <sup>a</sup>		2 <sup>a</sup>		3 <sup>a</sup>		4 <sup>a</sup>		Volume Esc.(Mm <sup>3</sup> )
	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	
E-33	9,07	5627	9,74	7142,98	>11	>10664,4	7,84	3420,18	16183,60
E-35	7,2	3888,2	8,45	5777,74	10,54	>9214,4	8,05	5207,22	23204,42
E-36	10,58	5263,18	11,43	7751,28	12,96	10328,99	11,67	5891,45	28505,06
E-38	3,92	1556,38	5,58	4056	9	9939,68	5,53	3508	19656,37

Fonte: Maluvane, 2000

**Tabela 6:** Dia e horas de registo referentes à tabela 5

Estação	1 <sup>a</sup>		2 <sup>a</sup>		3 <sup>a</sup>		4 <sup>a</sup>	
	Dia	Horas	Dia	Horas	Dia	Horas	Dia	Horas
E-33	21-Jan	7:00	10-Fev	7:00	26-Fev	7:00	22-Mar	9:00
E-35	24-Jan	7:00	13-Fev	7:00	27-Fev	12:00	24-Mar	17:00
E-36	26-Jan	12:00	15-Fev	9:00	29-Fev	12:00	27-Mar	7:00
E-38	27-Jan	12:00	19-Fev	17:00	10-Mar	12:00	28-Mar	12:00

Fonte: Maluvane, 2000

Localização: E-33 (Combomune); E-35 (Chókwè); E-36 (Sicacate); E-38 (Xai-Xai)

A maior parte dos valores que constam na tabela 5 foram calculados usando as equações de curvas de vazão aplicadas para cada estação. Mas a terceira onda de cheia para todas as estações são valores estimados, fazendo-se extrapolar a partir das curvas de vazão, visto que o rio transbordou e inundou as escalas de medição.

A variação dos caudais ao longo do rio deveu-se o facto deste ser fluxo em regime natural, onde a capacidade de transporte e de armazenamento depende do nível de saturação do solo, dos sedimentos e os afluentes. Mas neste caso coloca-se a hipótese da variação do caudal em função da saturação do solo do vale. Na fase inicial o solo está insaturado, o armazenamento e o caudal é maior (amortecimento das cheias). Depois do solo estar saturado, ocorre o esvazamento da bacia e o fluxo é lento (alagamento das áreas da bacia).

### 3. MODELOS

#### 3.1. Modelos de cálculo dos caudais

O cálculo de caudal de cheia máxima é de fundamental importância no dimensionamento de obras, tais como: descarregadores de barragens, diques de protecção de cheias. Em canais abertos, a determinação dos caudais é calculado com base nas equações de Manning-Stricker e Chézy, a curva de vazão e o modelo rio com planícies inundadas.

##### 3.1.1. Formulas de Manning-Stricker e Chézy

Segundo Engelen e Brito (1982), a equação de Manning-Stricker estabelece a relação entre a inclinação do canal  $S$ , a secção molhada do canal  $A_m$ , fracção área molhada  $A_m$  e perímetro molhado  $P_m$  definida como raio hidráulico  $R_h$ , e o coeficiente de rugosidade do canal ou rio  $K_m$ .

$$Q = K_m * A_m * \sqrt[3]{R_h^2} * \sqrt{S}, \quad R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad (1)$$

Para os mesmos autores, a equação de Chézy estabelece a relação entre a velocidade de escoamento da água ( $V$ ), a inclinação do canal ou do rio ( $S$ ), a fracção área molhada ( $A_m$ ) e o perímetro molhado ( $P_m$ ) da secção (raio hidráulico  $R_h$ ) e a constante de coeficiente de rugosidade  $C$ .

$$Q = C * A_m * \sqrt{R_h * S} \quad (2)$$

As equações de Manning-Stricker e Chézy têm a limitante de serem aplicadas em escoamentos permanentes e uniformes (Engelen e Brito, 1982). Um escoamento diz-se permanente quando não varia em função do tempo. No escoamento uniforme a profundidade, o declive, a velocidade e a secção transversal do canal permanecem constantes para um dado comprimento do canal ou do rio. Em suma, as equações anteriormente referidas são mais aplicadas para o cálculo de escoamento de água em canais artificiais e geometricamente regulares, ou seja, de secção trapezoidal, rectangular, triangular ou circular. Não podem ser aplicados em rios com formas irregulares e curvas.

##### 3.1.2. Curva de vazão

A curva característica ou de vazão de um curso de água, em determinada secção, é a curva que relaciona o caudal com a altura hidrométrica (Lencastre e Franco, 1984). Em regra, usam-se as



coordenadas rectilíneas e marca-se a altura hidrométrica em abcissas e o caudal em ordenadas. Analiticamente, as curvas de vazão são representadas pela seguinte expressão:

$$Q = a * (h - h_0)^b \quad (3)$$

Em que: Q é o caudal; h a altura de água lida na escala hidrométrica;  $h_0$  a altura de água correspondente a caudal nulo obtida pelo levantamento topográfico; a e b são parâmetros característicos para cada secção transversal da estação de medição (tabela 5).

Para determinar a curva de vazão, fazem-se múltiplas determinações simultâneas da altura hidrométrica h e do caudal Q, para estados de níveis tão variados quanto possível. Na prática, divide-se a secção transversal do rio em diferentes partes (secções) e faz-se as leituras das velocidades através do molinete e depois determina-se o respectivo caudal  $Q_i$ , dado pela equação:

$$Q_i = \bar{v}_i * A_i \quad (4)$$

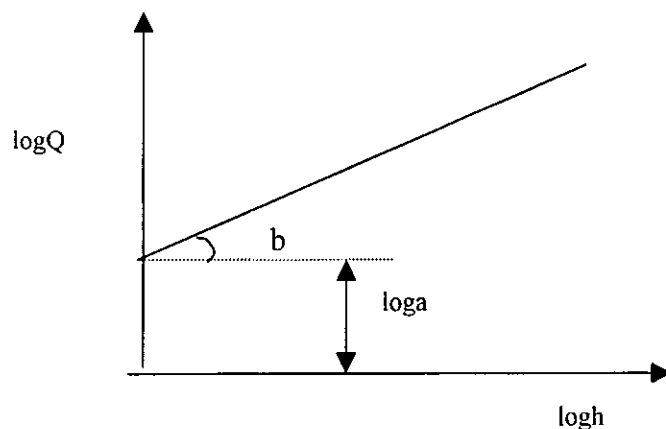
Onde:  $Q_i$  é o caudal em cada parte da secção transversal i do rio;  $\bar{v}_i$  é a velocidade média na secção i e  $A_i$  é a área de cada parte da secção transversal.

O caudal total da secção transversal do rio Q é o somatório dos caudais das diferentes partes (secções) e a equação que traduz é:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (5)$$

Tendo a relação Q-h, a diferentes níveis, a expressão é do tipo  $Q = ah^b$  (equação 3) e em coordenadas logarítmicas, representa uma recta ou seja,  $\log Q = \log a + b \log h$  (Apontamentos de agrohidrologia, 1998).

Utilizando o papel duplo logarítmico, determinam-se estatisticamente os parâmetros a e b, como ilustra a figura 3



**Figura 3:** Determinação dos parâmetros a e b no papel duplo logarítmico.

O parâmetro b é a tangente da recta no papel duplo logarítmico calculado por:

$$b = \frac{\log Q_i - \log Q_{i-1}}{\log h_i - \log h_{i-1}} \quad (6)$$

Obtida a curva característica (de vazão) na secção, pode se achar por extrapolação, o caudal correspondente a cheia máxima.

As equações das curvas de vazão actualmente usadas para calcular os caudais para as estações hidrométricas de Combomune E-33, Chókwè E-35, Sicacate E-36 (Maluvane, 2000), encontram-se na tabela 7. Nela não foi incluída a curva de vazão de E-38 por falta da informação referente a mesma.

**Tabela 7:** Equações de curvas de vazão nalgumas estações do rio Limpopo

Estação	Localização	Curva de vazão	Aplicação
E-33	Combomune	$Q = 16,98 * (h - 1,40)^{2,849}$	$h > 1,40$
E-35	Chókwè	$Q = 63,096 * (h - 0,8)^{2,22}$	$h < 9m$
E-36	Sicacate	$Q = 53,70 * (h - 2,1)^{1,56}$	$h < 8,0m$
		$Q = 0,26 * (h - 2,1)^{4,44}$	$h > 8,0m$

Fonte: ARA-Sul, 2001.

Segundo o recomendado para estas equações das curvas de vazão, foi possível obter o valor do caudal correspondente ao pico máximo. Estes valores dados foram obtidos fazendo a extrapolação das curvas

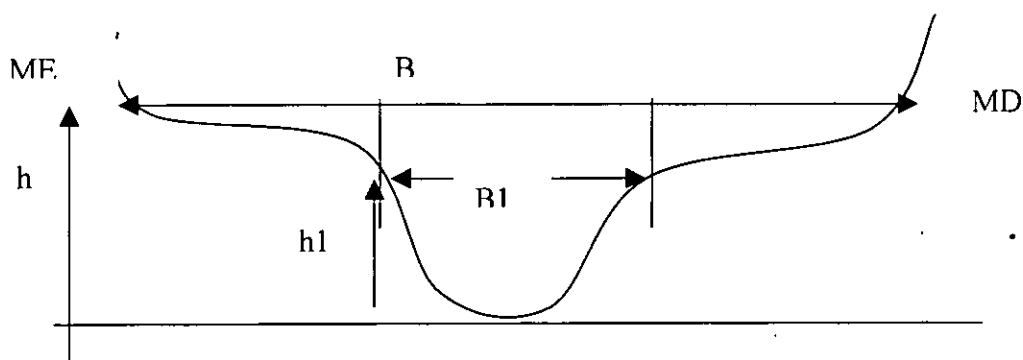
existentes. Para a estação hidrométrica de Macarretane, não existe equação da curva de vazão por ser um açude e as descargas de caudais através de comportas que têm um funcionamento automático.

A cheia 2000 inundou as escalas de medição. Estas inundações provocaram os processos de erosão e sedimentações nas estações e automaticamente alterou as respectivas secções. Deste modo fez com que as equações não ser apropriadas para calcular a vazão máxima da cheia; e decorre um processo de actualização (Maluvane, 2000).

### *3.1.3. Rio com planícies inundadas*

O modelo rio com planícies inundadas do termo em inglês “river with flood plains” aplicado para rios com um escoamento acima do leito normal, é válido em situações de cheias. E é também modelo de secção duplo, com um leito menor ou de estiagem e um leito maior ou de cheia, muito empregue na regularização fluvial. A água ao transbordar o leito habitual, o perímetro molhado sofre um grande acréscimo enquanto que a área da secção molhada aumenta muito pouco (Jansen, 1994). Dada a limitação dos outros modelos já descritos, usou-se o modelo “river with flood plains” nesta tese.

O pressuposto é que cursos naturais (rios) têm secção transversal rectangular. Este modelo consiste em decompor a secção total da bacia inundada em duas secções parciais: a secção correspondente a largura normal do rio e a secção da planície inundada (figura 4). O caudal de cada secção é dado pela a largura e a altura de água; o declive do rio  $i$  e o coeficiente de rugosidade do leito. Assim, o caudal total (caudal de cheia) é a soma dos caudais das duas partes: o caudal do rio (equação 8) e o caudal das planícies inundadas (equação 9).



**Figura 4:** A aproximação do modelo de Jansen “rio com planícies inundadas”

$$Q_{rio} = h * B1 * C * \sqrt{h * i} = B1 * C * \sqrt{i} * h^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

$$Q_{in} = (h - h1) * (B - B1) * C * \sqrt{(h - h1) * i} = B1 * C * \sqrt{i} * \left(\frac{B - B1}{B1}\right) * (h - h1)^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

Segundo Jansen (1994), assumiu-se que o declive do rio e o das margens inundadas são iguais e que a rugosidade do leito normal e a da superfície inundada são iguais, assim, o caudal da cheia é:

$$Q = B1 * C * \sqrt{i} * \left[ \sqrt{h^3} + \left(\frac{B}{B1} - 1\right) * \sqrt{(h - h1)^3} \right] \quad (10)$$

Em que: Q é o caudal total da cheia; B1 é largura correspondente ao leito do rio; B é largura da cheia; h1 é altura da ao leito do rio; h é altura da água da cheia; C é um coeficiente de Chézy e tem unidade ( $m^{1/2} * s^{-1}$ ) e i é inclinação do rio. A largura total B da área inundada é a soma das distâncias das partes  $b_j$ , também pode-se obter pela projecção da distância da referência até ao ponto correspondente à cota máxima das cheias.

#### *Elaboração do modelo rio com planícies inundadas*

Para a elaboração do modelo são necessários alguns parâmetros: o nível de água h da cheia; a largura inundada B (igual ao comprimento total do transecto na área inundada); o declive do rio i e o coeficiente de Chézy C.

- A largura B e a altura h são dados do levantamento topográfico.
- O coeficiente C é calculado com base no coeficiente de rugosidade de Manning Km. Este Km por sua vez é dado pela descrição do tipo e uso da terra ao longo dos transectos.
- O valor de declive i é um dado secundário.

Em situações em que a rugosidade varia ao longo do perímetro molhado (transecto inundado) o que acontece na maioria dos casos, é necessário uniformizar o coeficiente C. Nesta perspectiva, primeiro calcula-se o caudal de máxima cheia. Para calcular este caudal, a secção transversal inundada é dividida em pequenas secções homogéneas (figura 5). Assim, acha-se para cada secção parcial, um caudal parcial e somando os caudais parciais (equação 11), obtém-se o caudal total

(equação 12). Desenvolvido por Chézy e conhecido por área-declive (equação 2), neste caso toma a forma:

$$Q_j = C_j * A_j * Rh_j^{\frac{1}{2}} * i^{\frac{1}{2}} \quad \text{ou} \quad Q = Km_j * i^{\frac{1}{2}} * A_j * Rh^{\frac{2}{3}} \approx Km_j * i^{\frac{1}{2}} * B_j * (h-hl)^{\frac{5}{3}} \quad (11)$$

$$Q = \sum_{j=1}^n C_j * A_j * Rh_j^{\frac{1}{2}} * i^{\frac{1}{2}} \quad \text{ou} \quad Q = \sum_{j=1}^n Km_j * B_j * h_j^{\frac{5}{3}} * i^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Em que:

- $Q_j$  é o caudal de cada secção homogénea;
- $A_j$  é a área molhada em secção  $j$
- $C_j$  é o coeficiente de rugosidade de Chézy;
- $Rh$  é o raio hidráulico (a relação entre o perímetro molhado da secção  $P_m$  e a área molhada  $A_m$

desta secção) e

$i$  é o declive do rio.

A área molhada da secção transversal da área inundada é calculada pela equação 13 ( Lencastre e Franco, 1984):

$$A_j = \frac{(h_j + h_{j+1})}{2} * (b_{j+1} - b_j) = \Delta h_j * (b_{j+1} - b_j) \quad (13)$$

Onde:  $h_j$  é o nível de água da subsecção, e  $que$  é a diferença entre a cota máxima das cheias  $C_{cheia}$  e a cota de cada ponto  $C_j$  no transecto;  $b_j$  a largura de cada parte da secção, que é a diferença entre dois pontos no alinhamento na secção transversal da bacia. Caso se quer calcular o caudal máximo de uma cheia usam-se a cota máxima é identificada pela deixa de uma cheia, que é qualquer indício material da sua passagem (arranques das árvores, escavações nas margens ou marcas de água) ou informação dada pela população local.

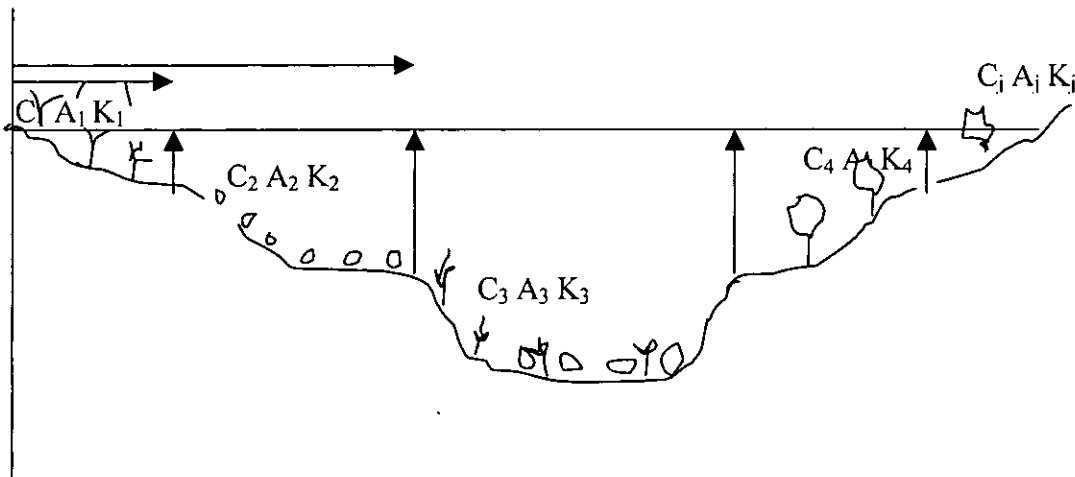


Figura 5: Exemplo de secções homogêneas dum corte transversal da bacia.

**Ilustração:** Determinar o caudal que passa na secção homogênea 2

- a área molhada:  $A_2 = \frac{(h_1 + h_2)}{2} * (b_2 - b_1) = \Delta h_2 * (b_2 - b_1)$
- a constante de rugosidade:  $C_2 = K m_2 * \Delta h_2^{\frac{1}{6}}$
- o caudal da secção 2 é:  $Q_2 = C_2 * A_2 * \Delta h_2^{\frac{1}{2}} * i^{\frac{1}{2}}$  ( $\Delta h = R_h$ , explicação a seguir).

#### Determinação de coeficiente de rugosidade $C$ de Chézy

O coeficiente  $C$  de Chézy é uma função do coeficiente  $K_m$  de Manning dado pela rugosidade dos canais (rios) e do raio hidráulico (equação 14):

$$C = K_m * R_h^{\frac{1}{6}} \quad (14)$$

Se numa secção da área inundada a relação entre a largura  $B$  da superfície livre da água e a sua profundidade hidráulica  $h$  for muito grande, o raio hidráulico  $R_h$  é aproximadamente igual à profundidade hidráulica  $h$  (Jansen 1994). De acordo com este autor, para calcular o coeficiente de Chézy na secção dum área inundada, usar-se-á a equação seguinte:

$$C = K_m * \Delta h^{\frac{1}{6}} \quad (15)$$

Logo, o factor  $C$  depende da rugosidade dos terrenos da secção transversal e da a profundidade hidráulica  $h$  da inundação. Também, pode-se determinar directamente o valor do caudal  $Q$  usando logo  $K_m$ , onde  $K_m = 1/n$ . Neste trabalho, o cálculo dos caudais foi usado directamente o valor de  $K_m$ .

O coeficiente de rugosidade  $K_m$  depende de uma grande diversidade de factores:

- rugosidade do leito (tamanho e forma dos materiais que constituem);
- vegetação (altura, densidade, distribuição e tipo);
- depósitos e escavações; obstruções; tamanho e forma do rio; nível e caudal; variações sazonais e materiais em suspensão e em depósito sobre o leito (Sardinha e Macedo, 1981).

A estimativa da rugosidade do terreno tem a ver com a experiência do pessoal técnico no campo, devido a certos factores existentes na bacia já mencionados. Das equações dadas vê-se que o caudal é directamente proporcional ao coeficiente de Chézy. Ou seja, quanto menor é a rugosidade do terreno, maior será o fluxo e vice-versa.

Dados os padrões de  $K_m$  estabelecidos, usou-se o  $K_m$  mínimo para determinar o  $C$ , tudo na perspectiva de reduzir o erro de cálculo na aproximação do caudal da cheia máxima.

O método área-declive (Equação 11) é aplicável para pequenas secções homogéneas. O modelo generalizado (Equação 10) utiliza o único valor de  $C$ , tendo sido considerado homogéneo para toda secção. Para isso precisa-se de calibrar a constante  $C$ , fazendo um cálculo iterativo enquanto já conhecidos os outros parâmetros e considerados fixos.

### **3.2 Probabilidades de ocorrência de caudais extremos**

Com uma curva cronológica dos caudais de um curso de água em determinada secção, é fácil identificar a máxima cheia de cada ano durante o período que se quer analisar. E quando se pretende projectar uma obra hidráulica num curso de água (uma barragem ou um açude), no dimensionamento de sistema de drenagem em áreas agrícolas, há necessidade de assegurar a passagem de uma determinada cheia, sem que ocorram riscos de destruição. É nesta perspectiva que o conceito de probabilidade é aplicado para referidas condições de fluxo para uma determinada frequência de cheias ou período de retorno das inundações. E é importante na produção do mapa de riscos de inundação de acordo com os modelos de cálculo de probabilidades. A probabilidade de ocorrência das cheias foi estudada considerando o caudal da cheia máxima de 2000 e os dados existentes.

### *3.2.1. Extrapolação dos valores*

O ajustamento ou adaptabilidade de um modelo de distribuição à distribuição de amostra é habitualmente analisado com base em testes estatísticos. Os testes estatísticos consistem em selecção da função teórica que melhor se adequa à determinada variável hidrológica, por exemplo caudais extremos. Os testes tomam em consideração o tipo de distribuição dos dados (simétricos ou assimétricos) definidos pelo coeficiente de assimetria  $G$ , o intervalo de tempo em análise (o período), e características hidrológicas da estação hidrométrica (Lencastre e Franco, 1984).

#### *Distribuição assintótica de extremos do tipo I*

Segundo Daker (1981), o pico anual de cheias é somente um caudal dos trezentos e sessenta e cinco caudais possíveis a qual pode ocorrer em cada ano. Conclui que a distribuição desses caudais não tem limite. Portanto, o tempo de retorno  $Tr$  de um acontecimento, neste caso o caudal de cheias, é o intervalo médio de tempo em anos, dentro do qual esse acontecimento é igualado ou excedido em média uma só vez.

A relação entre o período de retorno  $Tr$  e a probabilidade (frequência)  $Q_n$  é a seguinte:

$$Tr = \frac{1}{1 - F_n} = \frac{1}{Q_n} \quad (16)$$

Sendo  $F_n$  a probabilidade que  $X \leq X_k$

$Q_n$  a probabilidade que  $X > X_k$

#### *Distribuição de log-Pearson tipo III*

Resulta por transformação logarítmica da variável caudal extremo anual  $x$ . Constitui o modelo recomendado oficialmente pelos E.U.A e na R. F. Alemã para análise da distribuição de frequências de caudais de cheias (Lencastre e Franco, 1984).

#### *Distribuição de log-Normal*

É conhecido em hidrologia como lei de Galton. É uma generalização da lei de Gauss (uma densidade de probabilidade simétrica), tornada assimétrica por uma adequada mudança da variável. A distribuição de log-Normal ajusta bem a uma variável resultante da composição (multiplicação) de muitos factores com uma distribuição qualquer (Lencastre e Franco, 1984).



A análise estatística esta distribuição de dados segundo as características da estação hidrométrica a série de dados existentes sobre as cheias e a precipitação; permite concluir que a precipitação se adaptam melhor a lei de Gumbel e os caudais extremos se adequam a distribuição de log-Pearson 3 parâmetros e a de log-Normal (Chivambo, 2000).

### 3.2.2. A distribuição tipo III de Pearson (3 parâmetros)

A curva tipo III

de Pearson utiliza valores máximos de caudais de cheias observados anualmente.

A expressão geral da curva tipo III de Pearson (Linsley *et al.*, 1988) é

$$P(X) = P_0 \left(1 - \frac{X}{a}\right)^c e^{-\frac{X}{a}} \quad (17)$$

Em que;

$$P_0 = \frac{n * c^{c+1}}{a * e^c \Gamma(c+1)}; \quad c = \frac{4}{\beta} - 1; \quad a = \frac{c \mu_3}{2 \mu_2}; \quad \beta = \frac{\mu_3^2}{\mu_2^3} \quad e \quad \mu_3 = \sigma^6 * G$$

onde: n é o tamanho da amostra,  $\mu_2$  é a variância,  $\mu_3$  é o terceiro momento em relação à média,  $\Gamma$  é a função gama, e é a base de logaritmo naperiano e G é o coeficiente de assimetria definido pela equação 20.

Na aplicação, deve-se logaritmizar a variável hidrológica que está sendo analisada (valores de caudais), é usual o logaritmo decimal (Linsley *et al.*, 1988).

Os parâmetros usados são:

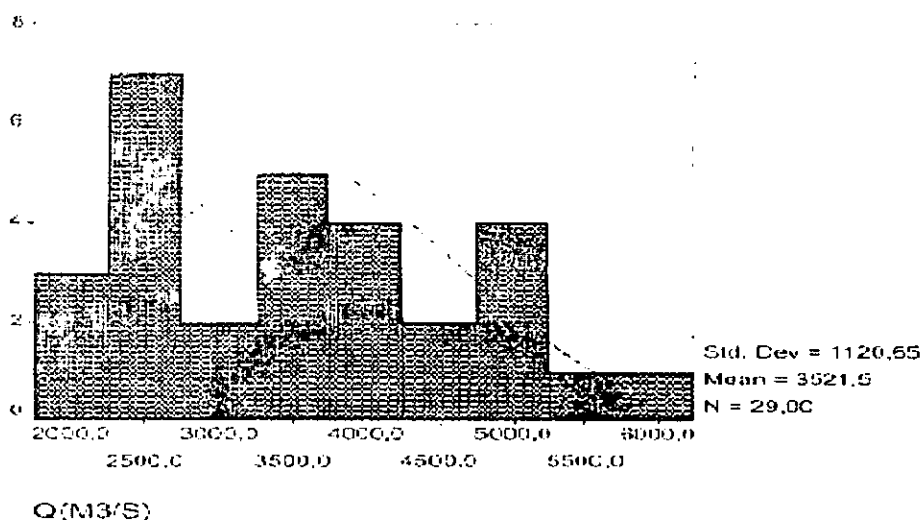
$$\text{- a média: } \log x = \frac{\sum_{i=1}^n \log x_i}{n} \quad (18)$$

$$\text{- o desvio padrão: } \sigma_{\log x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log x_i - \overline{\log x})^2}{(n-1)}} \quad (19)$$



- o coeficiente de assimetria: 
$$G = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log x_i - \overline{\log x})^3}{(n-1)(n-2)(\sigma_{\log x})^3} \quad (20)$$

Os parâmetros de dispersão (desvio padrão) e de assimetria (coeficiente de assimetria), caracterizam a forma da curva de distribuição de frequências. Um coeficiente de assimetria nulo indica uma distribuição simétrica com a média igual a mediana, e conhecida por distribuição de Gauss. Um coeficiente negativo é uma distribuição assimétrica, em que o valor da média é inferior ao da mediana. E se for positivo, a média é superior à mediana e é conhecida por assimetria positiva. A figura 6 a seguir mostra um histograma de distribuição de caudais históricos de cheias com a assimetria negativa.



**Figura 6:** Histograma e curva de densidade de frequências dos caudais de cheia do Limpopo na estação hidrométrica E-35. (

A magnitude da cheia  $x$  (caudal) dado um período de retorno  $T_r$ , é dada pela expressão:

$$\log x = \overline{\log x} + K_T * \sigma_{\log x}, \text{ então, } x = 10^{(\overline{\log x} + K_T * \sigma_{\log x})} \quad (21)$$

Onde:  $K_T$  é o factor de frequência.

O factor de frequência  $K_T$  é um valor tabelado ou pode ser obtido pela relação período de retorno  $T$  e o coeficiente de assimetria  $G$  pela equação 22 (Chow, 1988).

$$K_T = Z + (Z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(Z^3 - 6Z)k^2 - (Z^2 - 1)k^3 + k^4 + \frac{1}{3}k^5 \quad (22)$$

Onde:

$$k = \frac{G}{6}$$

$$Z = w - \frac{2,515517 + 0,802853w + 0,010328w^2}{1 + 1,432788w + 0,189269w^2 + 0,001308w^3} \quad (23)$$

$$e \quad w = \left[ \ln \left( \frac{1}{p^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad p = \frac{1}{T} \quad (24)$$

$(0 < p \leq 0,5)$

em que:  $w$  é uma variável intermediária e  $Z$  variável normal padrão.

Conhecidos os valores dos períodos de retorno para diferentes caudais de cheias no intervalo de anos de 1954 à 2000, foi desenhado o mapa de inundação da bacia.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1 Dados necessários**

Os dados recolhidos são de dois tipos: os dados secundários e os dados do campo. Os dados secundários correspondem os caudais e os níveis máximos de todas as cheias do Limpopo incluindo a cheia 2000, a equação da curva de vazão aplicada para cada estação hidrométrica e outras informações gerais sobre a hidrologia da bacia do Limpopo (a altura e o caudal normal de escoamento no leito, a largura normal e a profundidade do rio, o nível de água de alerta em caso de cheias nas estações). Estes foram adquiridos na DNA, Serviços de Hidrologia da ARA-Sul em Maputo e delegação em Xai-Xai.

Os dados de campo são:

- Cota máxima e nível de água máximo registado nas cheias de 2000 em Macarretane e Chókwè;
- Cotas do rio Limpopo e das estações de medição (E-35 e E-372);
- Cotas dos diferentes pontos do terreno ao longo dos troços das duas margens do rio para os transectos de Macarretane e Chókwè;
- Distâncias entre pontos ao longo da secção da bacia e a distância total a partir do ponto tomado como referência;
- Coordenadas geodésicas para os diferentes pontos de levantamento e
- Descrição da ocupação e uso dos terrenos nas áreas ao longo do corte transversal para fins de estimar o coeficiente de rugosidade do terreno de Chézy.

### **4.2 Método da recolha dos dados**

#### *4.2.1 Levantamento no terreno*

O trabalho começou com o reconhecimento do local de estudo que compreendeu a realização dos primeiros contactos com o técnico na área de rega e drenagem da Hidráulica do Chókwè (HICEP) que facultou a informação da localização da estação hidrométrica de Chókwè E-35, dos marcos geodésicos existentes no local para obter uma cota no local de referência. Da mesma maneira, em relação a estação de Macarretane E-372, contactou-se o técnico responsável da ARA-Sul afecto na Aldeia da Barragem.

As medições tinham finalidade de determinar a altura hidrométrica  $h$  em diferentes pontos ao longo do corte transversal, e a largura  $b_j$  de cada parte e de toda secção transversal  $B$  inundada na bacia. Também permitem obter o perfil transversal da área inundada das cheias de 2000, afim de determinar

as diferentes larguras de inundação de todas cheias registadas no vale do Limpopo e ao mesmo tempo fazer funcionar o modelo de caudais de cheias já descrito. O processo topográfico consistiu na:

- Definição de um alinhamento e caminhamento transversal;
- determinação das distâncias e respectivas cotas sucessivas nos pontos da secção transversal da bacia inundada, passado pelas estações E-35 e E-372 que consta no plano vertical da secção definido em relação ao rio.

#### *4.2.2. O equipamento e o procedimento do levantamento topográfico*

Nas medições de campo foi usado o equipamento de levantamento topográfico WILD GPS-System 200. Com esse equipamento, obteve-se as cotas dos diferentes pontos no terreno, as distâncias entre os pontos e as coordenadas geodésicas destes a partir da referência

No sistema de GPS (*Geograph Positioning System*), o levantamento topográfico fez-se usando "*Rapid static surveys*". A sua escolha é justificada por curto tempo de observação (medição) e prático para secções inundadas da bacia muito extensas e um caso concreto é o vale do Limpopo nas cheias de 2000. A sua precisão está em função ao tempo de leitura (record), o GDOP e o comprimento da linha de base (*baseline*), tabela 8.

**Tabela 8:** Tempo de leitura em função da linha de base e o período do dia

N.º de satélites	Aproximado	Tempo de observação aproximado	
		de dia	de noite
GDOP ≤ 8	Baseline		
Rapid Static			
4 ou 5	até 5 Km	5 a 10 min	5 min
4 ou 5	5 a 10 Km	10 a 20 min	5 a 10 min
4 ou 5	10 a 15 Km	mais de 30min	5 a 20 min

Fonte: Guideline to Static and Rapid Static GPS Surveying.

A definição da densidade dos pontos de levantamento nos transectos do corte transversal da secção inundada, baseou-se nos seguintes aspectos: topografia (declives do terreno), existência dos canais de irrigação, valas de drenagem para a área do regadio, existência de diques de protecção nas margens ao

irrigação, valas de drenagem para a área do regadio, existência de diques de protecção nas margens ao longo do rio e vias de acesso na região. E assim, a distância entre os pontos é menor para terreno mais acidentado (com maiores declives) e é maior para terreno com declives suaves ou seja planos.

#### *4.2.3 Manipulação de mapas digitais*

Não foi possível percorrer todo o transecto do corte transversal da planície inundada devido aos aspectos técnicos relacionados com os acessórios do equipamento e escassez de tempo. Por esta razão recorreu-se às curvas de níveis da região em estudo a partir de mapas digitais obtidos no Departamento de Engenharia Florestal da FAEF . As curvas de níveis (anexo 8) foram desenhadas pela interpolação das cotas tendo-se usado o *software Arcview 3.1 GIS*, e introduzindo-se valores de cotas e coordenadas geográficas a partir das cartas topográficas números 1131, 1132, 1145 e 1146 na escala 1:50.000. As cartas topográficas foram adquiridos na DINAGECA.

### **4.3 Método de análise dos dados**

#### *Levantamento de campo e processamento de dados*

Tendo-se efectuado as medições de campo e gravadas na "memory card" do GPS, os dados foram transferidos para o "Static Kinematic Software" (SKI). Durante o processamento, alguns pontos não tiveram resolução, e houve necessidade de recorrer o sistema de informação geográfica (GIS) para completar a informação em falta. Os dados resultantes da computação são: as cotas dos diferentes pontos, as distâncias e coordenadas geográficas.(geodésicas e UTM).

Usando o método *Rapid Static*, o equipamento dá uma precisão de 5 a 10 mm + 1ppm e se o GDOP (*Geometric Dilution Of Precision*) for menor ou igual a 8 (tabela 8).

Conseguida informação necessária de cotas , distâncias entre diferentes pontos ao longo dos dois transectos, desenhou-se o perfil transversal da bacia para as duas estações de leituras de níveis para fins de encontrar a largura inundada para as diferentes cheias registadas no vale do Limpopo num intervalo de anos escolhidos desde 1954 até 2000, que representa o ano duma cheia catastrófica. A partir das diferentes larguras de inundadas pelas cheias e aplicando o modelo de cálculo dos caudais de cheias, determinaram-se os diferentes caudais de inundação usando as equações.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 A hidrologia da bacia do Limpopo na cheia 2000

Segundo uma fonte da Administração Regional da Água Sul (ARA-Sul), concretamente a Unidade da Gestão da Bacia do Limpopo em Xai-Xai forneceram os seguintes dados:

**Tabela 9:** Informação hidrológica da bacia do Limpopo

Estação	Q. normal (m <sup>3</sup> /s)	Altura normal h (m)	Largura do rio W(m)	h máxima cheia 2000 (m)	Cota máxima das cheias de 2000 (m)	Q. máxima cheia 2000 (m <sup>3</sup> /s)
E-35	1200	4.50	60	10.54	31,57	-*
E-372	-	96.50**	650	104**	39,34	-*

Fonte: ARA-Sul/Serviços de Hidrologia/Xai-Xai, 2001.

\*- Nas estações hidrométricas, o rio transbordou tendo inundado as escalas de medição. Portanto, as equações das curvas de vazão deixaram de serem usadas durante o período em análise.

\*\* - Valores de níveis em altura relativa

Segundo os dados apurados no terreno, a cota máxima das cheias de 2000 no transecto de Chókwè foi de 31,57 metros e que corresponde a uma altura hidrométrica de 10,54 metros do seu leito. Para o transecto de Macarretane registou-se uma cota relativa de 104 metros, representando uma cota absoluta de 39,34 metros, correspondendo neste caso um nível de água de 9,1 metros contado a partir da soleira do açude. Os valores de níveis hidrométricos foram conseguidos através da leitura das marcas deixadas pela água nas respectivas escalas de medição. Os valores das cotas foram obtidas pelo levantamento topográfico e também foram calculados fazendo a soma da cota do rio e altura de água máxima.

### 5.2. Levantamento topográfico

Os cortes transversais da secção da bacia são apresentados no esquema a seguir. A Tabela 10 faz a caracterização topográfica e da hidrologia da cheia 2000 para os cortes transversais da bacia nas duas estações com base nas curvas de níveis (anexo 8).

MD<sub>6</sub> e CD<sub>13</sub>- os pontos 6 e 12 da margem direita de Macarretane e Chókwè respectivamente, que consta no anexo 2, obtidos pelo *GPS*;

ME<sub>1</sub> e CE<sub>6</sub>- os pontos 1 e 6 da margem esquerda de Macarretane e Chókwè respectivamente, que consta no anexo 2, obtidos pelo *GPS*;

MD<sub>10</sub> e CD<sub>14</sub> - os pontos 10 e 14 da margem direita de Macarretane e Chókwè respectivamente, que consta no anexo 2, obtidos pela manipulação digital (*GIS*);

ME<sub>3</sub> e CE<sub>8</sub> os pontos 3 e 8 da margem esquerda de Macarretane e Chókwè respectivamente, que consta no anexo 2, obtidos pela manipulação digital (*GIS*).

MD <sub>6</sub>	E372	ME <sub>1</sub>
CD <sub>12</sub>	E35	CE <sub>6</sub>

**Tabela 10:** Caracterização de alguns pontos nas secções transversais de Macarretane e Chókwè

Ponto identificado	Cota (m)	Distância ao rio (m)	Altura hidr. da cheia 2000 (m)	Latitude (S)	Longitude (E)
<b>E-372</b>	36,84	0	2,50	24,40	32,88
ME <sub>1</sub>	36,14	757	3,20	24,40	32,88
ME <sub>3</sub>	40,00	959	0,00	24,40	32,88
MD <sub>6</sub>	35,74	3510	3,60	24,41	32,84
MD <sub>10</sub>	40,00	5784	0,00	24,43	32,85
<b>E-35</b>	28,08	0	3,49	24,50	33,01
CE <sub>6</sub>	29,20	1491	2,37	24,49	33,02
CE <sub>8</sub>	32,00	3670	0,00	24,49	33,04
CD <sub>12</sub>	29,92	3874	1,65	24,51	32,97
CD <sub>14</sub>	32,00	5100	0,00	24,51	32,96

A tabela dá apenas a informação dos pontos extremos dos dois transectos como vem caracterizados. Os pontos extremos foram definidos pelos dois métodos de levantamento (*GPS* e *GIS*)

### 5.3. Cálculo do caudal de cheia 2000

Na estação de Chókwè E-35, começa-se a considerar cheia a partir do nível hidrométrico 4,5m que corresponde um caudal de cerca de 1200m<sup>3</sup>/s. Este ponto crítico é considerado nível de alerta.

O caudal máximo da cheia 2000 (equação 13) é o resultado da soma dos caudais das subsecções dos cortes transversais (equação 11) para a secção da bacia hidrográfica de Chókwè e da Macarretane. O



coeficiente de rugosidade  $K_m$  é dado na tabela do anexo 4 e a área molhada  $A_j$  resulta da equação 12. No cálculo dos caudais de cheia pelo método de Jansen foi usado o coeficiente de rugosidade  $K_m$  mínimo pelas seguintes razões:

1ª: O factor  $K_m$  é inversamente proporcional à rugosidade do terreno. E na altura que ocorreu as cheias o terreno estava totalmente coberto de vegetação, a maior parte de área é cultivada.

2ª: Os valores de caudais calculados para as pequenas cheias aplicando os dois modelos (curva de vazão e de Jansen), há uma maior aproximação nos valores e é por isso a opção  $K_m$  mínimo.

As tabelas 10 e 11 resumem alguns parâmetros e caudais parciais referentes a cheia 2000 para as diferentes subsecções nos transectos de Chókwè e Macarretane, tendo em conta os perfis do anexo 10.

**Tabela 11:** Caudais das subsecções no corte transversal da bacia em Chókwè

Troços Transversal	Altura hidrom. $\Delta h = c_{mx} - c_n$	L. inundada b.(m)	$K_m$	Q.inundação ( $m^3/s$ )
2E-0(R)	10,54	430	10	2753
(R)0-2D	7,10	113	7	287
2D-3D	5,00	50	7	73
3D-4D	3,00	244	9	213
4D-5D	2,80	488	20	855
5D-6D	3,40	553	8	518
6D-7D	4,00	488	20	1459
7D-8D	4,20	878	20	2826
8D-9D	3,30	244	20	547
9D-11D	3,00	195	20	379
11D-12D	2,00	309	6	98
12D-13D	1,62	748	6	173
13D-14D	0,78	780	6	60
2E-3E	2,40	293	20	407
3E-4E	3,00	293	20	569
4E-6E	3,20	488	20	1044
6E-7E	1,97	1398	9	651
7E-8E	0,78	780	6	60
Total		8770		12973

Com este valor de caudal tem-se um erro de cálculo de cerca de 40%.

**Tabela 12:** Caudais das subsecções no corte transversal da bacia em Macarretane E-372

Troços transversais	Altura hidro. $\Delta h = c_{mx-cn}$	L.inundada b.(m)	Km	Q.inundação (m <sup>3</sup> /s)
0-1E	9,1	650	10	3338
0-1D	3,42	476	13	732
1D-2D	5,3	874	20	3990
2D-3D	4,9	260	20	1055
3D-4D	4,5	459	13	1066
4D-5D	4,8	946	8	1489
5D-6D	3,77	494	8	541
6D-7D	3,7	720	8	767
7D-8D	2,84	792	6	425
8D-9D	1,59	480	6	108
9D-10D	0,67	288	6	18
1E-2E	3,16	106	10	111
2E-3E	1,58	119	10	44
Total		6664	13	13685

\* a relação entre a designação dos números e do alfabeto grego (letras) vem nos perfis em anexo.

O caudal máximo das cheias de 2000, estimam-se em 13685m<sup>3</sup>/s e 12973m<sup>3</sup>/s para Macarretane e Chókwè respectivamente. Na cheia 2000, não houve valores exactos dos caudais afluentes nestas estações hidrométricas do Limpopo, os valores calculados é uma aproximação e não existem outros dados para compará-los. Alguns valores de níveis e caudais recebidos da Administração da Água da África do Sul das estações de Beitbrige e do rio do Elefantes não têm relação nenhuma com os valores encontrados.

Os valores de caudais calculados da cheia do ano 2000 nas duas estações (tabelas 11 e 12) tem o valor mais alto à montante do que a jusante o que contraria a situação real do curso de um rio. Segundo Jansen (1994), os caudais e a largura aumentam no sentido à jusante. Da mesma maneira, se se observar a tabela 5 para as estações E-33, E-35, E-36 e E-38, nota-se que os valores de caudais calculados pelas respectivas curvas de vazão tendem a reduzir da montante à jusante.

A tendência decrescente deve-se provavelmente a dois factores:

- O primeiro factor tenha a ver com a estrutura; ao carácter permeável dos tipos de solos ao longo da bacia e a morfologia dos terrenos de ser predominantemente planícies em toda zona do médio e baixo Limpopo onde as água vão se espriar (Conzo, 1999 citando Saranga, 1992).
- O segundo é devido ao grande armazenamento do vale explicado pela grande extensão das planícies inundadas nos níveis mais elevados até o ponto entre as bacia do Limpopo e do

Incomáti, onde se estabeleceram uma comunicação, e que fez reduzir o caudal a jusante de Chókwè. (Imagens satélites).

#### 5.4. Calibragem do coeficiente de Chézy C

Calculado o caudal máximo da cheia 2000, e usando a equação 13, uniformizou-se o coeficiente de rugosidade de Chézy C, de modo a ter um coeficiente constante para todo o transecto. Seguidamente, foram calculados os caudais máximos das cheias do Limpopo, tendo as variáveis Q, h, i, B e B1 mantidos constantes (Tabela 13), como ilustra o cálculo em anexo.

**Tabela 13:** Calibragem de C para secção transversal de Chókwè

Altura hidr. h(m)	$\Delta h = c m x_{-cn}$	L. inundada B(m)	Km	Q.inundação (m <sup>3</sup> /s)
10,54	3,04	8770	13	14365
10.54	3.04	8770	12	13260
10,54	3,04	8770	11	12155
10,54	3,04	8770	10	11050

**Tabela 14:** Calibragem de C no transversal de Macarretane

Altura hidr. (m)	$\Delta h = c m x_{-cn}$	L.inundada B(m)	Km	Q.inundação (m <sup>3</sup> /s)
9,1	3,35	6664	15	15355
9,1	3,35	6664	14	14332
9.1	3.35	6664	13	13308

Das tabelas 13 e 14, obtêm-se os valores de coeficientes de rugosidade aproximadamente homogéneo para cada corte transversal da secção da bacia. Estes coeficientes foram usados para o cálculo de caudais de cheias em combinação com os outros parâmetros descritos. Os coeficientes Km homogéneos são:

- Secção transversal de Macarretane:  $Km=13 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$
- Secção transversal de Chókwè:  $Km=12 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$

#### 5.4.1 Comparação da curva de vazão com rio com planícies inundadas

As larguras das áreas inundadas pelas cheias registadas na bacia do Limpopo são obtidas a partir dos perfis transversais elaborados das diferentes altitudes na secção da bacia. A largura é definida na escala de leitura pelo correspondente nível hidrométrico e pelas distâncias horizontais transversais.

Com o valor B e as outras variáveis de acordo com Jansen (1994), determinaram-se os caudais pela equação 10 conforme a Tabela 15.

**Tabela 15:** Larguras e caudais de cheias da bacia do Limpopo

Ano 1*	Altura h (m) 2*	Largura direita B <sub>D</sub> (m) *	Largura esquerda B <sub>E</sub> (m) *	Largura total B (m) 3*	Q (m <sup>3</sup> /s) Curva de vazão 4*	Q (m <sup>3</sup> /s) Jansen 5*
1955	8,01	375	500	875	5065	4453
1956	6,21	244	406	650	2677	2258
1958	7,88	328	500	828	4865	4112
1959	5,65	154	390	544	2101	1640
1960	5,69	158	390	548	2139	1670
1961	5,93	192	390	582	2379	1887
1966	7,2	260	470	730	3888	3166
1967	7,42	265	470	735	4191	3176
1971	6,6	250	405	655	3125	2493
1972	8,1	340	553	892	5207	4616
1975	8,09	340	550	890	5191	4598
1976	6	210	390	600	2452	1980
1977	8,47	380	614	994	5811	4013
1978	7,18	260	470	730	3861	3153
1981	7,63	263	525	787	4492	3724
1985	5,48	230	400	630	1941	1521
1988	6,6	250	405	655	3125	2493
1996	6,8	260	410	670	3369	2723
1999	6,7	260	400	660	3246	2570
2000	10,54	5100	3670	8770	>9214	12973

\*- a distância em relação ao primeiro ponto da escala de medição (toco 1,5 metros);

1\*- ano com registo de cheias (Maluvane, 2000);

2\*- alturas hidrométricas máximas anuais (Maluvane, 2000);

3\*- Estimação da largura com base no 2\* e o perfil do corte transversal da bacia, obtido pelo GPS e interpretação do mapa GIS;

4\*- Cálculo do caudal com base na equação da curva de vazão (Maluvane, 2000);

5\*- Cálculo do caudal com base no 2\* e 3\* (equação 9).

A relação entre a altura de água  $h$  e o caudal  $Q$  (gráfico 1), representa a curva de vazão para este ponto. Ela permite para fazer leituras aproximadas de caudais de cheias tendo se registados os níveis de água. A curva cresce rapidamente até níveis de cerca de 8 metros, e regista um crescimento lento para valores de níveis maiores que 8 metros. Isto acontece porque na fase de enchente, o rio tem o seu percurso no leito normal, mas depois do nível 8, aumenta a sua largura de inundação quando as águas transbordam o seu leito normal alagando as áreas da bacia.

Os valores de caudais calculados usando os dois modelos (curva de vazão dada pela ARA-Sul e *river with flood plains* de Jansen) têm uma relação de dependência directa e mais forte (gráfico 3), visto que, os coeficientes de correlação  $r$  entre caudais ( $Q-Q$ ) e entre níveis e caudais ( $h-Q$ ) são 0,987 e 0,950 respectivamente. O mesmo acontece para valores correspondentes onde a equação é recomendada ( $h < 9m$ ) os coeficientes de correlação são respectivamente 0,993 e 0,980 para caudal-caudal  $Q-Q$  e altura-caudal  $h-Q$ .

Os dois modelos usados para os cálculos são uma estimativa do valor real, e portanto, o modelo *river with flood plains* requer um conhecimento profundo para estimar a rugosidade das planícies inundadas. A aproximação dos modelos pode ser vista no gráfico 3 e que de certa maneira deveria ser uma linha recta. Mas, não existe nenhuma comparação neles, porque na sua elaboração toma em conta diferentes parâmetros. Em todo caso, o cálculo de caudais de inundação é uma tentativa da verdadeira grandeza dos caudais da onda de cheias que afluíram nas duas estações de Chókwè e Macarretane.

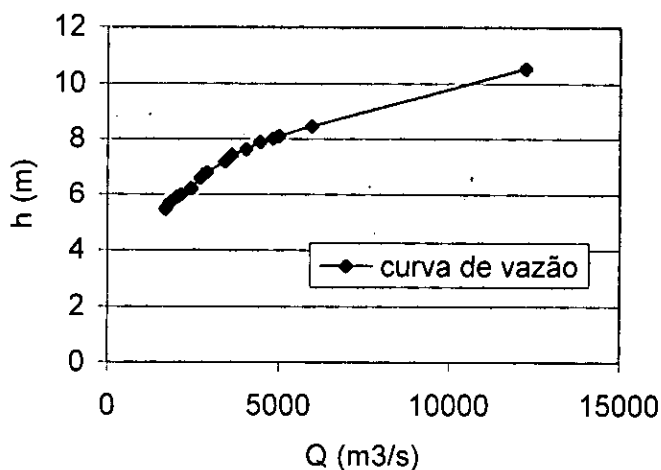


Gráfico 1: A relação entre o nível hidrométrico e o caudal na E-35

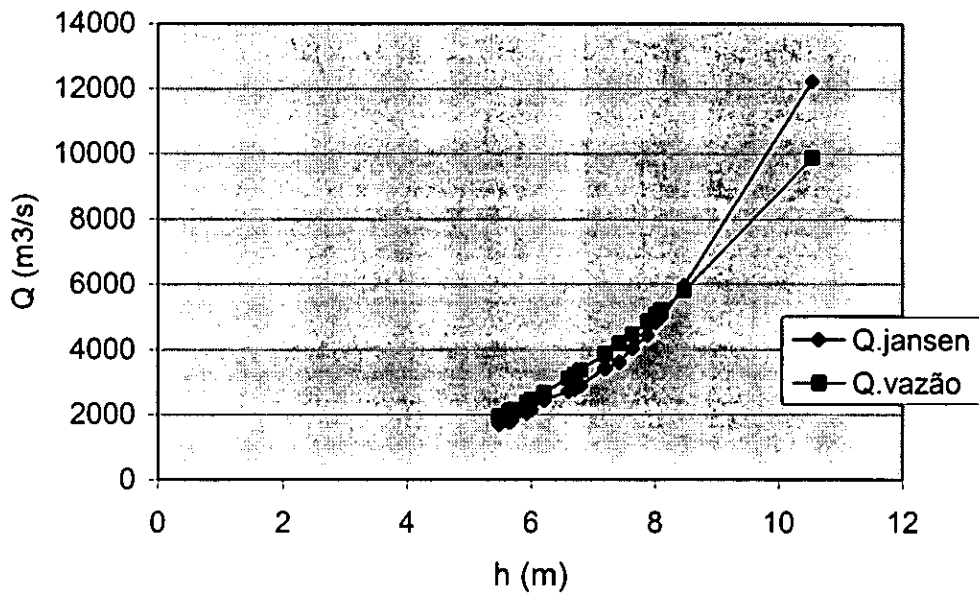


Gráfico 2: Curvas de vazão dadas pelos dois modelos na E-35.

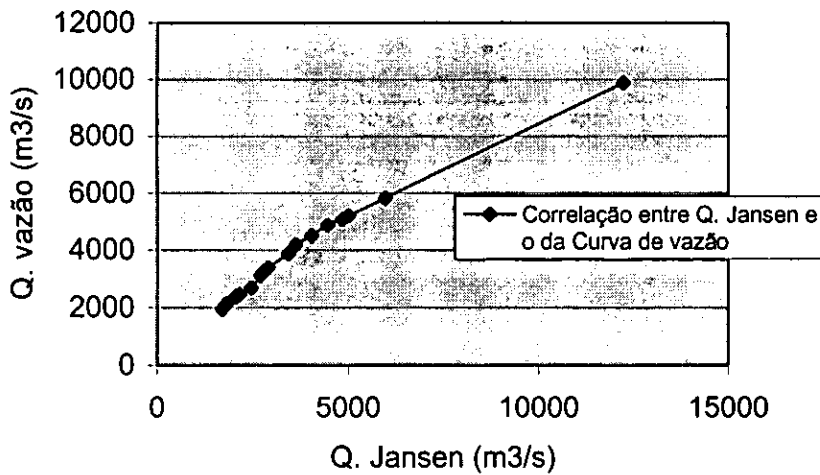


Gráfico 3: Correlação dos dois modelos de cálculo de caudais de cheias na E-35

### 5.5. Probabilidade de ocorrência de caudais extremos

A partir dos dados de caudais calculados pelo método *river floods plains* nas estações hidrométricas do Limpopo, no período que vai desde 1954 até 2000 (Tabela 16), foram calculadas as probabilidades de

ocorrência de caudais de cheias. Assim sendo, as probabilidades de ocorrências de cheias  $Q_n$  e o período de retorno são dados pela expressão 16.

A probabilidade de caudais extremos compreende o período de registo de caudais extremos desde 1954 a 2000 na E-35.

Na análise de caudais extremos para a estação hidrométrica de Chókwè foi usada a distribuição Pearson tipo III e log-Normal. Para a estação hidrométrica de Macarretane, não foi feita a análise por escassez de informação referente a valores extremos de níveis e de caudais anuais.

**Tabela 16:** Análise de probabilidade e período de retorno de caudais extremos na E-35

Tr (anos)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	5000	10000
w (1*)	1,18	1,79	2,15	2,54	2,8	3,03	3,26	3,53	3,72	4,13	4,29
Z (2*)	0	0,84	1,28	1,75	2,05	2,33	2,58	2,88	3,09	3,54	3,72
$K_T$ (3*)	0,18	0,84	1,1	1,33	1,44	1,53	1,59	1,66	1,69	1,75	1,76
Lg Q (4*)	3,21	3,59	3,75	3,87	3,94	3,99	4,03	4,07	4,09	4,12	4,13
Q (m <sup>3</sup> /s)5*	1612	3932	5578	7498	8739	9803	10703	11668	12250	13207	13485

1\* - calculado pela equação (24)

2\* - estimado pela equação (23)

3\* - Estimado pela equação (22)

4\* - obtido pela equação (21)

5\* - anti-logaritmo de 4\*

Com base na tabela 16 foi estabelecida a relação entre alguns picos de cheias (caudais e níveis) e a largura que pode ser inundada com os respectivos períodos de retorno na bacia do Limpopo, concretamente para a estação do Chókwè.

**Tabela 17:** A relação entre picos de cheias e a largura de inundação

Altura h (m)	Largura direita B <sub>D</sub> (m)	Largura esquerda B <sub>E</sub> (m)	Largura total B (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Tr (anos)
5,65	154	390	544	1640	2
7,63	263	525	787	3724	5
8,47	380	614	994	5501	10
9,50	4550	3120	7670	7454	25
10,00	4875	3412	8287	10054	200
10,54	5100	3670	8770	12973	5000

Os períodos de retorno calculados com base na distribuição de Pearson tipo III apresentam uma ligeira diferença comparados com valores secundários fornecidos pelos Serviços de Hidrologia da ARA-Sul. Esta discrepância é bem destacada para o período de retorno de 5.000 anos, tendo-se obtido um valor muito inferior. Admite-se a hipótese de ter usado outro tipo de distribuição de frequências e quando assim acontece, sempre ocorre uma ligeira diferença nos resultados finais.



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1. Conclusões

- ◆ A onda de cheia 2000 que inundou o vale do Limpopo na zona do Chókwè e Macarretane estima-se ter magnitude de  $12973\text{m}^3/\text{s}$  e  $13685\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente. Pelo menos o valor de Chókwè é contraditório ao valor estimado pela ARA-Sul através da equação da curva de vazão aplicada para a estação E-35 onde estimam um valor superior a  $9214\text{ m}^3/\text{s}$ .
- ◆ O modelo *river with flood plains* e a equação da curva de vazão são aproximações dos valores reais dos caudais. Em ambos casos, os valores calculados são extraordinários em período de grandes cheias e não é fácil fazer a comparação. Mas, as condições da secção (topografia) são apropriadas para usar o modelo de Janssem.
- ◆ A onda de cheia 2000 inundou todo o vale do Limpopo, desde o distrito de Guijá (margem esquerda do rio Limpopo) até distrito de Chókwè (margem direita do rio) numa largura máxima de cerca de 8800 metros do transecto E-35; e cerca de 6600 metros de largura na região da Aldeia da Barragem.
- ◆ O caudal de cheia que inundou todo o vale do Limpopo na área drenada de Chókwè tem uma magnitude cujo período de retorno é de cerca de 100 anos se ter em conta o caudal estimado em  $9214\text{m}^3/\text{s}$  e teria um período de retorno de 5.000 anos para o valor de  $12973\text{m}^3/\text{s}$ . E para o intervalo de análise, tem um período de retorno de 46 anos, ou seja foi registado uma vez num período de 46 anos previstos.
- ◆ A relação dos dois modelos de cálculo de caudais é linear até uma altura hidrométrica de 8,47 metros e fica biunívoca quando a escala fica submersa.

### 6.2. Recomendações

Tendo em consideração os resultados desta pesquisa, recomenda-se:

- Estudos do género devem ser feitos noutros pontos ao longo da vale do rio Limpopo com objectivo para obter um mapa de inundação mais completo e, ao mesmo tempo, avaliar melhor o impacto das cheias.

- A análise de período de retorno dos caudais de cheias, também deverá considerar as precipitações de modo a obter a sua relação com o caudal.
- Também deve ser feito estudo com finalidade de avaliar o impacto da cobertura vegetal na redução do escoamento superficial da bacia e o seu valor na atenuação das cheias.
- Discriminar a política de modo a envolver as populações ribeirinhas para contribuir na gestão dos recursos florestais e hídricos da bacia e mudança de comportamento, visto que eles são beneficiários.
- É preciso analisar outras variáveis tais como: o tipo de solo da bacia, cobertura vegetal, actividades humanas com o intuito de reduzir as causas e os efeitos das grandes cheias.

#### **Limitações**

1. A falta do pessoal técnico muito experiente na estimativa da rugosidade do terreno influenciou a precisão do método.
2. A falta de vias de acesso, existência de canais de irrigação e por vezes vegetação fechada constituíam grandes obstáculos no caminhar perpendicular ao rio.
3. A ausência de meios de comunicação (telefone), factor tempo de permanência no campo e a falta de alguns acessórios do equipamento *GPS*, contribuíram negativamente na cobertura dos transectos (poucos pontos determinados).

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

**Balói, Aristides e Mungói, Cláudio** (1997). Múltiplo papel da Construção de Barragens. *Ecojornal, Factsheet n.º 1*. Maputo: Grupo de Trabalho Ambiental (gta).

**Bereslawiski, E. Patrícia** (1988). *UNDP/UNDTCD Project MOZ/86/020 Relatório 14/88*. Maputo: DNA.

**Chivambo, M. Belarmino** (2000). *Análise Hidrológica do evento de cheia*. Maputo: DNA.

**Chow, Van Der** (1988). *Applied Hydrology*.

**Conzo, Simão Fernando** (1999). Gestão dos rios internacionais em Moçambique. *Estudo do caso: Baixo Limpopo*. Tese de Licenciatura. Maputo: Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Letras.

**Cunha, L. Veiga** (1980). *A gestão da Água: Princípios fundamentais e sua aplicação em Portugal*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbakian.

**Gomes, F., Xirinza, S., Mafalacusser, J., Marque, M. R.** (1998). Research Project on water demand management in South Africa. *Mozambique Country Study. Cases' study: Chókwè irrigation scheme*. Maputo: UICN.

**INIA e FAEF** (1995). *Manual de Descrição do Solo e Codificação para o Banco de Dados (SDB)*. Relatório nº 72. Maputo.

**Lencastre A. e Franco F.M.** (1984). *Lições de Hidrologia*. Portugal: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

**Linsley, JR Ray K; Kohler, Max A. E Pallhus, Joseph L. H** (1988). *Hydrology for Engineers*. International Edition, Singapore.

**Loureiro, João Mimoso** (1973). *Caracterização climática da bacia hidrográfica de Limpopo*. Lourenço Marques: DNA.

**Maluvane, Paulino** (2000). *Relatório da cheia 2000*. Maputo: ARA-Sul, Departamento Técnico.

**Matos, A. Barreto** (1962-1963). *Lições da cadeira de Topografia e Elementos de Geodesia*. Lourenço Marques.

**Mertens, Emílio e Loureiro, João** (1970). *Monografia da Bacia do Limpopo*. Lourenço Marques: DNA

**MICOA and PAP/RAC** (1998). *Lower Limpopo River Basin Assessment*.

**Jansen, P. Ph.** (1994). *Principals of River Engineering: The non-tidal alluvial river*. Netherlands: U.M -III, Delftse

**Partidaria, Maria do Rosário & Jesus, Júlio de** (1994). *Avaliação do Impacto Ambiental*. Portugal: Centro do estudo de Planeamento e Gestão do Ambiente (CEPGA).

**Pereira, Francisco Lopes** (1983). *Obra 54000 ha - Chókwè. Sistema de Regadio Heróis de Moçambicano-1ª fase 2500 ha*. Maputo: DNHA, anexo 3-Engenharia, AGROCOMPLET.

**Serviços de Hidrologia** (2001). Com. Interna N°S/n°/SH/2001, Xai-Xai.

**Sardinha, Augusto M. e Macedo, F. Wolfgang** (1981). *Hidráulica Florestal*. Vila Real: Instituto Universitário de Trás-Os-Monter e Alto Douro.

**Shaw, Elizabeth M.** (1994). *Hydrology in Practice*. 3ª ed. London: Chapman & Hall.

**Siyka, Pavlova** (1979). *Aproveitamento Hidrológico do Médio Limpopo. Campo de rega-Objecto 14-5 "Chókwè-Macareane"*. Maputo: MOPH, DNA-Serviços de estudos e Projectos.

**Torcato, Maria de Lurdes; Linley, David e outros** (2001). *Compreender as Cheias. MoçAmbiente*; nº 40 (pag. 24-28). Maputo: MICOA.

**Zinting, Harm Albert** (1996). *Monografia Hidrográfica da Bacia do rio Limpopo*. Maputo: DNA.

**Anexo 1:** Dados de levantamento de campo para os transectos de Chókwè e Macarretane através de GPS e GIS.

**1.1. Transecto de Chókwè E-35; margem direita**

- Cota máxima da cheia 2000 = 31,57 metros
- Cota do leito = 21,03 metros

ID Ponto	Latitude (S)	Longitude (E)	Cota do Ponto cn (m)	Distância à origem (m)
0 (Ponto de referência)	24 30 10	33 00 20	21,03	0,00
1 (Ponto no rio)	24 30 10	33 00 20	24,88	113,00
2 (Limínigrafo)	24 30 10	33 00 20	28,08	155,00
3 (Dique do rio)	24 30 11,58	33 00 18,20	29,78	183,17
4 (Estação do INIA)	24 30 18,06	33 00 13,17	28,53	420,44
5 (Campo em pousio)	24 30 19,27	32 59 54,42	28,90	892,89
6 (Vegetação rasteira)	24 30 22,52	32 59 34,70	27,39	1452,24
7 (Vala drenagem I)	24 30 16,86	32 59 15,18	27,53	1960,74
8 (Campo cultivado- milho)	24 30 20,11	32 58 45,29	27,14	2807,98
9 (D2 do canal- Dique)	24 30 24,20	32 58 25,73	29,30	3369,77
10 (Campo pousio)	24 30 25,92	32 58 22,25	27,77	3473,99
11 (Estrada Macarretane)	24 30 27,63	32 58 18,9	30,15	3575,04
12 (Missão Velha- Chókwè)	24 30 32,3	32 58 8,96	29,53	3874,52
13	24 30 38,92	32 57 15	30,00	4745,00
14	24 31 6,49	32 55 56,47	32,00	5232,50

**Margem esquerda**

ID Ponto	Latitude (S)	Longitude (E)	Cota do Ponto cn (m)	Distância à origem (m)
1 (Ponto no rio -Guijá)	24 30 5,53	33 00 33,25	22,35	279,91
2 (Na margem do rio)	24 30 3,14	33 00 38,01	28,93	432,08
3 (Vila de Guijá)	24 29 57,69	33 00 46,07	29,36	710,65
4 (Campo cultivado)	24 29 51,13	33 00 53,92	27,46	1003,77
5 (Campo cultivado)	24 29 41,12	33 01 3,15	27,82	1393,32
6 (Bairro nº 2 do Guijá)	24 29 38,20	33 01 5,08	29,21	1491,21
7	24 29 28,92	33 01 12,07	30,00	1917,50
8	24 29 16,22	33 01 37,06	32,00	3670,00

1.2. Transecto de Macarretane E-372; margem direita

- Cota absoluta máxima da cheia 2000 =39,34 m
- Cota absoluta da soleira de descarga =29,34 m

ID Ponto	Latitude (S)	Longitude (E)	Cota do Ponto cn (m)	Distância à origem (m)
0 (Ponto de Referência- Barragem)	24 24 10	32 52 30	36,84	0,00
1 (Aldeia da Barragem)	24 24 16,92	32 52 14,87	35,01	476,34
2 (Campo cultivado)	24 24 50,58	32 51 49,01	32,89	1350,35
3 (Topo do dique do canal)	24 24 25,23	32 51 35,32	35,92	1610,23
4 (Campo cultivado – hortícolas)	24 24 25,87	32 51 18,64	33,63	2069,00
5 (Campo em pousio)	24 24 26,56	32 50 44,52	35,63	3015,40
6 (Campo cultivado – milho)	24 24 23,98	32 50 26,37	35,74	3509,79
7	24 24 47,84	32 49 15,88	35,50	4224,00
8	24 24 52,7	32 48 17,65	37,50	5016,00
9	24 24 56,76	32 47 45	38,00	5496,00
10			40,00	5784,00

Margem esquerda

ID Ponto	Latitude	Longitude	Cota do Ponto cn (m)	Distância à origem (m)
0 (Ponto de Referência- Barragem)	24 24 10	32 52 30	36,84	0,00
1 (Margem na Albufeira)	24 24 17,14	32 52 49,09	32,16	651,57
2 (Estrada Macarretane-Mabalane)	24 24 15,12	32 52 52,11	36,14	756,78
3			40,00	959,00

**Anexo 2:** Cotas, alturas hidrométricas e distância em diferentes pontos durante a cheia máxima de 2000.

2.1. Transecto de Chókwè E-35; margem direita.

ID Ponto	Cota do ponto cn (m)	Altura hidrométrica h (m)	Distância à origem (m)
0 (Ponto de referência)	21,03	10,54	0,00
1 (Ponto no rio)	24,88	6,69	113,00
2 (Limnógrafo)	28,08	3,49	155,00
3 (Dique do rio)	29,78	1,79	183,17
4 (Estação do INIA)	28,53	3,04	420,44
5 (Campo em pousio)	28,90	2,67	892,89
6 (Vegetação rasteira)	27,39	4,18	1452,24
7 (Vala drenagem I)	27,53	4,04	1960,74
8 (Campo cultivado- milho)	27,14	4,43	2807,98
9 (D2 do canal- Dique)	29,30	2,27	3369,77
10 (Campo pousio)	27,77	3,80	3473,99
11 (Estrada Macaretane)	30,15	1,42	3575,04
12 (Missão Velha- Chókwè)	29,53	2,04	3874,52
13	30,00	1,57	4745,00
14	32,00	-0,43	5100

Margem esquerda

ID Ponto	Cota do ponto Cn (m)	Altura hidromé trica h(m)	Distância à origem (m)
1 (Ponto no rio -Guijá)	22,35	9,22	279,91
2 (Na margem do rio)	28,93	2,64	432,08
3 (Vila de Guijá)	29,36	2,21	710,65
4 (Campo cultivado)	27,46	4,11	1003,77
5 (Campo cultivado)	27,82	3,75	1393,32
6 (Bairro nº 2 do Guijá)	29,21	2,36	1491,21
7	30,00	1,57	1917,50
8	32,00	-0,43	3670,00

2.2. Transecto de Macarretane E-372; margem direita

ID Ponto	Cota do ponto Cn (m)	Altura hidromé- trica h (m)	Distância à origem (m)
0 (Ponto de Referência- Barragem)	36,84	2,50	0,00
1 (Aldeia da Barragem)	35,01	4,33	476,34
2 (Campo cultivado)	32,89	6,45	4350,35
3 (Topo do dique do canal)	35,92	3,42	1610,23
4 (Campo cultivado – hortícolas)	33,63	5,71	2069,00
5 (Campo em pousio)	35,36	3,98	3015,40
6 (Campo cultivado – milho)	35,78	3,56	3509,79
7	35,50	3,84	4224,00
8	37,50	1,84	5016,00
9	38,00	1,34	5496,00
10	40,00	-0,66	5952,00

Margem esquerda

ID Ponto	Cota do ponto Cn (m)	Altura hidromé- trica h (m)	Distância à origem (m)
0 (Ponto de Referência- Barragem)	36,84	2,50	0,00
1 (Margem na Albufeira)	32,16	7,18	651,57
2 (Estrada Macarretane-Mabalane)	36,18	3,16	756,78
3	40,00		



**Anexo 3:** Descrição do uso de Terra em termos de tipo e do uso, da vegetação em termos de estrutura e cobertura de capim na altura de observação.

3.1. Transecto de Chókwè E-35; margem direita

- Data: 12/10/2001
- Tempo: céu limpo

ID Ponto	Uso de Terra	Culturas	Vegetação		Observação
			Estrutura	Cobertura de capim	
0 a 3	ST	PA; MG			Cultivo consorciado com culturas em dispersas
3					Dique de protecção ao longo do rio
3 a 4	ST; O	PA; BA; PO; CR	NR	0; 2	Culturas dispersas antes da estrada e uma vegetação de gramínea depois da estrada
4	O	PO	SAA	2	Vegetação de gramínea e árvores de quebra vento para o campo de experimentação do INIA.
4 a 5	RE; O	BD; PO	NR	0; 3	INIA - campo de batata-doce
5	O	PO	SAR	3	Terreno em pousio e aparentemente cultivo mecanizado
5 a 6	O	PO	MA	3	Mata de vegetação rasteira e solos com muitas fendas de pequeno diâmetro.
6	O	PO	MA	3	Vegetação rasteira e de gramínea depois duma queimada
6 a 7	P; S	PO	NR	2	Cultivo mecanizado e área de pastagem no inverno.
7					
7 a 8	O; RE	PO; MI	NR		
8	RE	MI			Cultivo de milho usando a rega.
8 a 9	RE; P			0; 1	Terreno em lavoura
9					Dique ao longo do canal principal no ponto D2.
9 a 10	P	PO	NR	1	
10	P	PO	NR	1	Área cultivada e em tempo seco é usada para pastagem.
10 a 11	P	PO	NR	1	
11					
11 a 12	ST	PO	NR	2	Machamba de algodão perto duma reserva de eucaliptos (zona de Missão Velha).
12	ST	PO	NR	2	Campo de algodão na época seca.

Margem esquerda

- Data: 12/10/2001;

- Tempo: Céu limpo

ID Ponto	Uso de Terra		Vegetação		Observação
	Tipo	Culturas	Estrutura	Cobertura de capim	
0 a 1	O	PO			Área dunar do rio
1	O	PO	SSA	3	Ponto na margem do rio
1 a 2	ST	PA; BA	NR	1	Zona residencial
2	ST	BD	NR	0	Zona residencial
2 a 3	ST	BA; PA; MD	NR	2	Zona residencial
3	P	PO	NR	3	Zona residencial
3 a 4					Zona residencial
4	O	PO		2	Área cultivada em pousio numa depressão sujeita as inundações
4 a 5					Área cultivada em pousio numa depressão sujeita as inundações
5		P; PO		1	Área cultivada em pousio numa depressão sujeita as inundações
5 a 6					
6					Dique no bairro 2 da Vila de Guijá
6 a 7	ST; O	BA; PA; MG	NR	2	Zona residencial no bairro 2 da Guijá
7	O; PT	PO	NR	2	Zona residencial no bairro 2 da Guijá

## 3.2. Transecto de Macarretane E-372; margem direita

- Data: 17/10/2001

- Tempo: céu limpo

ID Ponto	Uso de Terra	Culturas	Vegetação	Cobertura de capim	Observação
0 a 1	ST	PA; BA; CR	NR	0	Zona residencial com algumas árvores de frutas e de sombra
1	ST	PA; BA; CR	NR	0	Zona residencial com algumas árvores de frutas e de sombra
1 a 2	O	PO	NR	3	Campo de cultivo no verão
2	O	PO	NR	0	Campo de cultivo no verão
2 a 3	O; ST	BD; PO	NR	3	Campo de cultivo no verão
3	O	PO	NR	2	Dique ao longo do canal
3 a 4	O	PO	NR	2	Mata com vegetação de gramínea
4	RS	HO	NR	2	Campo de cultivo usando a rega
4 a 5			NR	2	Mato aberto com vegetação de gramíneas
5	RS	HO; MI	NR	2	Campo de cultivo usando fonte de água de rega a partir uma represa próxima.
5 a 6	O	PO	BS	3	
6	O	PO	NR	2	Campo com restolhos na estação seca perto dum mato aberto.

Margem: esquerda

- Data: 17/10/2001
- Tempo: céu limpo

	Uso de Terra		Vegetação		
ID Ponto	Tipo	Culturas	Estrutura	Cobertura de capim	Observação
1	O		MA	1	Área sob controlo da albufeira
1 a 2	O		MA	1	Área sob controlo da albufeira
2	O		MGS	1	Área sob controlo da albufeira

## USO DE TERRA

- tipo

- O aparentemente sem uso  
ST sequeiro tradicional (sem insumos externos)  
RE rega, empresarial (média e grande escala, >1 ha)  
RS rega, de subsistência/tradicional (pequena escala, <1ha)  
PT pastagem tradicional  
P pastagem não especificada

7  
FONTE

- Culturas

- PO pousio; MI milho; HO horticolas; BD bata-doce; BA banana; MG manga;  
PA papaia; CR cana-de-açúcar

## VEGETAÇÃO

- estrutura

### Árvores dominantes

altura <20 m

cobertura 40-80% bosque semi-aberto (woodland) – BS

### Árvores e arbustos

Cobertura 20-40% mato semi-aberto (open bushland) – MA

Cobertura <20% savana arbórea – arbustiva (bush grassland) – SAA

### Arbustos dominantes

Cobertura 40-80% matagal semi-aberto (shrubland) – MGS

Cobertura <20% savana arbustiva (shrub grassland) – SAR

### Outros

Não relevante (sob cultura) – NR

### Cobertura de capim

Estimação da percentagem da superfície do terreno (semi-) natural com cobertura de capim (ervas).

- 0 0-15%  
1 15-40%  
2 40-80%  
3 >80%

**Anexo 4:** Estimativa dos coeficientes de rugosidade de Manning Km a partir das tabelas do anexo 3 e comparado com a tabela de estimação de rugosidade para cursos de água naturais (Lencastre e Franco, 1984).

4.1. Transecto de Chókwè E-35; margem direita

ID. Ponto	Descrição da ocupação do terreno	Km		
		máximo	normal	mínimo
0	Leito de secção irregular e rugosa	29		10
0 a 3	Secção irregular e rugosa	29	-	10
3 a 4	Mato médio a denso no inverno	22	14	9
4 a 5	Área cultivada	33	25	20
5 a 6	Árvores com maior densidade, pouco crescimento Sob coberto, com um nível abaixo dos ramos	13	10	8
6 a 7	Áreas cultivadas	33	25	20
7 a 8	Áreas cultivadas	33	25	20
8 a 9	Áreas cultivadas	33	25	20
9 a 10	Vegetação herbácea baixa	33	29	20
10 a 11	Vegetação herbácea baixa	33	29	20
11 a 12	Áreas cultivadas	33	25	20
12 a 13	Mato médio a denso no inverno	14	10	6
13 a 14	Mato médio a denso no inverno	14	10	6

Margem esquerda

ID. Ponto	Descrição da ocupação da terra	máximo	normal	mínimo
0 a 1	Leito de secção irregular e rugosa	29		10
1 a 2	Área residencial com árvores de frutas dispersas	33	25	20
2 a 3	Área residencial com árvores de frutas dispersas	33	25	20
3 a 4	Área residencial com árvores de frutas dispersas	33	25	20
4 a 5	Áreas cultivadas	33	25	20
5 a 6	Áreas cultivadas	33	25	20
6 a 7	Áreas cultivadas	33	25	20
7 a 8	mato disperso, vegetação cerrada	29	20	14
8 a 9	Mato médio a denso	14	10	6

4.2. Transecto de Macarretane E-372; margem direita

ID. Ponto	Descrição da ocupação da terra	máximo	normal	mínimo
0 a 1	Zona residencial com árvores de frutas	20	17	13
1 a 2	Área cultivada	33	25	20
2 a 3	Área cultivada	33	25	20
3 a 4	Troço com troncos e com vegetação arbustiva	20	14	13
4 a 5	Árvores com maior densidade, poucas árvores caídas	13	10	8
5 a 6	Mato disperso e vegetação cerrada	29	20	14
6 a 7	Área cultivada	33	25	20
7 a 8	Mato médio à denso no verão	14	10	6
8 a 9	Mato médio à denso no verão	14	10	6



**Anexo 5: Níveis e caudais máximos anuais registados na bacia do Limpopo na estação E-35**

Ano	h(m)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Ano	h(m)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Ano	h(m)	Q(m <sup>3</sup> /s)
1954	3,75	700	1970			1986	2,86	310
1955	8,01	5065	1971	6,6	3130	1987	3	360
1956	6,21	2680	1972	8,1	5210	1988	6,6	3130
1957	6,21	2680	1973	1,32	50	1989	2,63	240
1958	7,88	4870	1974			1990	2,85	310
1959	5,65	2100	1975	8,09	5190	1991	4,46	1120
1960	5,69	2140	1976	6	2450	1992		
1961	5,93	2380	1977	8,47	5810	1993	4,25	990
1962	2,62	240	1978	7,18	3861	1994	2,43	190
1963			1979			1995	3,65	650
1964			1980			1996		3370
1965			1981	7,63	4492	1997		730
1966	7,2	3890	1982			1998		834
1967	7,62	4190	1983	1,09	30	1999		3245
1968			1984	3,47	560	2000	10,54	9214
1969			1985	5,48	1940			

**Anexo 6:** Análise de probabilidade e período de retorno das cheias do rio Limpopo

- Estação hidrométrica: E-35

Ano	Q(m <sup>3</sup> /s)	Ordem m	Tr	logx	(logx-logx) <sup>3</sup>
1954	700	25	1,41	2,8451	-0,0172
1955	5065	4	9,10	3,7046	0,2172
1956	2680	14	2,53	3,4281	0,0342
1957	2680	15	2,36	3,4281	0,0342
1958	4870	5	7,23	3,6875	0,1992
1959	2100	19	1,86	3,3222	0,0105
1960	2140	18	1,97	3,3304	0,0117
1961	2380	17	2,08	3,3766	0,0204
1962	240	31	1,14	2,3802	-0,3784
1966	3890	8	4,47	3,5899	0,1151
1967	4190	7	5,12	3,6222	0,1396
1971	3130	12	2,96	3,4955	0,0603
1972	5210	2	18,88	3,7168	0,2307
1973	50	34	1,04	1,6990	-2,7706
1975	5190	3	12,28	3,7152	0,2289
1976	2450	16	2,21	3,3892	0,0233
1977	5810	1	40,84	3,7642	0,2884
1978	3861	9	3,96	3,5867	0,1128
1981	4492	6	5,99	3,6524	0,1654
1983	30	35	1,01	1,4771	-4,3018
1984	560	27	1,31	2,7482	-0,0448
1985	1940	20	1,77	3,2878	0,0063
1986	310	29	1,22	2,4914	-0,2294
1987	360	28	1,26	2,5563	-0,1638
1988	3130	13	2,73	3,4955	0,0603
1989	240	32	1,10	2,3802	-0,3784
1990	310	30	1,18	2,4914	-0,2294
1991	1120	21	1,68	3,0492	-0,0002
1993	990	22	1,61	2,9956	-0,0013
1994	190	33	1,07	2,2788	-0,5610
1995	650	26	1,36	2,8129	-0,0245
1996	3370	10	3,56	3,5276	0,0763
1997	730	24	1,47	2,8633	-0,0139
1998	834	23	1,54	2,9212	-0,0061
1999	3245	11	3,23	3,5112	0,0678
n	35				
Σ	79137			108,6218	-7,0180
Média	2261,057				
σQ	1784,688				
Méd. logQ				3,1035	
σlogQ				0,5821	
G					-1,1

Tr(anos)	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	5000	10000
W(1*)	1,18	1,79	2,15	2,54	2,8	3,03	3,26	3,53	3,72	4,13	4,29
Z(2*)	0	0,84	1,28	1,75	2,05	2,33	2,58	2,88	3,09	3,54	3,72
KT(3*)	0,18	0,84	1,1	1,33	1,44	1,53	1,59	1,66	1,69	1,75	1,76
LgQ(4*)	3,21	3,59	3,75	3,87	3,94	3,99	4,03	4,07	4,09	4,12	4,13
Q(m <sup>3</sup> /s)5*	1612	393 2	5578	7498	8739	9803	10703	11668	12250	13207	13485

1\* - calculado pela equação (24)

2\* - estimado pela equação (23)

3\* - Estimado pela equação (22)

4\* - obtido pela equação (21)

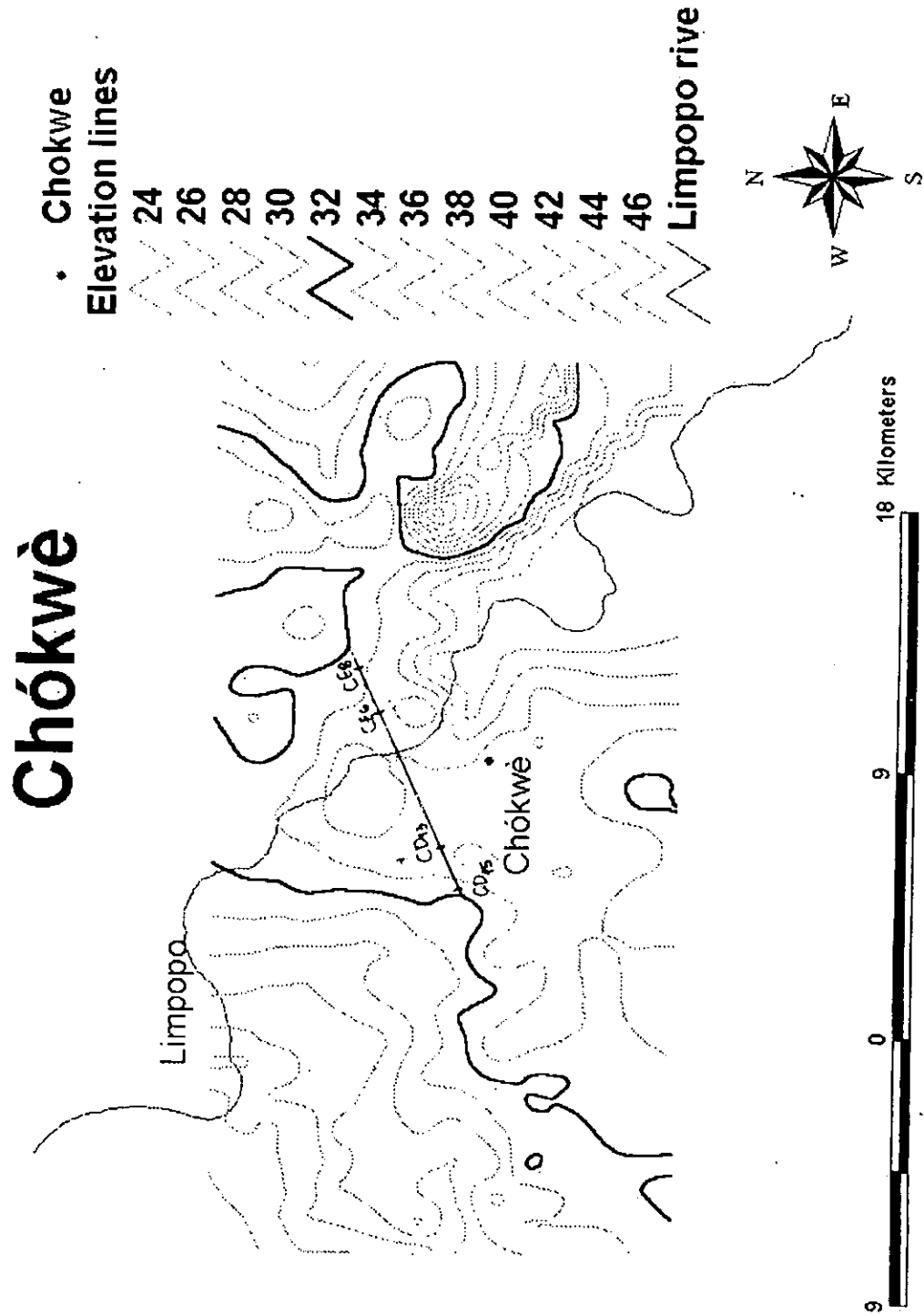
5\* - anti-logaritmo de 4\*

n - tamanho da amostra

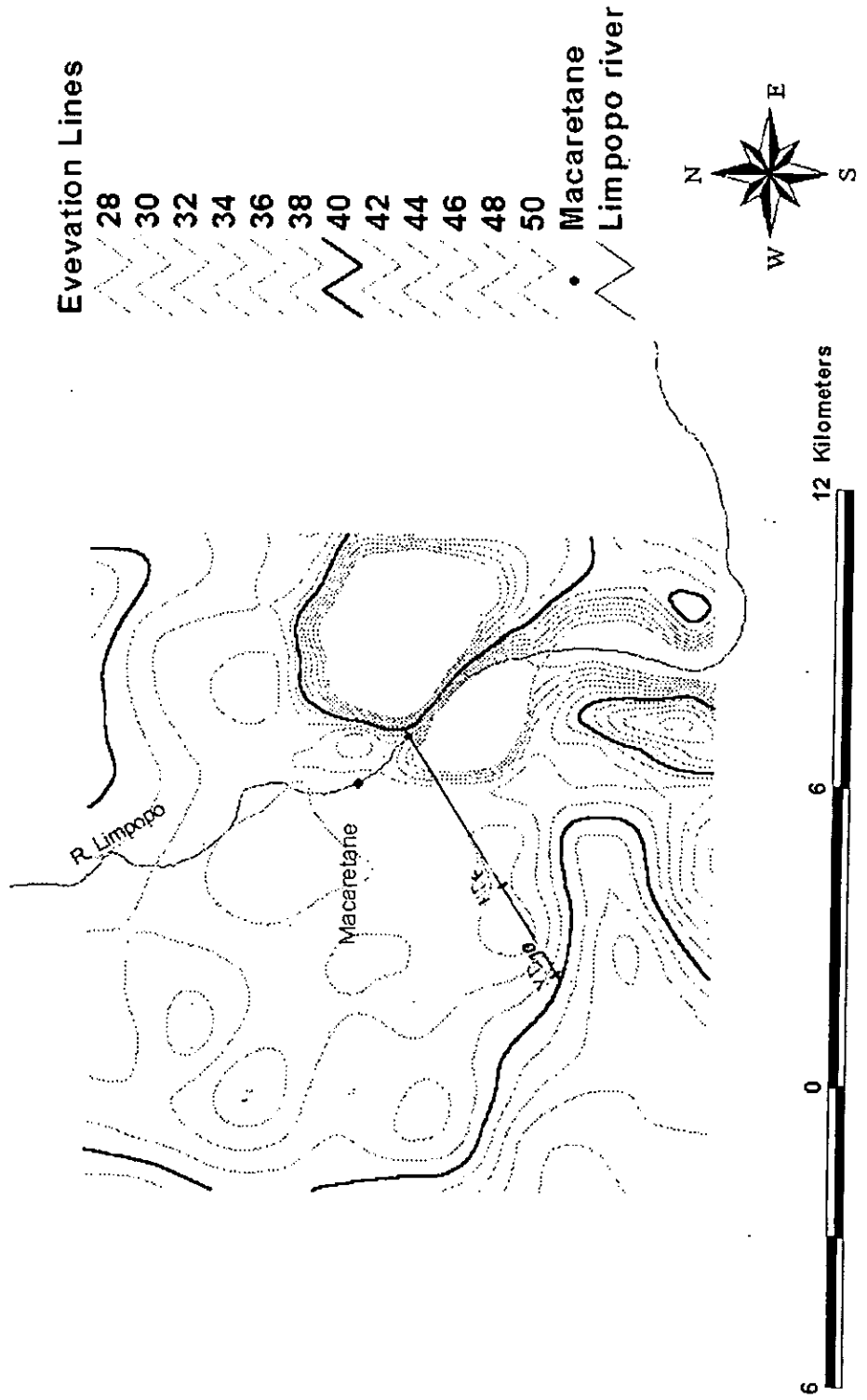
m - posição do evento em ordem da sua magnitude

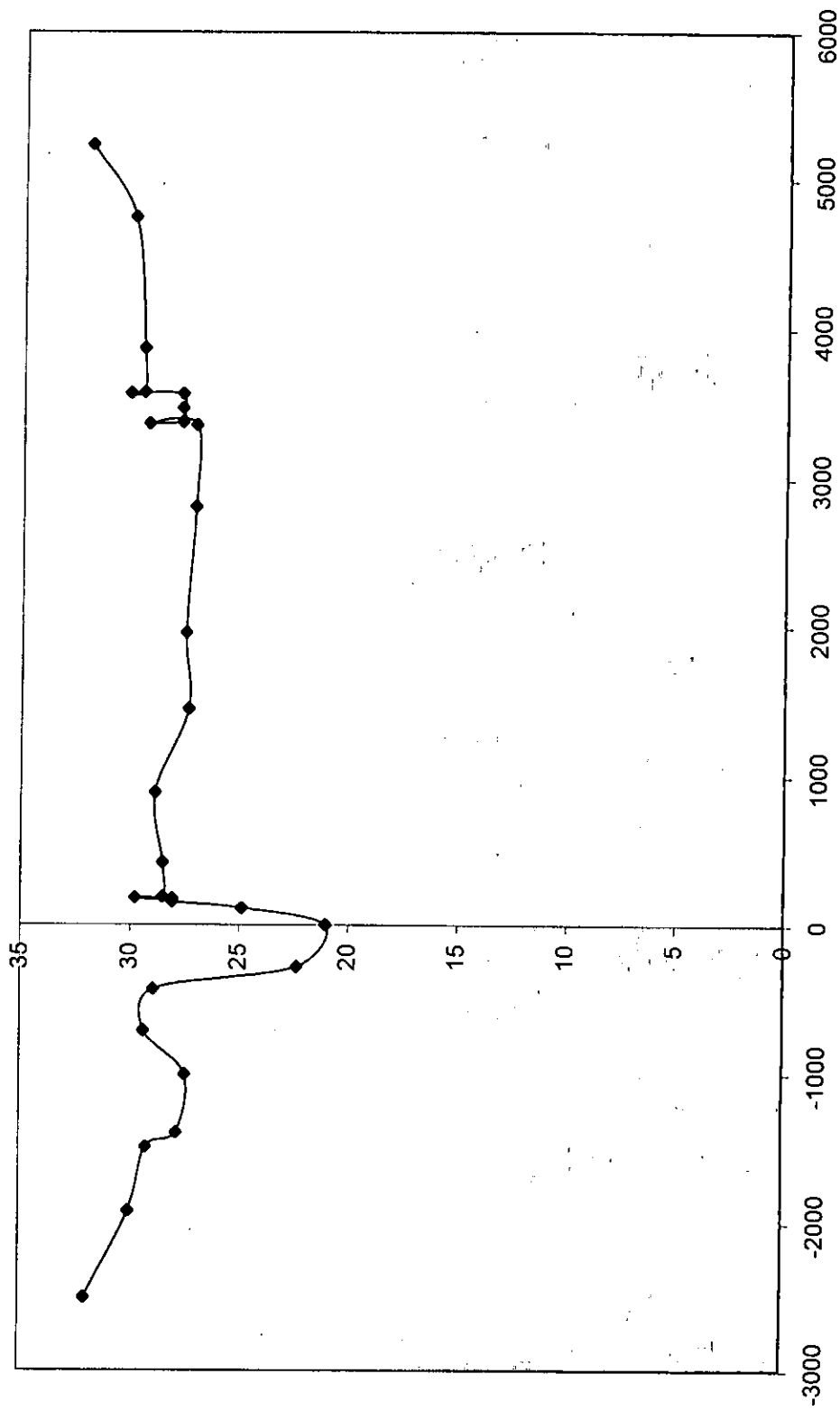
$$Tr = \frac{n - 0,12}{m - 0,44}$$

Anexo 7: Curvas de níveis para as zonas de Chókwè e Macarretane.



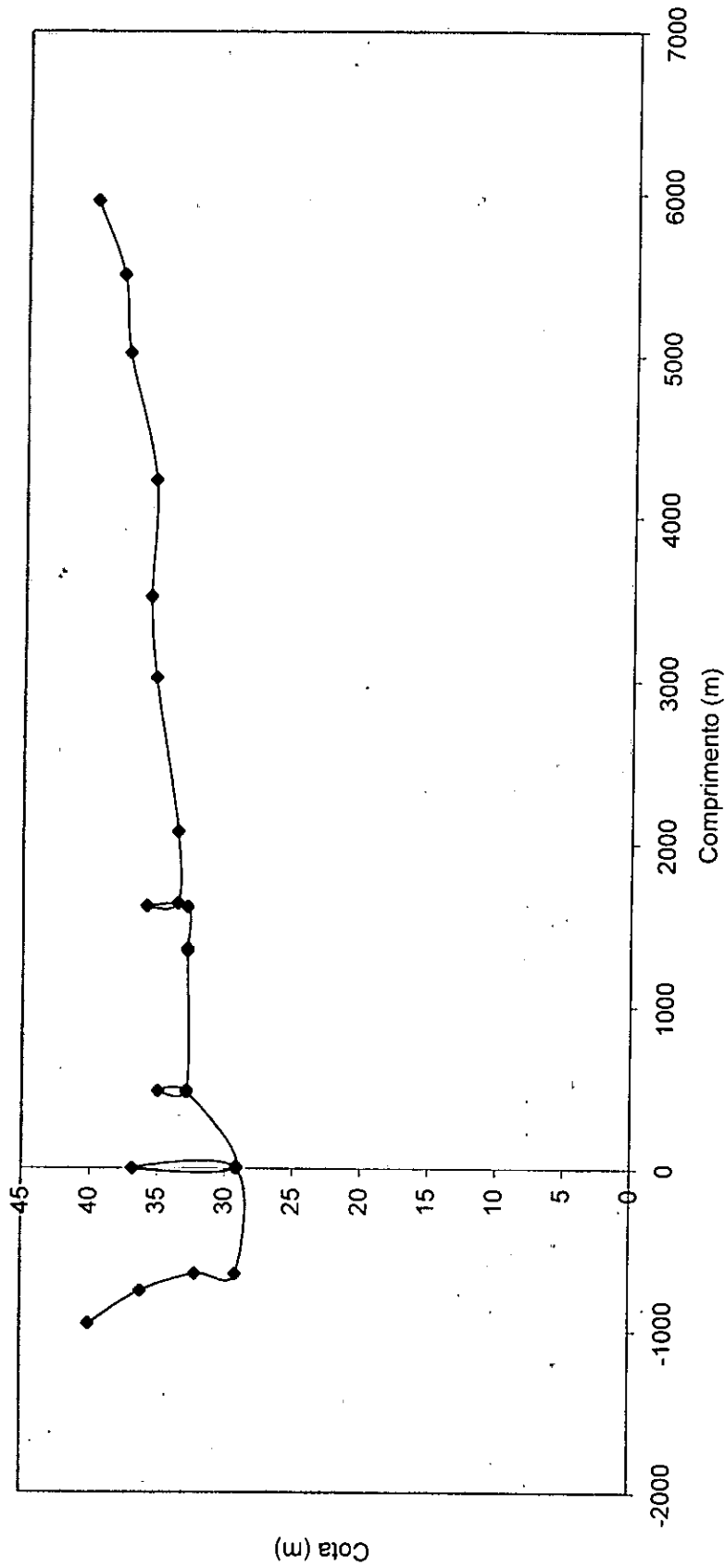
# Macaretane



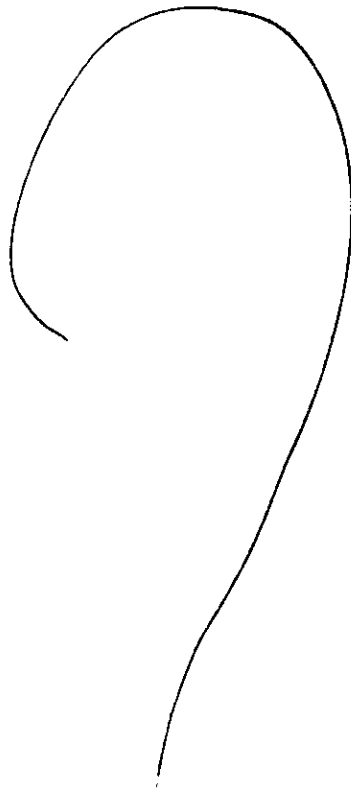


Anexo 8: Perfil Transversal da bacia hidrográfica do Limpopo em Chókwè.

Perfil transversal da bacia do Limpopo em Macarretane

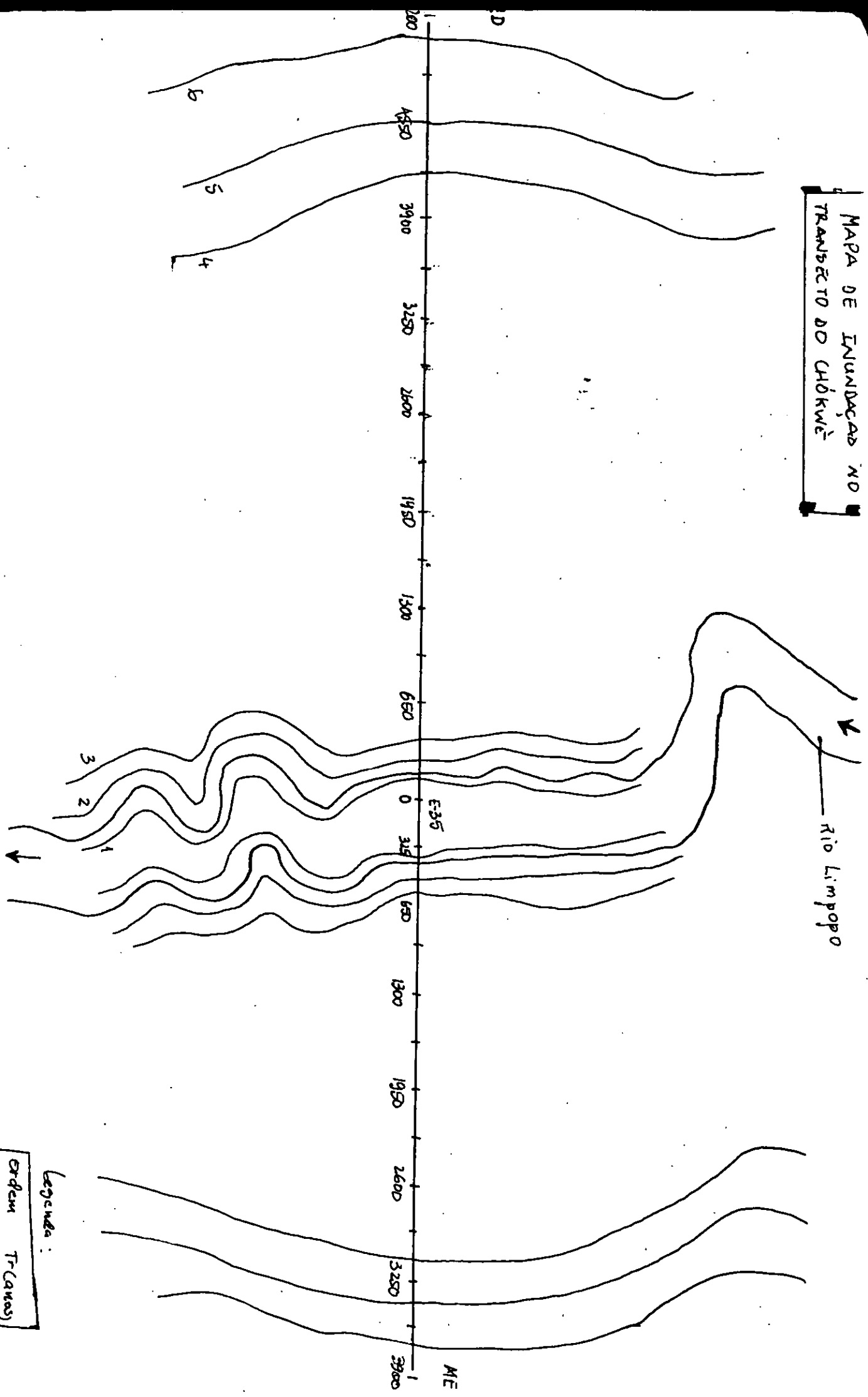


Anexo 8: Perfil Transversal da bacia hidrográfica do Limpopo em Macarretane.





MAPA DE INUNDAÇÃO NO  
TRANSECTO DO CHÓKWÉ



Legenda:

Ordem	T-Caixas
1	5
2	10
3	25
4	50
5	100