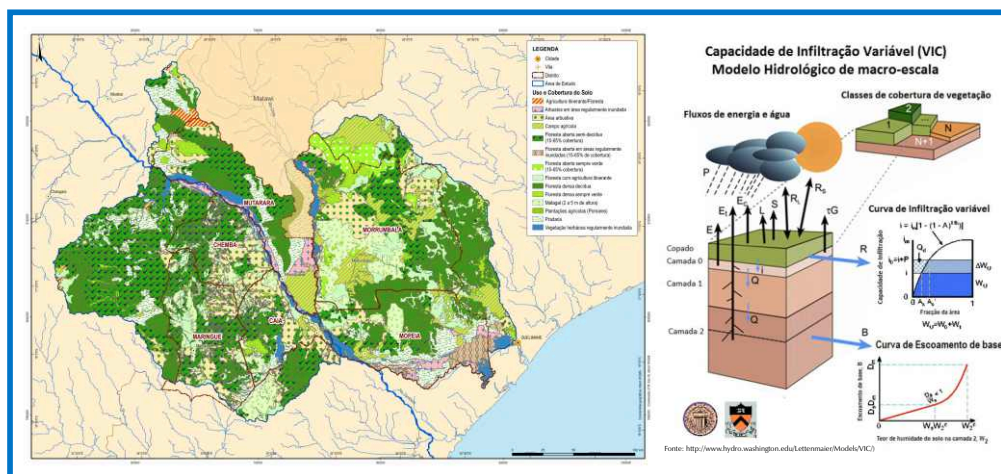




MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL
DIRECÇÃO NACIONAL DE PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO RURAL

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)



RELATÓRIO FINAL

VOLUME I - DESCRIÇÃO GERAL DO PROJECTO

MAIO 2013



CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

VOLUME I – DESCRIÇÃO GERAL DO PROJECTO

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

ÍNDICE DE VOLUMES

Volume I – Descrição Geral do Projecto

Volume II – Dados de Entrada do Modelo. Recolha e Tratamento

Volume III – Manual de Utilizador do Modelo VIC e do ZambezeDIF

Volume IV – Calibração e Exploração do Modelo

Volume V - Programa de Treino

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

VOLUME I – DESCRIÇÃO GERAL DO PROJECTO

ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1-1
2 ENQUADRAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO.....	2-1
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	3-1
3.1 GENERALIDADES.....	3-1
3.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ZAMBEZE E DOS RIOS CHIRE E CUÁCUA.....	3-1
3.3 DISTRITOS NA ÁREA DE ESTUDO	3-2
3.4 SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS CONSIDERADAS.....	3-5
3.5 ESQUEMATIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA APLICAR O MODELO VIC.....	3-7
4 DESCRIÇÃO DO MODELO VIC	4-1
4.1 INTRODUÇÃO	4-1
4.2 MODELO VIC.....	4-1
4.3 MODELO ROUTING	4-6
4.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO	4-8
5 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS ZAMBEZEDIF	5-1
6 CALIBRAÇÃO DO MODELO VIC.....	6-1
6.1 INTRODUÇÃO	6-1
6.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS E DADOS USADOS NA CALIBRAÇÃO.....	6-1
6.3 RESULTADOS OBTIDOS.....	6-8
7 CENÁRIOS DO USO E COBERTURA DA TERRA.....	7-1
8 EXPLORAÇÃO DO MODELO.....	8-1
8.1 INTRODUÇÃO	8-1
8.2 ANÁLISE DO REGIME HIDROLÓGICO PARA A SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA	8-1
8.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COBERTO VEGETAL NO REGIME HIDROLÓGICO.....	8-8
8.4 RESPOSTA HIDROLÓGICA AOS DIFERENTES CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DA TERRA.....	8-11
8.5 CONCLUSÕES	8-13
9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	9-1
10 BIBLIOGRAFIA	10-1

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Área e população residente nos distritos da área de estudo.....	3-2
Quadro 3.2 – Sub-bacias hidrográficas da área de estudo	3-6
Quadro 3.3 – Segmentos de bacia na área de estudo	3-6
Quadro 6.1 – Parâmetros do modelo calibrados	6-8
Quadro 6.2 – Valores dos critérios de avaliação da calibração.....	6-8
Quadro 7.1 – Representatividade das classes de uso e cobertura da terra para os cenários escolhidos	7-1
Quadro 8.1 – Precipitação anual nas células seleccionadas	8-2
Quadro 8.2 – Uso e cobertura da terra nas células 60, 63,73, 407, 114 e148.....	8-2
Quadro 8.3 – Caudal médio, máximo e mínimo, simulados para diferentes cenários de uso e cobertura da terra	8-13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cronograma das actividades do Projecto.....	2-3
Figura 3.1 – Área de estudo, distritos e bacias hidrográficas envolvidas	3-3
Figura 3.2 – Esquema da rede hidrográfica da área de estudo	3-7
Figura 3.3 – Grelha de células aplicada à área de estudo	3-8
Figura 3.4 – Numeração das células da grelha	3-9
Figura 3.5 – Rede de drenagem da área de estudo.....	3-10
Figura 4.1 – Representação esquemática da modelação hidrológica de uma célula do modelo VIC.....	4-2
Figura 4.2 - Esquema do balanço de água no copado.....	4-4
Figura 4.3 - Resistência aerodinâmica e de superfície.....	4-5
Figura 4.4 – Representação esquemática da propagação do escoamento nas células e nos canais	4-7
Figura 6.1 – Bacia hidrográfica da estação E101- Derre.....	6-2
Figura 6.2 – Ficheiro fracção (“Fraction File”) da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre	6-2
Figura 6.3 - Ficheiro direcção de escoamento (“Direction File”) da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre	6-3
Figura 6.4 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E101-Derre	6-3
Figura 6.5 – Bacia hidrográfica da estação E480- EN1.....	6-4
Figura 6.6 – Ficheiro fracção (“Fraction File”) da bacia hidrográfica da estação E480 – EN1	6-4
Figura 6.7 - Ficheiro direcção de escoamento (“Direction File”) da bacia hidrográfica da estação E480 – EN1	6-5
Figura 6.8 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E480 - EN1	6-5
Figura 6.9 – Bacia hidrográfica da estação E291- Caia	6-6

Figura 6.10 – Ficheiro fracção (“Fraction File”) da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia	6-6
Figura 6.11 - Ficheiro direcção de escoamento (“Direction File”) da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia	6-7
Figura 6.12 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal na estação E291 – Caia.....	6-7
Figura 6.13 – Hidrogramas observados e simulados nas estações E101 – Derre, E480 – EN1 e E291 - Caia	6-9
Figura 6.14 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Lualua	6-10
Figura 6.15 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Zambeze.....	6-10
Figura 8.1 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 60 (Distrito de Caia).....	8-3
Figura 8.2 – Série mensal simulada da água no solo na célula 60 (Distrito de Caia).....	8-3
Figura 8.3 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 63 (Distrito de Maringué)	8-3
Figura 8.4 – Série mensal simulada da água no solo na célula 63 (Distrito de Maringué)	8-4
Figura 8.5 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 73 (Distrito de Mopeia)	8-4
Figura 8.6 – Série mensal simulada da água no solo na célula 73 (Distrito de Mopeia)	8-4
Figura 8.7 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 107 (Distrito de Morrumbala)	8-5
Figura 8.8 – Série mensal simulada da água no solo na célula 107 (Distrito de Morrumbala)	8-5
Figura 8.9 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 114 (Distrito de Chemba).....	8-5
Figura 8.10 – Série mensal simulada da água no solo na célula 114 (Distrito de Chemba).....	8-6
Figura 8.11 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 148 (Distrito de Mutarara).....	8-6
Figura 8.12 – Série mensal simulada da água no solo na célula 148 (Distrito de Mutarara).....	8-6
Figura 8.13 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2007.....	8-7
Figura 8.14 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2010.....	8-8
Figura 8.15 - Séries temporais de evapotranspiração na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação.....	8-9
Figura 8.16 - Séries temporais de evapotranspiração na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação.....	8-9
Figura 8.17 - Séries temporais de água no solo na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação.....	8-10
Figura 8.18 - Séries temporais de água no solo na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação.....	8-10
Figura 8.19 - Séries temporais de escoamento superficial na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação	8-11
Figura 8.20 - Séries temporais de escoamento superficial na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação	8-11
Figura 8.21 - Bacias hidrográficas das células 96, 60, 59 e 53.....	8-12

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 3.1- Rio Cuácua junto a Mopeia (Fonte: Coba, Nov.2004)	3-2
Fotografia 3.2 - Rio Zambeze na garganta de Lupata	3-5
Fotografia 3.3 - Rio Zambeze perto de Mopeia	3-5

Anexo – Descrição das Missões de Trabalho de Campo

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

VOLUME I – DESCRIÇÃO GERAL DO ESTUDO

1 INTRODUÇÃO

Em cumprimento do estipulado no contrato para a prestação de serviços relativos ao Estudo de Calibração do Modelo Hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) e Elaboração da Base de Dados DIF (Dynamic Information Framework), assinado entre a Direcção Nacional de Promoção do Desenvolvimento Rural (DNPDR) e o Consórcio formado pelas empresas Coba e Salomon, apresenta-se o Relatório Final na sua versão draft.

O Relatório Final, seguindo o preconizado nos Termos de Referência, é composto pelos seguintes volumes:

- Volume I – Descrição Geral do Projecto
- Volume II – Dados do Modelo. Recolha e Tratamento
- Volume III – Manual de Utilizador do Modelo VIC e do ZambezeDIF
- Volume IV – Calibração e Exploração do modelo
- Volume V - Programa de Treino

Este Volume I procura constituir um volume síntese do trabalho realizado e dos resultados obtidos. Inicialmente é apresentado um enquadramento do estudo no âmbito do Projecto de Pequenos Produtores Orientados para o Mercado no Vale do Zambeze (Projecto Smallholders) e uma síntese das actividades desenvolvidas por este Projecto, a que se segue a caracterização da área de estudo, a descrição geral do modelo VIC e da base de dados ZambezeDIF, a apresentação dos resultados de calibração do Modelo, a descrição dos diferentes cenários de uso e cobertura da terra, e a apresentação dos resultados de exploração do modelo para os cenários de uso da terra escolhidos. Este volume termina com as conclusões obtidas e com algumas recomendações para trabalho futuro.

O presente Volume é constituído por 10 Capítulos. Para além deste capítulo introdutório, o relatório compreende ainda os seguintes capítulos:

- Enquadramento e desenvolvimento do Estudo
- Caracterização da área de estudo;

- Descrição do modelo VIC;
- Descrição da base de dados ZambezeDIF;
- Calibração do modelo VIC;
- Definição de cenários de uso e cobertura da terra;
- Exploração do modelo VIC;
- Conclusões e recomendações.

Este volume termina com as referências bibliográficas consultadas de apoio ao desenvolvimento deste estudo.

2 ENQUADRAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO

Esta Prestação de Serviços integra-se no Projecto de Pequenos Produtores Orientados para o Mercado no Vale do Zambeze (Projecto Smallholders), cujo objectivo principal é o aumento da renda dos pequenos produtores agrícolas em cinco distritos situados nas Províncias da Zambézia (Morrumbala e Mopeia), Tete (Mutarara) e Sofala (Chemba e Maríngue). O nosso estudo incluiu ainda o distrito do Caia, de modo a dar continuidade hidrológica à área de estudo.

Dentro do Projecto Smallholders foi previsto a utilização de fundos do GEF para atender a questões ambientais, promovendo a adopção de medidas nos distritos, onde actua o projecto, que limitem a degradação da terra e melhorem a resiliência dos ecossistemas. É neste contexto, que foi promovido este projecto, onde se faz uma abordagem hidrológica na avaliação dos impactos da actividade agrícola, através da aplicação do modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity). O VIC é um modelo hidrológico de macro-escala que na sua concepção valoriza como dados de entrada do modelo, o uso e cobertura da terra, bem como as características do solo.

O principal objectivo do estudo é avaliar os impactos que possam ocorrer no regime hidrológico devido a diferentes usos da terra. Para tal foram definidos três cenários de uso e cobertura da terra, que poderão resultar do desenvolvimento das actividades do projecto e de outros planos governamentais em carteira nos seis distritos.

O desenvolvimento do Estudo passou inicialmente pela recolha e análise exaustiva de dados geográficos e hidroclimatológicos, obtidos da rede terrena e da rede de satélites (detecção remota) e de dados sobre os solos e sobre o uso e cobertura da terra.

Estes dados são os dados de entrada do modelo VIC para uso no processo de calibração e na exploração do modelo e são descritos no Volume II – Dados de Entrada do Modelo. Recolha e Tratamento. A análise dos dados foi muito demorada e complexa, devido ao seu volume, dispersão e qualidade. Com base nos dados tratados e organizados foi calibrado o modelo VIC e posteriormente explorado para cenários diferentes do uso e cobertura da terra, como se descreve no Volume IV – Calibração e Exploração do Modelo.

No Volume III – Manual de Utilizador do Modelo VIC e do ZambezeDIF são apresentados os manuais de utilização do modelo VIC e do ZambezeDIF. O programa de treino é apresentado no Volume V - Programa de Treino.

O Estudo de calibração do Modelo VIC e elaboração do ZambezeDIF iniciou-se na última semana de Janeiro de 2012 e está previsto terminar no fim de Junho de 2013.

Ao longo destes 17 meses desenvolveram-se as actividades que estavam previstas no Plano de Trabalhos (Figura 2.1), que culminaram com a entrega do Relatório Inicial em Abril de 2012, o Relatório Preliminar em Outubro de 2012 nas suas versões provisória e definitiva e este Relatório Final na sua versão provisória em Maio de 2013. Foram ainda elaborados relatórios de progresso em Junho de 2012 e Janeiro de 2013.

O desenvolvimento deste estudo teve uma importante componente nos escritórios das empresas do Consórcio, mas foram igualmente fundamentais, o trabalho de campo realizado, contactando as principais autoridades distritais do sector e as actividades de treino realizadas nas visitas à área de estudo e à sede da ARA-Zambeze, realizadas em Fevereiro 2012, Maio de 2012, Outubro de 2012 e Março de 2013, conforme se descreve resumidamente no Anexo deste volume.

No princípio do mês de Junho de 2013 serão instalados o Modelo VIC e a base de dados ZambezeDIF na sede da ARA-Zambeze. Está igualmente programado a realização de um Programa de treino que permite a utilização futura do Modelo VIC para outras condições.

Dentro do trabalho realizado, destaca-se a recolha exaustiva dos dados de precipitação e de dados registados nas estações hidrométricas, nomeadamente dados de caudais, alturas hidrométricas, medições de caudal e curvas de vazão. Estes dados foram recolhidos na ARA-Zambeze, mas também na Direcção Nacional de Águas, que nos facilitaram o acesso aos seus arquivos, quer em formato de papel, quer em formato digital, o que desde já agradecemos. Inicialmente usaram-se os dados em arquivo nas empresas do Consórcio e publicadas em diversos estudos do tempo colonial que estão arquivados na Biblioteca do Instituto Português da Cooperação e na biblioteca da DNA.

Foi feita igualmente uma recolha de dados sobre solos e uso e cobertura da terra junto do INIIA e de outros organismos do Ministério de Agricultura de Moçambique. Foram visitadas várias direcções provinciais e distritais da agricultura para informação sobre o Projecto e para recolha de dados, com a recolha dos Planos Estratégicos de Desenvolvimento Distrital e dos Planos Distritais de Uso da Terra, que apoiaram a definição dos cenários de uso e cobertura da terra.

Foi dada particular atenção aos produtos que são obtidos através de detecção remota, que envolve desde há mais de 10 anos a comunidade internacional no sentido de aproveitar a rede de satélite para melhor conhecer o nosso planeta.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 GENERALIDADES

A área de estudo proposta pelos Termos de Referência inclui os distritos de Chemba, Maringué e Caia da província de Sofala, o distrito de Mutarara da província de Tete e os distritos de Mopeia e Morrumbala da província da Zâmbia, cujos limites administrativos se apresentam na Figura 3.1.

Como o objectivo do estudo é a calibração e exploração de um modelo hidrológico aplicado aos seis distritos em causa, a área de estudo pré-definida terá de ser adaptada aos limites das bacias hidrográficas que drenam os distritos. Foi assim definida uma nova área de estudo que engloba para além dos distritos, as áreas das bacias hidrográficas dos rios que drenam os distritos em causa.

A área de estudo irá igualmente enquadrar-se no contexto mais amplo da bacia hidrográfica do rio Zambeze, dando particular atenção aos rios Chire e Cuácua, que se localizam na área de estudo.

3.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ZAMBEZE E DOS RIOS CHIRE E CUÁCUA

A bacia hidrográfica do rio Zambeze tem uma área total de 1 380 000 km² repartindo-se por oito países da África Austral: Zâmbia; Angola; Namíbia; Botswana; Zimbabwe; Malawi; Tanzânia e Moçambique.

O rio Zambeze nasce nas montanhas de Kalene no extremo noroeste da Zâmbia, à altitude de 1 450 m e desagua em Moçambique no Delta do Zambeze, após percorrer 2 700 km. Depois de sair das montanhas de Kalene, o rio atravessa o Noroeste de Angola e o Oeste da Zâmbia, forma a fronteira Norte da Namíbia (na faixa de Caprivi) e a fronteira entre a Zâmbia e o Zimbabué e entra em Moçambique próximo da localidade do Zumbo à altitude de 330 m.

A maior parte da bacia do Zambeze (42%), localiza-se na Zâmbia, no entanto o Malawi tem quase a totalidade do seu território (93%) no interior da bacia do Zambeze, sendo drenado pela bacia hidrográfica do rio Chire. Botswana, Namíbia e Tanzânia são os países com pequenas áreas da bacia no seu interior (inferiores a 3%).

Ao longo dos 260 km do rio Zambeze entre Zumbo e Cahora Bassa, desenvolve-se a albufeira de Cahora Bassa. A barragem foi construída numa garganta de margens íngremes e cerca de 600 m de altura. O rio Zambeze continua encaixado para jusante, formando um desfiladeiro que se alarga próximo do local da futura barragem de Mphanda Nkuwa, a partir do qual o rio entra numa península. Cerca de 80 km a jusante de Tete, encontra-se a garganta de Lupata, onde o Zambeze atravessa a última formação rochosa a uma altitude de 95 m, entrando nos 350 km finais da planície, antes de desaguar no Oceano Índico. Neste troço final o rio tem entre 3 a 5 km de largura, por vezes mais, com braços e meandros e margens nem sempre bem definidas. O delta do Zambeze começa em Mopeia, aproximadamente a 150 km da costa. A influência da maré é evidente nos últimos 80 km.

O rio Chire é o principal afluente do rio Zambeze em Moçambique e drena o Lago Niassa, que é o terceiro maior lago de África, depois dos lagos Vitória e Tanganica. A sua bacia compreende todo o território de Malawi e uma pequena área na Tanzânia. O rio Chire sofre um grande efeito de regulação, primeiro devido ao próprio Lago Niassa e depois pelo atravessamento numa extensa zona de pântanos, antes de entrar em Moçambique. A bacia hidrográfica tem uma área total de 158 000 km², desaguando o rio Chire no rio Zambeze junto à vila de Caia. O rio Chire faz de limite fronteiriço com Malawi e separa a província de Tete da província de Zâmbia, servindo igualmente de limite entre o distrito de Mutarara e os distritos de Morrumbala e Mopeia.

O rio Cuácua, constitui o braço Norte do Delta do Zambeze, tem o seu início na margem esquerda do rio Zambeze, cerca de 8 km a jusante da vila de Caia e vai desaguar no Oceano Índico, na Baía dos Bons Sinais, junto à cidade de Quelimane. O rio Cuácua drena os distritos de Morrumbala e Mopeia, através de vários afluentes de regime quase permanente que estão integrados na área de estudo. A Fotografia 3.1 tirada em Novembro de 2004, mostra o rio Cuácua junto a Mopeia, numa situação de cheia no Zambeze, que provoca caudais elevados no rio Cuácua. O rio Cuácua como braço do Zambeze tem no seu início caudais próximos de zero em períodos secos e caudais elevados quando o rio Zambeze tem caudais altos, funcionando como um descarregador dos caudais do Zambeze.



Fotografia 3.1- Rio Cuácua junto a Mopeia (Fonte: Coba, Nov.2004)

3.3 DISTRITOS NA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo inclui seis distritos do Baixo Zambeze: Chemba, Maringué e Caia, Mutarara, Mopeia e Morrumbala, cujos limites administrativos se apresentam na Figura 3.1. No Quadro 3.1 apresentam-se as áreas dos distritos e a respectiva população residente de acordo com o Censo de 2007.

Quadro 3.1 – Área e população residente nos distritos da área de estudo

Província	Distrito	Área	População Residente (2007)	Densidade Demográfica
		(km ²)	(hab.)	(hab./km ²)
Tete	Mutarara	6 367	207 010	32.5
Sofala	Chemba	3 977	63 981	16.1
	Maringué	6 149	75 135	12.2
	Caia	3 585	115 612	32.2
Zambézia	Mopeia	7 671	115 291	15.0
	Morrumbala	12 800	358 913	18.0
Total		40 549	935 942	23.1

Como se pode observar o distrito com maior área e população é o distrito de Morrumbala, mas os distritos com maior densidade populacional são os distritos de Mutarara e Caia.

Como se pode observar os seis distritos têm uma área total de cerca de 40 500 km² e uma população residente em 2007 de cerca de 940 000 habitantes, que é cerca de 4,5% da população total do País. Estes distritos localizam ao longo do rio Zambeze, na região do Baixo Zambeze entre a garganta de Lupata (Fotografia 3.2) e o distrito de Mopeia (Fotografia 3.3), numa extensão de cerca de 275 km.



Fotografia 3.2 - Rio Zambeze na garganta de Lupata



Fotografia 3.3 - Rio Zambeze perto de Mopeia

3.4 SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS CONSIDERADAS

Conforme se referiu atrás, a área de estudo para além de incluir os seis distritos, foi expandida para incluir as sub-bacias dos rios Zambeze, Chire e Cuácua, que drenam os distritos. No Quadro 3.2 e Quadro 3.3 apresentam-se algumas características das principais sub-bacias hidrográficas e dos segmentos de bacia. Os segmentos de bacia, são pequenas sub-bacias hidrográficas, que se organizam em troços de bacia localizados entre duas confluências consecutivas de sub-bacias hidrográficas. A estruturação da área de estudo em sub-bacias e segmentos de bacia permite dar coerência hidrológica à área de estudo e apoiar a aplicação do modelo de propagação de caudais.

Quadro 3.2 – Sub-bacias hidrográficas da área de estudo

Sub-bacia	Distrito	Rio Principal	Área (km ²)
Muira	-	Zambeze (Margem direita)	3 598
Pompuè	Chemba/Maringué	Zambeze (Margem direita)	5 727
Sangadeze	Chemba/Maringé	Zambeze (Margem direita)	2 097
Mepuze	Chemba/Maringé/Caia	Zambeze (Margem direita)	1 802
Zangué	Maringé/Caia	Zambeze (Margem direita)	9 182
Minjova	Mutarara	Zambeze (Margem esquerda)	2 217
Soródezi	Mutarara	Zambeze (Margem esquerda)	1 139
Nhavudezi	Mutarara	Zambeze (Margem esquerda)	1 392
Missongué	Morrumbala	Chire (Margem esquerda)	979
Nhatéza	Morrumbala	Chire (Margem esquerda)	903
Mutiade	Morrumbala/Mopeia	Cuácua (Margem esquerda)	901
Lungozi	Morrumbala/Mopeia	Cuácua (Margem esquerda)	1 111
Mecombeze	Morrumbala/Mopeia	Cuácua (Margem esquerda)	976
Lualua	Morrumbala/Mopeia	Cuácua (Margem esquerda)	6 401
Licuaire	Morrumbala/Mopeia	Cuácua (Margem esquerda)	5 134

Quadro 3.3 – Segmentos de bacia na área de estudo

Segmento bacia	Distrito	Rio Principal	Área (km ²)
C1	Morrumbala/Malawi	Chire	2 926
C2	Morrumbala/Malawi/Mutarara	Chire	2 050
C3	Morrumbala/Mutarara/Mopeia	Chire	2 302
S1	Mutarara	Zambeze	515
S2	Mutarara	Zambeze	349
S3	Mutarara/Chemba	Zambeze	1 409
S4	Mutarara/Chemba	Zambeze	99
S5	Mutarara/Chemba	Zambeze	1 436
S6	Maringué/Chemba/Caia/Mutarara	Zambeze	1 378
S7	Mutarara/Caia	Zambeze	128
S8	Mutarara/Mopeia	Zambeze	612
S9	Mopeia	Cuácua	400
S10	Mopeia	Cuácua	360
S11	Mopeia	Cuácua	713
S12	Mopeia	Cuácua	1 700
S13	Mopeia	Cuácua	1 656

As 15 sub-bacias hidrográficas e os 16 segmentos de bacia constituem a área de estudo, totalizando uma área de 61 800 km². É de referir que a área dos seis distritos totaliza 40 500 km².

3.5 ESQUEMATIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO PARA APLICAR O MODELO VIC

O Modelo VIC será aplicado à totalidade da área de estudo, considerando a área da bacia hidrográfica do Zambeze entre Lupata (condição de fronteira a montante) e a confluência do rio Zangué, junto à vila de Caia. No Rio Chire, a área de estudo inicia-se na secção de Chilomo na fronteira com Malawi. A área de estudo inclui igualmente o rio Cuácua que drena a maior parte dos distritos de Morrumbala e Mopeia, e constitui o braço Norte do Delta do Zambeze.

A área de estudo foi definida a partir da área dos distritos em estudo: Chemba, Maringue e Caia na margem direita do Zambeze e Mutarara, Morrumbala e Mopeia na margem esquerda e envolvendo a totalidade das sub-bacias hidrográficas que drenam os seis distritos. Assim a área dos seis distritos é de 40549 km² e a área de estudo foi expandida para 61 800 km², para integrar as sub-bacias em estudo.

A Figura 3.2 apresenta a esquematização da rede hidrográfica que drena a área de estudo, incluindo as principais sub-bacias hidrográficas referidas, bem como as estações hidrométricas actualmente operacionais.

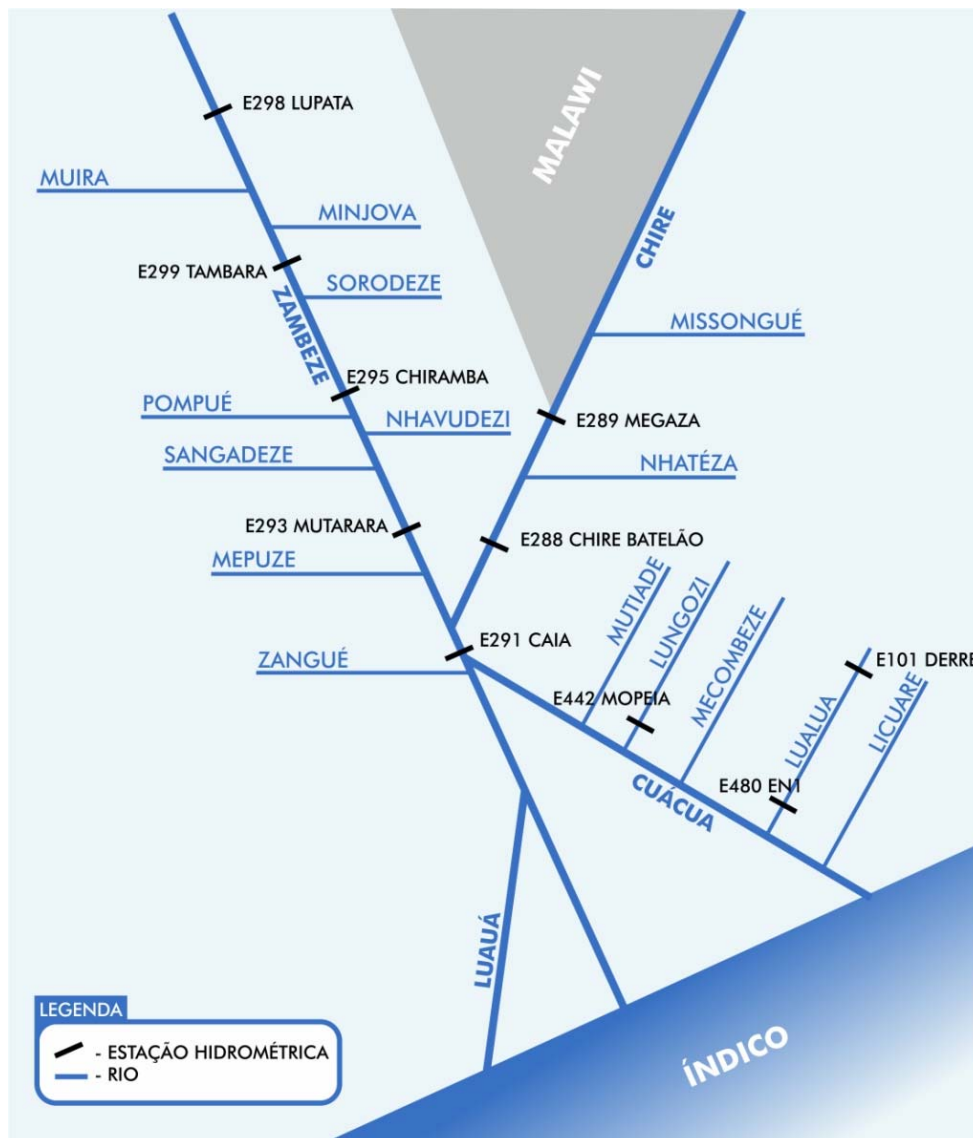


Figura 3.2 – Esquema da rede hidrográfica da área de estudo

Na área de estudo destacam-se três linhas de água (Zambeze, Chire e Cuácua), a que se associam as seguintes sub-bacias hidrográficas:

- Rio Zambeze, com as sub-bacias dos rios Muira, Pompué, Sangadeze, Mepuze e Zangué na margem direita e as sub-bacias de Minjova, Sorodeze, Nhavudezi e Chire na margem esquerda;
- Rio Chire, com várias pequenas sub-bacias, das quais se destacam as sub-bacias de Missongue e Nhatéza;
- Rio Cuácua, que constitui um dos braços do delta do rio Zambeze e que drena as sub-bacias dos rios Mutiade, Lungozi, Mecombeze, Lualua e Licuare.

Para aplicar o modelo VIC á área de estudo foi definida uma grelha de células, onde cada célula tem a dimensão de 0,25° (15' de arco), conforme se apresenta na Figura 3.3. A dimensão da célula foi escolhida tendo em conta as características dos dados de entrada do modelo VIC, disponibilizados pelas agências internacionais, com base na rede de satélite e na dimensão da área de estudo. As células são identificadas através da numeração de 1 a 221, conforme se observar na Figura 3.4.

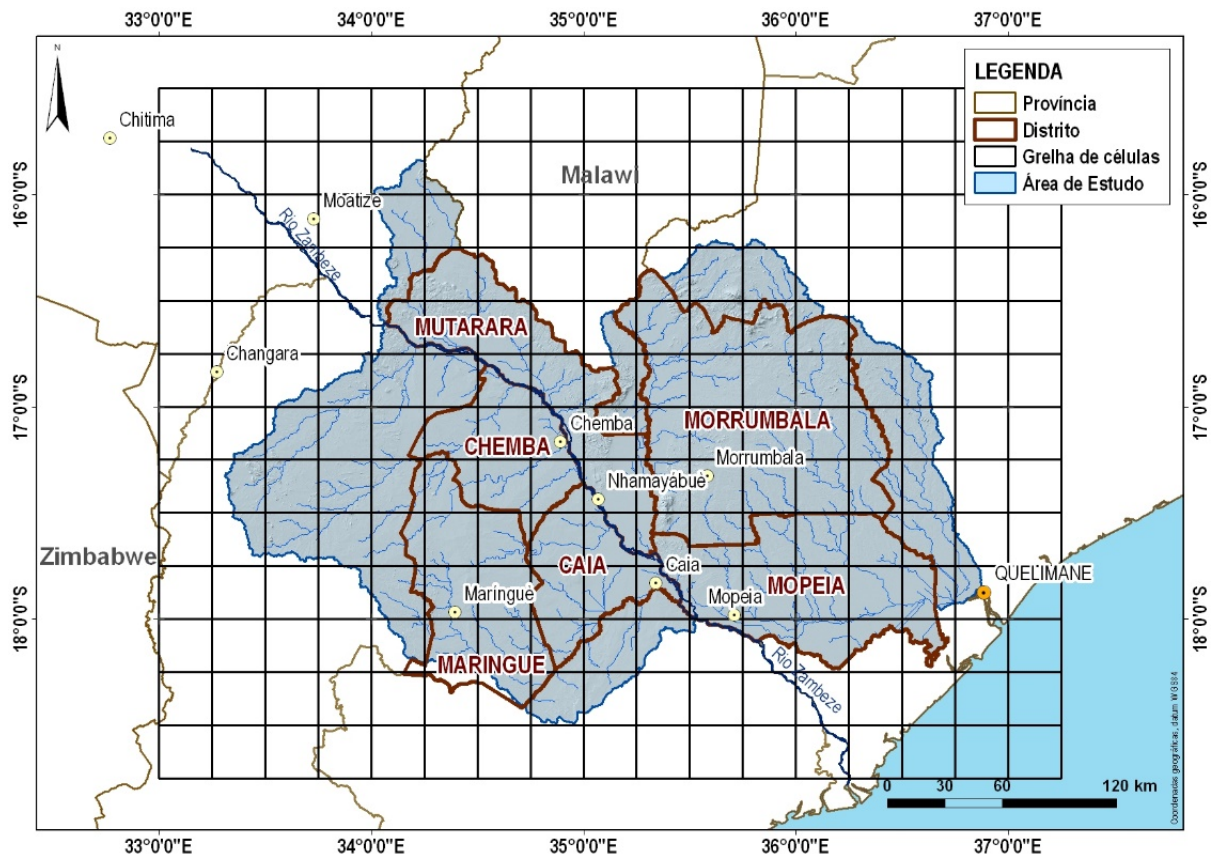


Figura 3.3 – Grelha de células aplicada à área de estudo

O processo de aplicação do modelo VIC passa inicialmente pela calibração e validação do modelo. Face às características da área em estudo e aos dados de caudais existentes a calibração do modelo será realizada para as bacias hidrográficas dos rios Lualua e Zambeze. No rio Lualua, a calibração do modelo terá por base os dados de caudal registados nas estações E101 – Derre e E480 – EN1 e no rio Zambeze para os caudais registados na estação E291 – Caia.

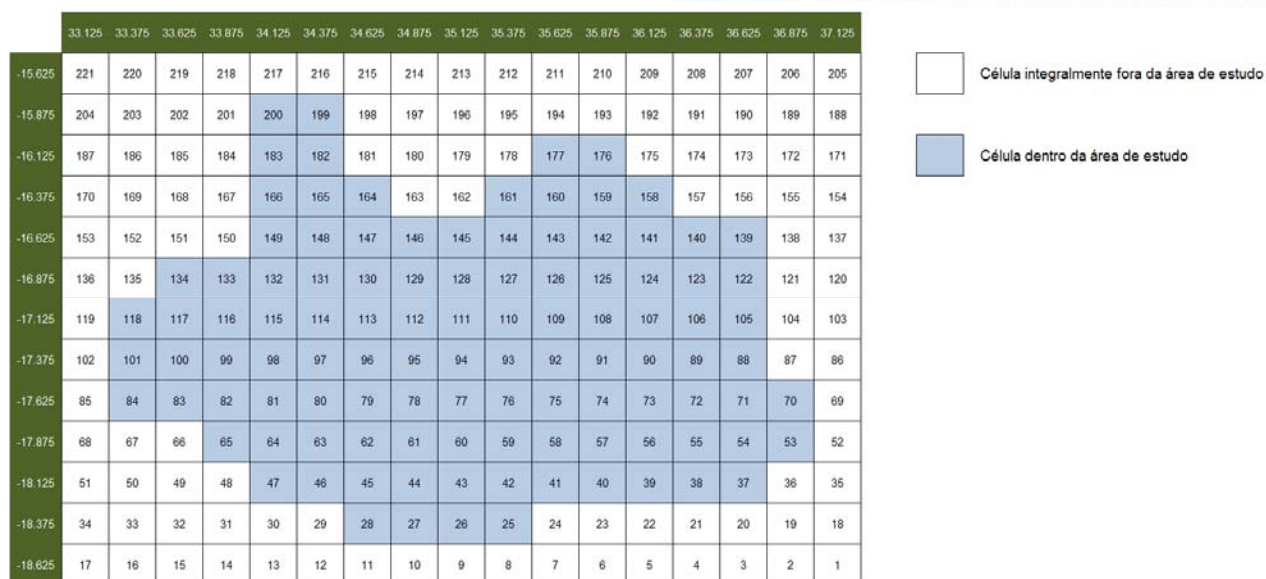


Figura 3.4 – Numeração das células da grelha

Após a calibração do modelo, foi feita a generalização dos parâmetros de calibração para a totalidade da área de estudo, sendo dada particular atenção, às condições de fronteira no rio Zambeze em Lupata e no rio Chire em Chilomo, bem como às características hidrológicas das sub-bacias da margem direita do rio Zambeze.

Enquanto a estação de Lupata não estiver em funcionamento, os caudais do rio Zambeze em Lupata serão avaliados por métodos simplificados, com base nos registos de estações hidrométricas existentes noutros locais. Os caudais do Zambeze em Lupata foram obtidos a partir dos caudais efluentes da barragem de Cahora Bassa, dos caudais observados em Tete e das contribuições dos rios Revubué e Luenha. Os caudais no rio Chire em Chilomo serão estimados a partir das estações E288 – Chire Batelão e E289–Megaza actualmente em funcionamento.

Após a aplicação do modelo VIC à área de estudo e o cálculo do escoamento em cada célula, será aplicado o modelo Routing para propagação do escoamento dentro da célula e entre células. Para utilizar este modelo, a área de estudo deverá ser esquematizada, definindo uma rede de escoamento entre células, conforme se mostra na Figura 3.5: Como se pode observar existem dois pontos terminais de agregação do escoamento (saída de caudal): no rio Zambeze junto a Caia (Cel 58) e no rio Cuácua a jusante da confluência do rio Licuar (Cel 53). Face às características da área de estudo foram definidas como condições de fronteira a montante a entrada de caudais em Lupata no rio Zambeze (célula 149) e a entrada de caudais no rio Chire em Chilomo (célula 161).

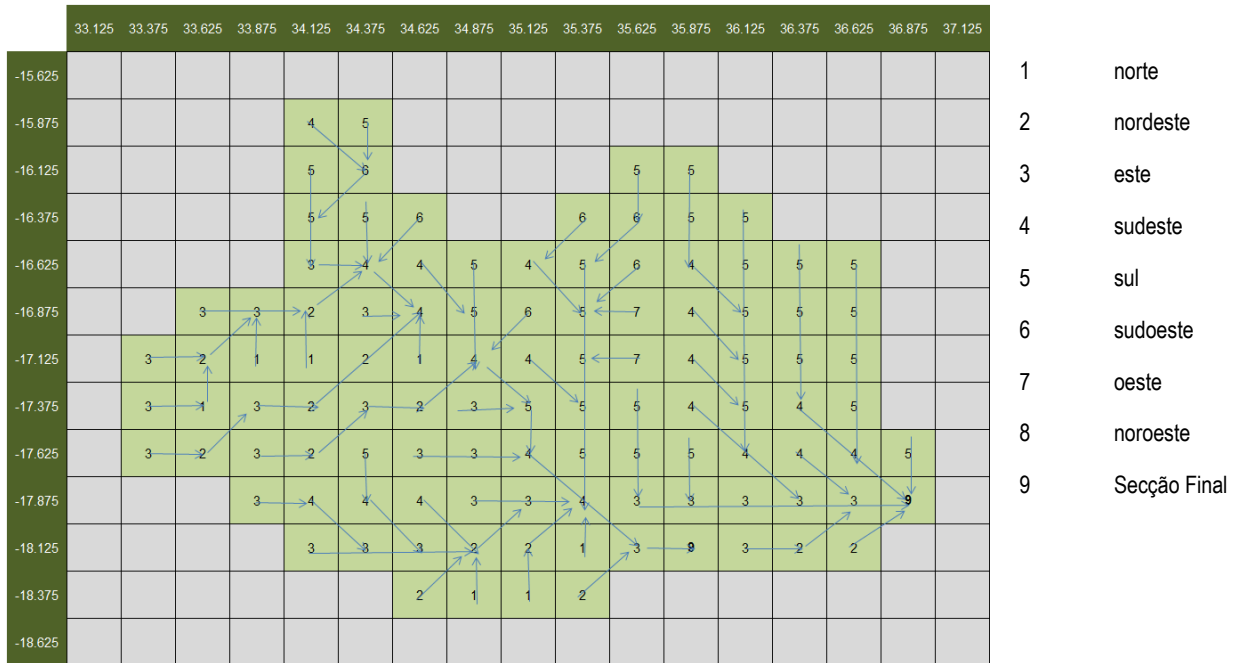


Figura 3.5 – Rede de drenagem da área de estudo

4 DESCRIÇÃO DO MODELO VIC

4.1 INTRODUÇÃO

O chamado modelo VIC (Variable Infiltration Capacity), inclui efectivamente dois modelos que correm separadamente: O modelo VIC propriamente dito e o modelo Routing.

O Modelo VIC é um modelo hidrológico semi-distribuído de macro-escala, que simula separadamente em cada célula a transformação da precipitação ocorrida na célula em escoamento.

O modelo Routing, faz a propagação do escoamento ao longo de cada célula e entre as várias células até a uma secção terminal, onde é calculado o escoamento total gerado na totalidade da área a montante.

Face à sua independência estes dois modelos são descritos de modo separado. A calibração do modelo é feita com base nos resultados finais do modelo Routing, comparando com valores observados na respectiva secção terminal da área em estudo com os resultados obtidos da simulação.

4.2 MODELO VIC

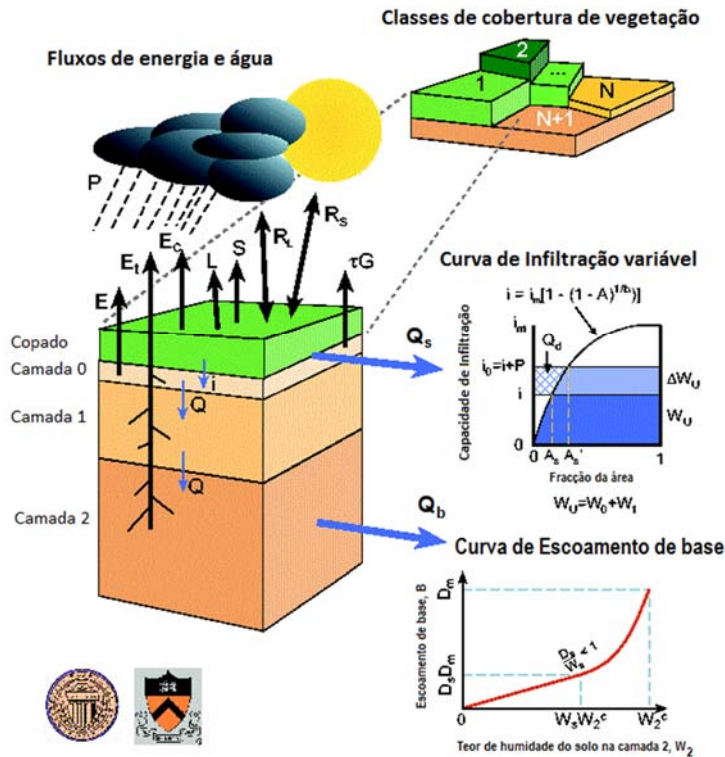
O modelo VIC (Variable Infiltration Capacity) desenvolvido por Liang *et al.* (1994, 1996) é um modelo hidrológico de macro-escala semi-distribuído que permite simular o balanço da água e o balanço energético. A parametrização da variabilidade espacial da infiltração e a conceptualização do escoamento de base são as principais características que distinguem o modelo VIC doutros modelos hidrológicos¹.

A superfície da bacia é representada como uma grelha de células (de dimensão > 1 km) planas e uniformes. O modelo VIC-3L caracteriza o solo como um prisma constituído por 3 camadas (Figura 4.1). A ocupação/uso da terra é descrita por N+1 tipos/classes de vegetação, sendo que a n-ésima classe representa o solo nu. As várias coberturas e tipos de uso da terra são tratados pelo modelo ao nível das células através de distribuições estatísticas.

Para ter em conta a variabilidade espacial dos parâmetros hidráulicos e hidrológicos ao nível das células da grelha que definem a bacia, o modelo VIC-3L adopta o esquema da capacidade de infiltração variável (Figura 4.1) baseado no modelo Xinanjiang (Zhao *et al.*, 1980).

¹ O modelo permite também modelar a queda de neve, a definição de bandas de neve, o congelamento da água no solo. Estas características do modelo não são analisadas no manual do Modelo VIC, apresentado em anexo, uma vez que para o caso de estudo, aqueles processos não tem aplicabilidade.

Capacidade de Infiltração Variável (VIC) Modelo Hidrológico de macro-escala



Fonte: <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/>.

Figura 4.1 – Representação esquemática da modelação hidrológica de uma célula do modelo VIC

O modelo assume que o escoamento superficial é gerado a partir das duas camadas superiores do solo na fracção da área da célula, para a qual a precipitação efectiva quando adicionada ao teor de humidade no fim do passo de tempo anterior excede o teor de humidade do solo em condições de saturação natural.

O escoamento superficial é calculado como:

$$Q_s = \begin{cases} P_e - (W_m - W_o), & PE + i_o \geq i_m \\ P_e - (W_m - W_o) + W_m \left(1 - \frac{PE + i_o}{i_m}\right)^{1+b}, & PE + i_o < i_m \end{cases}$$

sendo a variabilidade espacial da infiltração expressa por:

$$i = i_m (1 - (1 - A)^{1/b})$$

$$i_m = (1 + b_i) \times \theta_s \times |z|$$

Onde:

P_e é a precipitação efectiva, definida como precipitação – evapotranspiração potencial;

W_o é o teor de humidade inicial do solo,

W_m é o teor de humidade máximo das duas camadas superiores do solo,

i é a capacidade de armazenamento do solo,

i_m é a capacidade máxima de armazenamento

A_s é a fracção da área da área da célula que se encontra saturada;

b é o parâmetro de forma da curva de infiltração variável (define o grau de variabilidade espacial);

θ_s é a porosidade do solo; e

z é a profundidade do solo.

No modelo proposto, a função de distribuição da infiltração tem dois parâmetros; i_m e b . Para b igual a 1, a capacidade de infiltração é uniformemente distribuída.

Como resultado da variação da capacidade de infiltração na célula, o teor de humidade, o escoamento superficial, o escoamento de base e a evapotranspiração também variam espacialmente (Liang *et al.* 1994).

A camada inferior do solo é recarregada pelo fluxo de água proveniente das camadas superiores e perde água de acordo com a função do escoamento de base. O modelo VIC assume que o movimento da água no solo das camadas superiores para a camada inferior é governado exclusivamente pela gravidade, recorrendo à equação empírica proposta por Brooks e Corey (1964) para estimar a condutividade hidráulica:

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{W_o - \theta_r}{W_m - \theta_r} \right)^{\frac{2}{B_p} + 3}$$

onde: K_s é a condutividade hidráulica do solo, $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica, θ_r é o teor de humidade residual do solo e o parâmetro B_p é designado de índice de distribuição dos poros.

A formulação do escoamento de base segue o modelo conceptual de Arno (Franchini e Pacciani, 1991; Todini, 1996):

$$q = \begin{cases} d_1 \times W_2 & : W_2 \leq W_S \times W_2^{max} \\ d_1 \times W_2 + d_2 \times (W_2 - W_S \times W_2^{max})^{d_3} & : W_2 > W_S \times W_2^{max} \end{cases}$$

onde:

W_2 é o teor de humidade da camada inferior do solo (camada 2 – vide Figura 4.1);

W_2^{max} é o teor de humidade máximo da camada inferior do solo;

d_1 e d_2 são constantes e

d_3 é factor de forma da zona não linear do escoamento de base.

De acordo com este modelo, a função do escoamento de base é linear quando a quantidade de água no solo é inferior a $W_S \times W_2^{max}$, sendo directamente proporcional a W_2 , mas torna-se não linear quando a quantidade de água no solo é superior a $W_S \times W_2^{max}$. Esta aproximação implica a parametrização da velocidade de escoamento horizontal na camada inferior do solo.

No modelo VIC, a infiltração, a distribuição da água no solo, o escoamento superficial e o escoamento de base são calculados para cada uma das N+1 classes de cobertura vegetal.

Em função do conjunto de dados meteorológicos disponíveis, o modelo VIC poderá ser executado para modelar o balanço de água e os fluxos de energia entre a superfície terrestre e atmosfera, ou para modelar o balanço de água, calculando a evapotranspiração de acordo com a equação de Penman-Monteith em função da quantidade de energia disponível e do déficit de pressão de vapor.

A precipitação, a temperatura máxima e mínima do ar e a velocidade do vento constitui o conjunto mínimo de dados meteorológicos que é necessário fornecer ao modelo (podem ser fornecidos dados diários ou sub-diários).

O copado da vegetação corresponde a um reservatório (Figura 4.2) em que a precipitação (P) é a entrada e as saídas são a evaporação, (E_c), e o gotejo para o solo (P_t) (quando o reservatório está cheio e transborda). Cada copado tem uma capacidade máxima de armazenamento (W_{cop}).

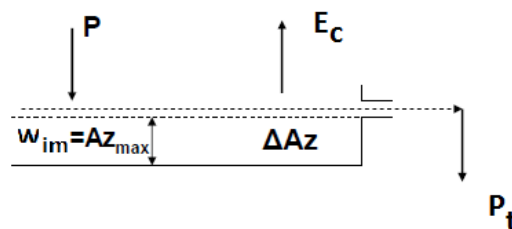


Figura 4.2 - Esquema do balanço de água no copado

Evapotranspiração

No modelo VIC são considerados três tipos de evaporação: a evaporação a partir do copado, E_c , e a transpiração, E_t , de cada uma das classes de vegetação e a evaporação a partir do solo nu, E_1 . A evapotranspiração total sobre cada uma das células da grelha é calculada como o somatório dos três parâmetros, ponderados de acordo com a percentagem da área total de cada uma das classes de vegetação:

$$E = \sum_{n=1}^N C_n \times (E_{c,n} + E_{t,n}) + C_{n+1} \times E_1$$

Onde C_n é a percentagem da área ocupada com n-ésima classe de vegetação

Quando a água interceptada pelas copas da vegetação é suficiente para satisfazer a procura da atmosfera, a evaporação a partir do copado corresponde ao seu valor máximo, E_c^* .

O valor de E_c^* é função da quantidade máxima de água que o copado pode interceptar (W_{im}) da quantidade de água interceptada pelo copado (W_{cop}) da evapotranspiração potencial (E_p) da resistência da arquitetura, (r_0) e da resistência aerodinâmica (r_w) (Figura 4.3).

O valor de W_{im} é calculado em função do LAI ($0,2 \times LAI$, segundo Dickinson, 1984). Os valores de r_0 são fornecidos para cada classe de cobertura vegetal. A resistência aerodinâmica é simulada segundo a aproximação proposta por Monteith e Unsworth (1990) sendo função da velocidade do vento u_z ($m s^{-1}$) medido à altitude z e do coeficiente de transferência para a água C_w , calculado pelo algoritmo proposto por Louis (1979).

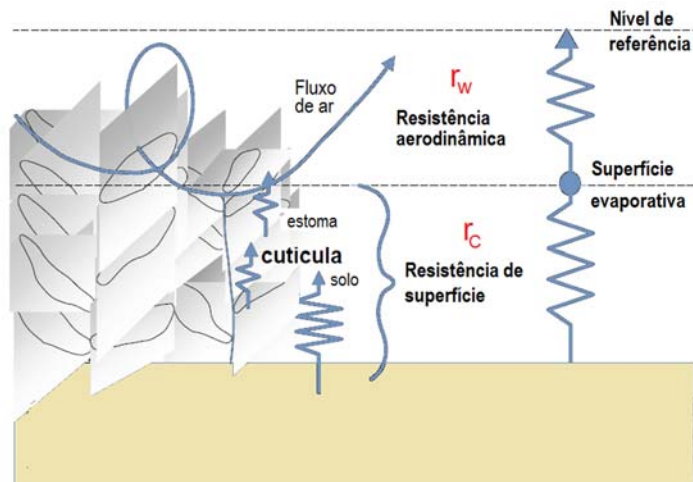


Figura 4.3 - Resistência aerodinâmica e de superfície

A evapotranspiração potencial expressa como densidade de fluxo de calor latente ($\lambda_v E_p$) é calculada a partir da equação de Penman-Monteith, onde λ_v representa o calor latente necessário à vaporização de uma unidade de água. A equação de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) inclui todos os parâmetros que governam a troca de energia e o correspondente fluxo de calor latente (evapotranspiração):

$$\lambda_v E_p = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \frac{r_w}{r_w + r_o + r_c}$$

Onde:

$R_n - G$ é a energia disponível ($W m^{-2}$) no copado, composta pelos fluxos de radiação líquida (R_n) e de calor de (para) o solo (G);

r_w é a resistência aerodinâmica ($s m^{-1}$);

$(e_s - e_a)$ representa o défice de pressão de vapor (Pa) aos níveis da superfície evaporativa e de referência, respectivamente;

ρ_a e a densidade do ar ($kg m^{-3}$);

c_p é o calor específico do ar húmido ($J kg^{-1} K^{-1}$);

Δ representa o declive da curva de pressão de vapor ($Pa K^{-1}$) à temperatura T_a ; e

γ é a constante psicrométrica ($\approx 66 Pa K^{-1}$).

A transpiração da vegetação, E_t (mm), é estimada por (Blondin, 1991; Ducoudre *et al.*, 1993):

$$E_t = \left(1 - \left(\frac{W_i}{W_{im}} \right)^{2/3} \right) E_p \frac{r_w}{r_w + r_o + r_c}$$

Onde: r_c ($m s^{-1}$) é a resistência e superfície (ou do copado) calculada em função da resistência mínima do copado (r_{min}) dos factores temperatura, défice de pressão de vapor, do fluxo de radiação fotossintética activa (PAR) e teor de humidade e do índice de área foliar.

A evaporação a partir do solo nu (E_1) ocorre apenas ao nível da primeira camada do solo. A formulação de Arno proposta por Franchini e Pacciani (1991) é utilizada para calcular o valor de E_1 quando a superfície do solo não se encontra saturada. Em condições de saturação a taxa de evaporação é dada pela taxa de evaporação potencial.

Escoamento Total

O escoamento total é expresso:

$$Q = \sum_{n=1}^{N+1} C_n (Q_{d,n} + Q_{b,n})$$

Onde $Q_{s,n}$ (mm) é o escoamento superficial e $Q_{b,n}$ (mm) é o escoamento de base, estimados para a n -ésima classe de vegetação.

O modelo VIC assume que não existe escoamento lateral nas duas primeiras camadas do solo. Assim o movimento da água no solo pode ser caracterizado pela equação unidimensional de Richards.

4.3 MODELO ROUTING

A geração dos hidrogramas de caudais requer que o escoamento gerado em cada célula pelo modelo VIC seja propagado ao longo da bacia em direcção à secção de saída. A propagação do escoamento superficial e do escoamento de base é feita através do modelo ROUTING, descrito em detalhe em Lohmann *et al.* (1996, 1998a, 1998b).

Este modelo calcula o tempo necessário para que o escoamento gerado numa célula chegue à secção de saída e modela também a propagação do escoamento em canais. A Figura 4.4 apresenta o esquema de cálculo da propagação de escoamento utilizado pelo modelo Routing. O modelo assume que todo o escoamento horizontal dentro duma célula da grelha atinge a rede de canais dentro da célula antes de cruzar a fronteira com outra célula vizinha. O escoamento pode sair de uma célula em oito direcções possíveis, mas todo o escoamento tem de sair numa única direcção. Uma célula pode também receber o escoamento gerado a montante.

Ambos os processos (propagação no interior da célula e propagação em canais) são modelados pelo modelo ROUTING, adoptando modelos lineares, causais e invariantes no tempo. Além disso, as funções de resposta a um determinado impulso (excitação) são sempre positivas.

Os modelos de transferência linear agregam as propriedades do escoamento horizontal e assumem que este é independente do teor de humidade do solo. O modelo ROUTING estende a aproximação FDTF-ERUHDIT (First Differenced Transfer Function-Excess Rainfall and Unit Hydrograph by a Deconvolution Iterative Technique) proposta por (Duband *et al.*, 1993) com uma separação das escalas de tempo e um modelo linear de propagação do escoamento em canais.

Como a resposta do escoamento a um evento de precipitação pode envolver uma escala de tempo muito grande, o modelo trata separadamente a componente do escoamento lento do escoamento rápido, conforme proposto no modelo linear de Rodriguez (1989):

$$\frac{dQ^S(t)}{dt} = -k \times Q^S(t) + b'Q^F(t)$$

Onde: $Q^S(t)$ é o escoamento lento e $Q^F(t)$ é o escoamento rápido e

$$Q(t) = Q^S(t) + Q^F(t)$$

é o escoamento total medido. O modelo assume que os parâmetros k e b' são constantes.

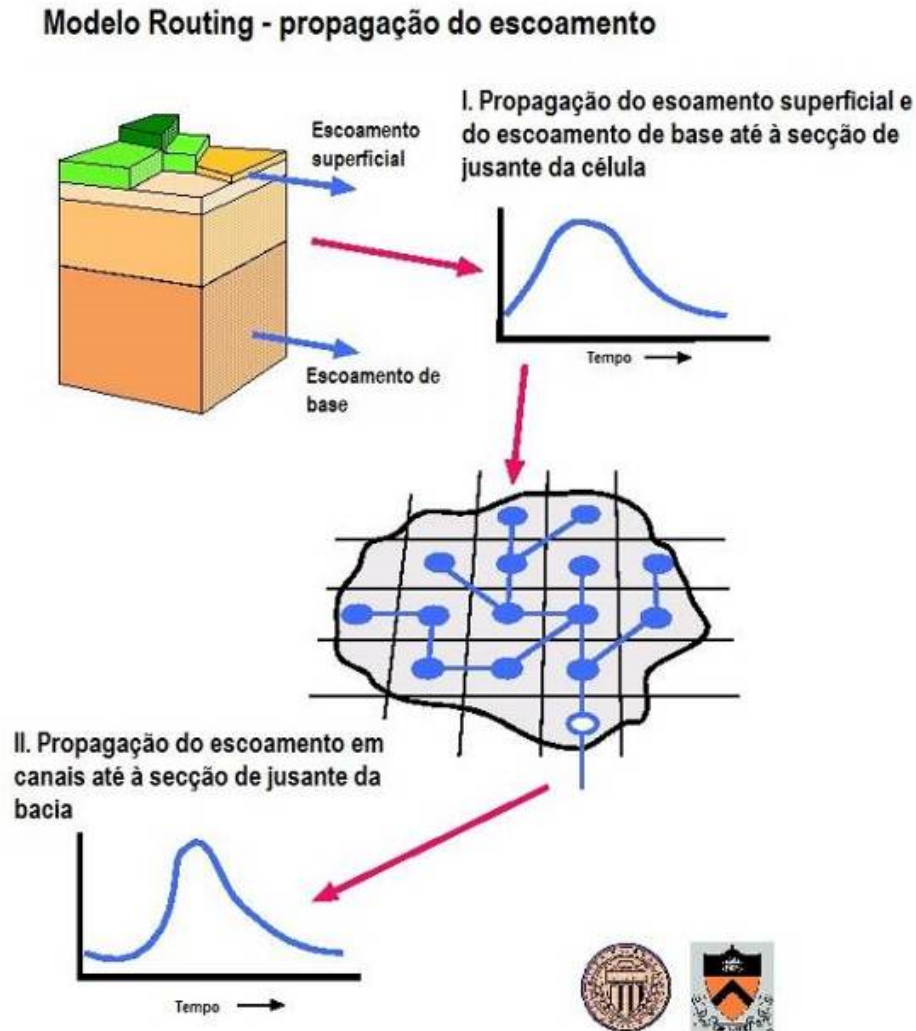


Figura 4.4 – Representação esquemática da propagação do escoamento nas células e nos canais

Esta separação do escoamento total em componente rápida e lenta tem correspondência com o escoamento superficial e o escoamento de base mas a correspondência não de 1 para 1. As duas componentes do escoamento, rápida e lenta, relacionam-se analiticamente da seguinte forma:

$$Q^S(t) = b' \int_0^t \exp(-k(t - \tau)) Q^F(\tau) d\tau + Q^S(0) \exp(-kt)$$

Esta equação mostra que a condição inicial $Q^S(0)$ decai a $\exp(-kt)$. Discretizando a equação tem-se:

$$Q^S(t) = \frac{\exp(-k \times \Delta t)}{1 + b' \times \Delta t} Q^S(t - \Delta t) + \frac{b' \times \Delta t}{1 + b' \times \Delta t} Q(t)$$

Assumindo que existe uma relação linear entre o escoamento e a precipitação eficaz, P^{eff} , é suficiente encontrar uma função de resposta ao impulso que permite estabelecer a relação entre a componente do escoamento rápido e a precipitação efectiva. A função de resposta pode ser obtida iterativamente através da seguinte equação:

$$Q^F(t) = \int_0^{tmax} UH^F(\tau)P^{eff}(t - \tau)d\tau$$

Onde $UH^F(\tau)$ é a função de resposta ao impulso (também designada hidrograma unitário) da componente rápida do escoamento e $tmax$ é o tempo após o qual a componente rápida do escoamento deverá ter decaído.

A propagação do escoamento em canais é descrito pelas equações de Saint Venant que constituem um sistema não linear de equações diferenciais quasi-lineares de primeira ordem às derivadas parciais. A forma linear da equação de Saint Venant é adoptada pelo ROUTING (Mesa e Miffilin, 1986; Fread, 1993):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - C \frac{\partial Q}{\partial x}$$

Onde C é a celeridade da onda e D a difusividade (ou coeficiente de difusão). Estes parâmetros podem ser estimados a partir das características geométricas da rede fluvial da bacia. A equação anterior é resolvida através do integral de convolução:

$$Q(x, t) = \int_0^t U(t - s)h(x, s)ds$$

onde:

$$h(x, t) = \frac{x}{2t\sqrt{\pi t D}} \exp\left(-\frac{(Ct - x)^2}{4Dt}\right)$$

é a função de Green ou a função de resposta ao impulso, com as seguintes condições de fronteira: $h(x, t) = 0$ para $x > 0$ e $h(0, t) = \delta(t)$ para

Devido à linearidade do modelo e à estabilidade numérica da solução, a influência de barragens, descarregadores e utilizações da água nos caudais pode ser facilmente implementada na rede em todas as células da bacia (Lohamann *et al.*, 1996).

4.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Embora alguns dos parâmetros requeridos para a modelação hidrológica com os modelos VIC e ROUTING sejam obtidos com base em observações de satélite e levantamentos de campo, alguns desses parâmetros são bastante variáveis no espaço e as avaliações *in situ* não são suficientes para se obter valores representativos de grandes áreas (> 1 km). Por outro lado, algumas variáveis têm um significado mais conceptual (como sejam as profundidades das camadas do solo) do que significado físico. Para estes parâmetros, é necessário fazer suposições sobre os seus valores ou calibrá-los

O processo de calibração é, na maioria dos casos de estudo, feito apenas para o modelo VIC. Esta simplificação deve-se ao facto dos modelos VIC e ROUTING serem utilizados fundamentalmente para estimar caudais mensais de grandes bacias hidrográficas, não sendo por isso necessário uma precisão muito grande nos parâmetros requeridos pelo modelo de propagação.

Parâmetros como a direcção de escoamento e fracção da célula dentro da bacia são determinados a partir do modelo digital do terreno, existindo ferramentas de cálculo automático desenvolvidas para o efeito. Para os outros parâmetros como sejam a velocidade de escoamento, difusividade e o hidrograma unitário, é aconselhável a adopção de valores físicos razoáveis, sem recurso à calibração.

Lohmann *et al.* (1996) na modelação efectuada para a bacia Wese (na Alemanha) refere valores da velocidade de escoamento entre 1 e 3 m s⁻¹ e valores da difusividade no intervalo entre 200 e 4000 m² s⁻¹.

Nijssen *et al.* (1997) refere valores de velocidade de escoamento entre 0,5 e 2,0 m s⁻¹ na bacia Columbia e de 1,0 m s⁻¹ para a bacia Delaware.

Para se obter caudais mensais, considera-se aceitável adoptar na modelação hidrológica um valor constante para a difusividade de 800 m² s⁻¹ e para a velocidade um valor de 1,5 m s⁻¹.

De um modo geral, a calibração dos modelos hidrológicos é efectuada com registos de caudais. Para tal é necessário executar o modelo ROUTING (recorrendo a estimativas adequadas dos parâmetros requeridos por este modelo) para converter o escoamento superficial e de base simulados pelo modelo VIC em caudais. A série de registos dos caudais deverá ser dividida em duas partes, sendo uma utilizada para a calibração e a outra para o processo de validação.

Os parâmetros do modelo VIC podem também ser calibrados utilizando observações *in situ* do teor de humidade do solo, da altura da camada de neve, da evapotranspiração. Neste caso, o modelo VIC é calibrado sem ser necessário executar o modelo ROUTING: As imagens de satélite poderão também ser utilizadas para se obter valores dos parâmetros que serão comparados com os valores simulados.

O modelo de VIC tem muitos parâmetros, a escolha dos parâmetros a calibrar é complexa, tendo sido considerado mais apropriado ajustar apenas alguns parâmetros durante o processo de calibração. Muitas vezes, a distinção baseia-se na medida em que os valores dos parâmetros podem ser realmente medidos ou observados. Os parâmetros que são mais comumente ajustados durante a calibração do modelo VIC são:

- **b_infil** [>0 a ~ 0.4] - este parâmetro descreve a forma da curva variável de infiltração, isto é descreve a capacidade de armazenamento da célula em função da fracção da área da célula que se encontra saturada. Um valor mais alto de **b_infil** traduz-se numa menor capacidade de armazenamento da célula em função da área saturada e consequentemente conduz a valores de escoamento mais elevados;
- **Ds** [>0 a 1] – representa a fracção de **Ds_{max}** para a qual se inicia o escoamento de base não linear (aumentando rapidamente). Quanto maior o valor de **Ds**, maior será o escoamento de base para valores baixos do teor de humidade da última camada do solo;
- **Ws** [>0 a 1] – é a fracção do teor máximo de água da camada inferior do solo, a partir da qual se inicia o escoamento de base não linear. Um valor alto de **Ws** traduz-se num aumento do teor de humidade do solo a partir do qual o escoamento de base aumenta rapidamente, retardando o pico do escoamento.
- **Ds_{max}** [>0 a ~ 30], representa o fluxo máximo de base (expresso em mm dia⁻¹) que pode ocorrer a partir da camada inferior do solo, depende sobretudo da condutividade hidráulica do solo]; e
- **profundidade do solo** (de cada uma das camadas) [normalmente entre 0.1 a 1.5 m] - a profundidade das camadas do solo influencia muitas variáveis do modelo. De um modo geral, e para efeitos de escoamento, os solos profundos tendem a amortecer os caudais máximos (o escoamento de base é dominante) e a aumentar as perdas por evapotranspiração.

A escolha da melhor calibração do modelo é baseada no uso de uma função-objectivo específica para avaliar a qualidade de representatividade do modelo. A função-objectivo traduz um problema de optimização dos resultados da simulação em comparação com os dados observados.

A avaliação da eficiência dos modelos é feita comparando os resultados da simulação com os valores observados por exemplo através da estimação do somatório do quadrado dos erros (SQE) que reflecte o erro do ajustamento global obtido no modelo. O critério de eficiência de Nash e Sutcliffe é uma das funções mais usadas em hidrologia para avaliar a qualidade do ajustamento dos modelos hidrológicos e pode ser escrita da seguinte forma:

$$E = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

permite medir até que ponto é que a variabilidade da série observada é explicada pela simulação. Quando a simulação é perfeita, o erro quadrático médio é nulo e tem-se $E = 1$. Uma eficiência de zero ($E=0$) significa que as predições do modelo são tão boas quanto o valor médio da série observada. Quando os valores do critério de Nash e Sutcliffe são negativos ($E < 0$) significa que o valor médio da série observada é um indicador melhor que a simulação. Preferencialmente os valores do critério de Nash e Sutcliffe deverão ser superiores a 0,5.

Dado existir um grande número de conjuntos de combinações de parâmetros que podem resultar em soluções “óptimas” da transformação chuva-escoamento, recorre-se a um processo de validação da solução obtida na calibração. A validação do modelo, consiste na corrida do modelo com outra série de dados que não tenha sido parte do processo que levou a escolha dos parâmetros do modelo. A validação é por isso uma actividade importante na modelação hidrológica. A experiência mostra que deve ser feita uma divisão na proporção de 2/3 de dados na calibração contra 1/3 de dados para a validação.

A escolha dos períodos de calibração e validação obedece a critérios que são função da disponibilidade de dados e características do fenómeno em estudo. Por exemplo no caso do modelo hidrológico que pretende gerar caudais diários será importante encontrar uma boa repartição da série de dados de calibração e validação de tal forma que em ambas parcelas de dados ocorram os extremos, mínimos e máximos, que caracterizam a hidrologia do local.

5 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS ZAMBEZEDIF

No âmbito do trabalho desenvolvido neste Projecto, existe um vasto conjunto de dados que foram recolhidos, tratados e armazenados de modo a garantir a necessária informação para calibrar e explorar o modelo VIC. Esta informação geográfica em formato digital tem vindo a ser organizada numa estrutura de acordo com as necessidades das diferentes especialidades envolvidas, mas procurando satisfazer igualmente um público mais geral.

A solução final de organização dos dados e divulgação do Projecto passa pela instalação no site da ARA-Zambeze de um *link* para um *site* do Projecto, onde se fará uma breve descrição do Projecto e a apresentação dos principais resultados e dos documentos produzidos ao longo do Projecto. Este *site* tem principalmente uma função de divulgação e informação sobre o Projecto, pois a colocação de todos os dados no *site* da ARA-Zambeze iria implicar custos elevados de armazenamento de dados, pelo que se decidiu que a base de dados ZambezeDIF, devido ao volume de dados, será instalada num disco externo, que será entregue ao Cliente e que se pode ligar a qualquer computador e em último caso, se houver condições para isso, transferir dados para um site.

Este sistema não torna mais oneroso o *site* da ARA-Zambeze e permite a integração de novos elementos que forem sendo recolhidos e tratados.

O *site* é descrito mais detalhadamente no Volume III. O *site* fornece informações sobre o Projecto e sobre o trabalho realizado e apresenta os resultados obtidos, sendo formado pelas seguintes áreas de informação:

- Inicial;
- Área de Projecto;
- Dados de Base;
- Modelo VIC;
- Exploração do Modelo;
- Referências Bibliográficas;
- Relatórios; e
- Contactos.

Toda a informação recolhida e produzida ao longo do Projecto está estruturada numa base de dados em cinco grandes grupos, como seguidamente se apresenta:

- **Documentos** – Onde serão organizados todos os documentos que façam parte do projecto e que sejam apresentados ou utilizados durante o mesmo, nomeadamente apresentações feitas pelo consórcio, estudos intermédios necessários à execução de um dado factor, os relatórios finais entregues;
- **Dados** – Onde serão organizados todos os elementos em formato vectorial, raster, ascii, texto, que tenham tido uma influência directa no cálculo de parâmetros para o modelo VIC, bem como os cenários previstos e os resultados de utilização do modelo;
- **VIC** – Onde serão organizados todos os elementos relacionados com o programa, os procedimentos de uso dos modelos VIC e Routing e os dados de entrada e resultados produzidos pelo modelo no seu formato original.

- Resultados – Onde são guardados em ficheiros excel, os resultados obtidos na calibração e exploração dos modelos VIC e Routing.
- Bibliografia – Onde são guardadas as referências hidrográficas analisadas.

Apresenta-se de seguida a estrutura adoptada para a organização final dos dados, no contexto do ZambezeDif e de cada um destes grupos referidos atrás.

Documentos

- 01_DOCUMENTOS
 - Apresentações
 - Estudos
 - Relatórios

No grupo dos documentos, serão organizados todos os documentos que façam parte do projecto e que sejam apresentados ou utilizados durante o mesmo, nomeadamente apresentações feitas pelo consórcio, estudos intermédios necessários à execução de um dado factor e os relatórios finais entregues, bem como alguns artigos e referência bibliográficas que foram recolhidas ao longo do trabalho e que sejam importantes para futuros usos do modelo VIC.

Dados

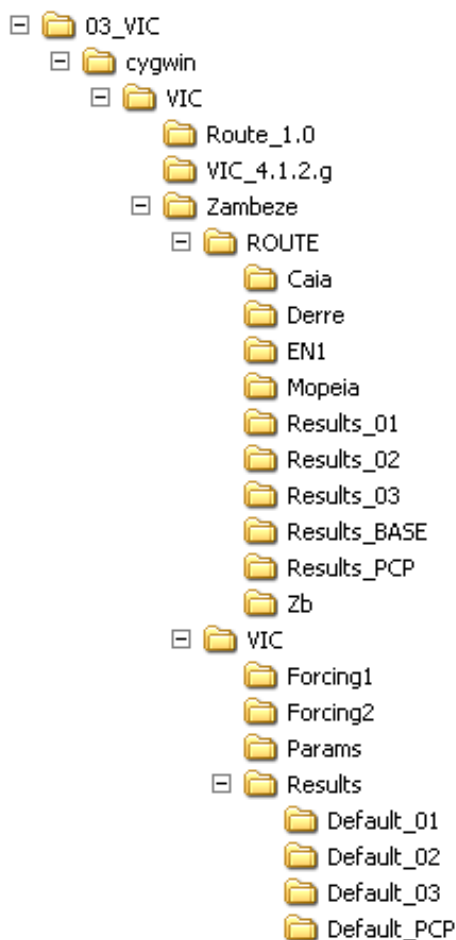
- 02_DADOS
 - 01_Dados Gerais
 - 02_Área de Estudo
 - 03_Cartografia
 - 01_Modelo Digital do Terreno
 - 02_Cartografia 250k
 - 03_Imagens de Satélite
 - 04_Meteorologia
 - 01_Estações Udométricas
 - 02_Precipitação
 - 03_Temperatura
 - 04_Vento
 - 05_Evapotranspiração
 - 05_Hidrologia
 - 01_Estações Hidrométricas
 - 02_Alturas Hidrométricas
 - 03_Medições de Caudal e Curvas de Vazão
 - 04_Caudais
 - 06_Solos
 - 07_Coberto Vegetal

O grupo dos dados inclui os seguintes sub-grupos:

- Dados Gerais, onde se incluem os limites administrativos, rede viária, toponímia, aglomerados urbanos;
- Área de Estudo, com a apresentação do limite da área de estudo, grelha de células usadas no cálculo, para além de informação sobre as bacias hidrográficas e a rede hidrográfica;
- Cartografia - Onde são organizadas os dados referentes à cartografia 250k, às imagens de satélite existentes e aos dados de superfície, nomeadamente Modelo Digital do Terreno;

- Meteorologia, onde se organiza a informação relativa aos dados meteorológicos, como são os casos da: precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e ventos, bem como a identificação das estações udométricas, climatológicas e meteorológicas;
- Hidrologia, onde se faz a descrição as estações hidrométricas, a rede hidrográfica e os dados sobre alturas, caudais, medições de caudal e curvas de vazão;
- Solos, onde se apresentam e estruturam os elementos gráficos e alfanuméricos do estudo dos solos;
- Coberto Vegetal, onde se apresenta a descrição do coberto vegetal, com as várias classes de coberto vegetal e uso da terra, bem como outros dados correlacionados.

VIC



No grupo do Modelo VIC, irão estar presentes todos os dados de entrada, bem como os resultados, tanto do modelo VIC como do ROUTING. Este grupo será o mais complexo, uma vez que se optou por utilizar a estrutura que o próprio modelo VIC apresenta, para facilitar uma futura actualização deste modelo. Quer o modelo quer os dados de entrada estão dentro da pasta Cygwin que é o emulador do Linux para a Microsoft Windows. Na pasta VIC incluem-se os modelos e o conjunto de ficheiros de entrada e de resultados. Os ficheiros com as instruções dos dados de entrada ficam na mesma directoria do modelo e o mesmo acontece com o ficheiro de instruções do modelo ROUTING.

Os ficheiros de entrada e de resultados estão guardados dentro da pasta Zambeze com excepção dos ficheiros de instrução do modelo VIC e ROUTING.

Dentro da pasta Zambeze existem duas pastas, uma para o VIC outra para o ROUTING.

A pasta VIC tem a seguinte organização:


- Forcing1 – Onde se encontram os ficheiros dos dados da temperatura e velocidade do vento;
- Forcing 2 – Onde se encontram os ficheiros da precipitação;
- Params – Onde se encontram os ficheiros dos solos e da vegetação;
- Results – Os resultados do modelo VIC são escritos na directoria RESULTS que se divide em Default_01; Default_02, Default_03; Default_PCP.

Por sua vez, dentro da pasta ROUTE encontram-se as seguintes pastas:

- CAIA, DERRE, EN1 e Mopeia – que contêm os ficheiros de entrada do modelo Routing, para o processo de calibração;
- Results_01, Results_02, Results_03 e Results_BASE – onde se guardam os resultados de exploração do modelo e que têm correspondência directa com as pastas Default_01, Default_02, Default_03 e Default_PCP, da pasta VIC anterior;
- Results_PCP – onde se guardam os ficheiros dos resultados do processo de calibração;
- Zb – que guarda os ficheiros de entrada do modelo Routing na utilização normal do modelo.

Resultados

No grupo resultados, apresentar-se-ão os resultados finais da aplicação do modelo aos vários cenários considerados. Estes dados estão organizados em ficheiros excel.

 04_RESULTADOS

Bibliografia

 05_BIBLIOGRAFIA

Finalmente, no grupo da Bibliografia apresentam-se todas as referências bibliográficas identificadas e utilizadas.

6 CALIBRAÇÃO DO MODELO VIC

6.1 INTRODUÇÃO

O processo de aplicação do modelo VIC passa inicialmente pela calibração e validação do modelo, que se descreve detalhadamente no Volume IV.

Face às características da área em estudo e dos dados de caudal existentes, a calibração do modelo foi realizada para duas bacias hidrográficas do rio Lualua, definidas pela localização das estações hidrométricas E101 – Derre e E480 – EN1 e para a bacia do rio Zambeze em Caia, tendo por base a estação E291 - Caia.

Para calibrar o modelo VIC no rio Zambeze foi adicionado aos caudais simulados na área de estudo, os caudais estimados para Lupata e para Chilomo. Os caudais nestas duas secções constituem as condições de fronteira da área de estudo, respectivamente com a entrada de caudais na secção de Lupata no rio Zambeze e a entrada de caudais em Chilomo no rio Chire.

No processo de calibração foi dada ainda particular atenção às características hidrológicas das sub-bacias da margem direita do rio Zambeze.

A calibração foi feita para o período de 2006 e 2012, no entanto o modelo foi aplicado para o período de 2001 a 2012, pois o modelo necessita de um período inicial para estabilizar a água no solo. Os caudais usados na calibração foram calculados através da aplicação de curvas de vazão que foram estabelecidas a partir das medições de caudal realizadas recentemente. O estudo dos dados de entrada no Modelo VIC é descrito no Volume II.

Após a aplicação do modelo VIC para geração do escoamento em cada célula da área de estudo, foi aplicado o modelo ROUT para propagar o escoamento dentro da célula e entre células. Para utilizar este modelo, a rede hidrográfica da área de estudo foi esquematizada de forma a definir-se a rede de escoamento entre as células (Figura 3.5).

Para o processo de calibração e tendo em consideração a dimensão relativamente pequena das bacias hidrográficas das estações E101 – Derre e E408 – EN1, optou-se por individualizar a simulação para cada local. Esta individualização das bacias hidrográficas permitiu descrever com maior exactidão a área de drenagem de cada uma das estações assim como a rede hidrográfica.

6.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS E DADOS USADOS NA CALIBRAÇÃO

Estação E101 – Derre

A estação E101 – Derre (16°57'42"S; 36°07'15" E) no rio Lualua é uma das três estações hidrométricas utilizadas no processo de calibração/verificação do modelo VIC. Na Figura 6.1 apresenta-se a bacia hidrográfica da estação cuja área drenada é de 2 223 km². Para uma correcta descrição da bacia hidrográfica quer em termos de área drenada quer em termos da rede hidrométrica, optou-se por criar para a bacia de calibração os ficheiros de entrada do modelo ROUT (Figura 6.2 e Figura 6.3) em vez de se utilizar os ficheiros criados para área de estudo, permitindo uma descrição rigorosa da bacia hidrográfica de calibração.

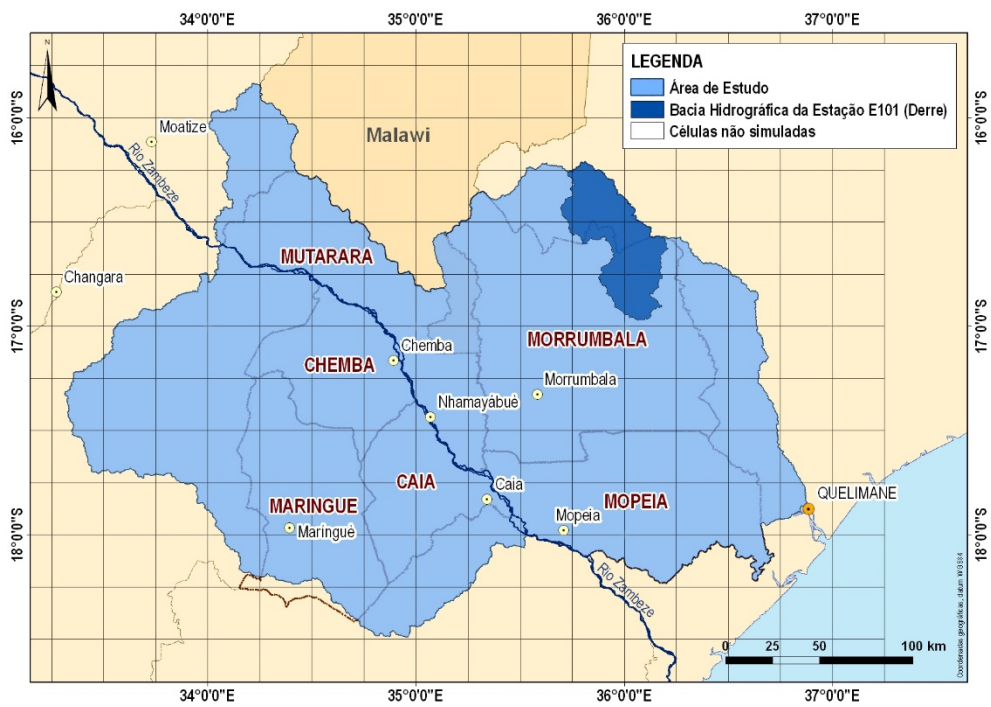


Figura 6.1 – Bacia hidrográfica da estação E101- Derre

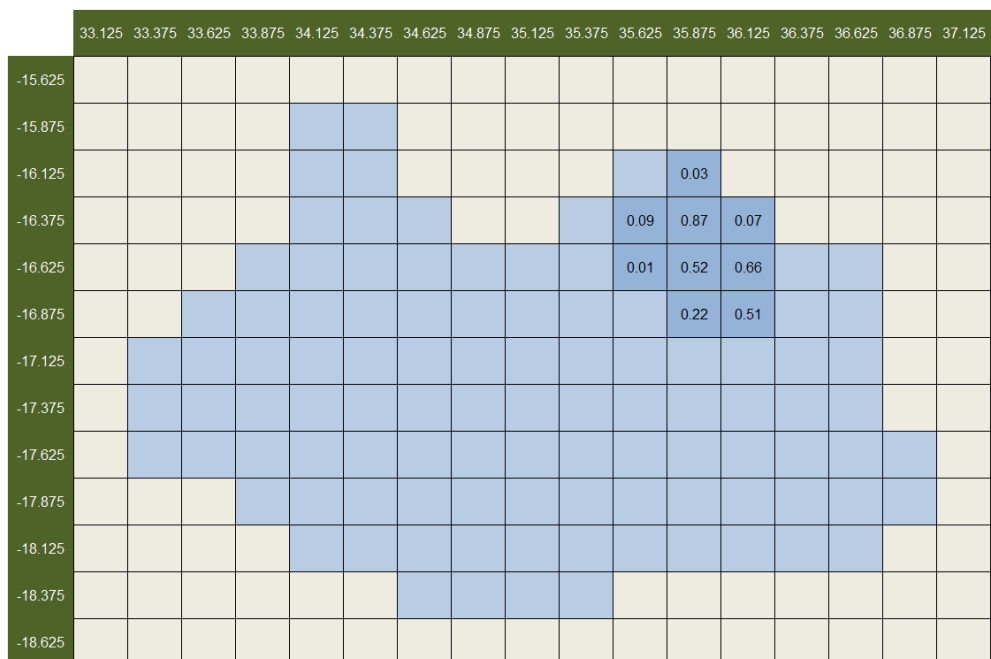


Figura 6.2 – Ficheiro fracção ("Fraction File") da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre

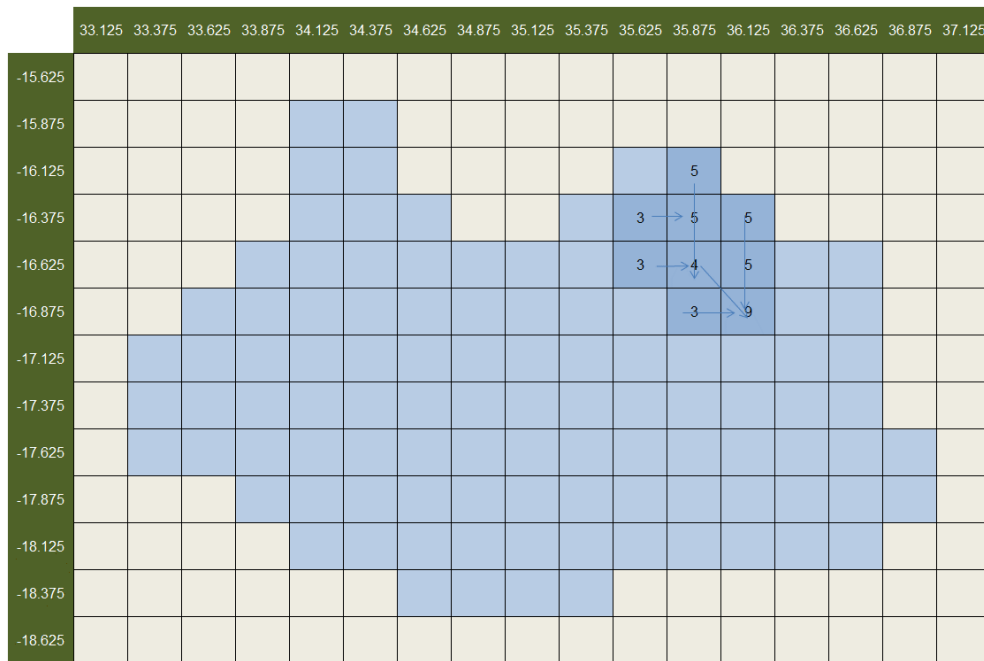


Figura 6.3 - Ficheiro direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E101 – Derre

Na Figura 6.4 apresenta-se a curva vazão adoptada para a estação E101 – Derre, a partir da qual foram calculados os caudais tendo por base as alturas hidrométricas registadas. A calibração será feita para o período de Janeiro de 2006 a Dezembro de 2012.

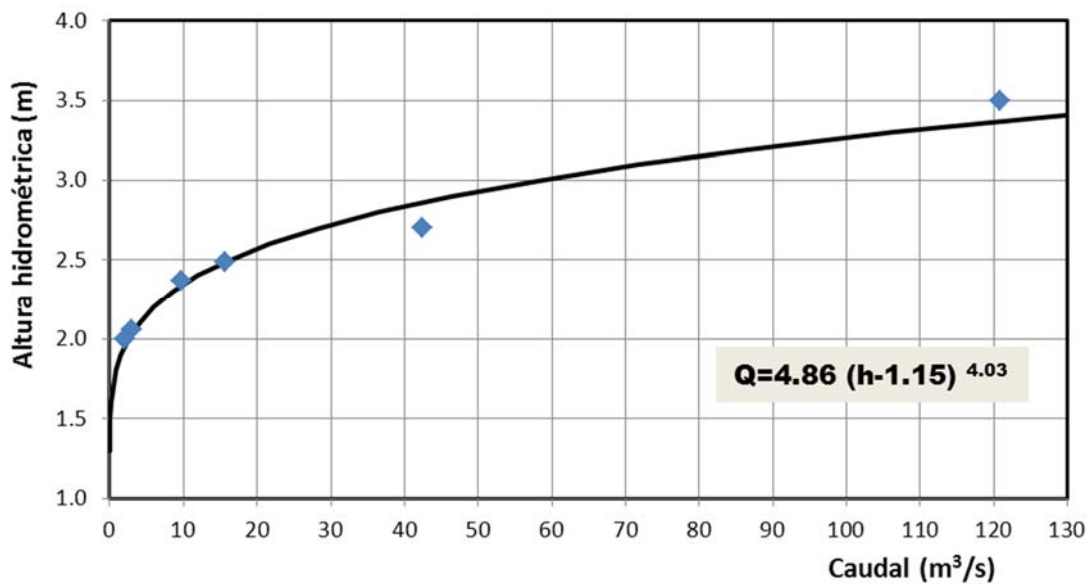


Figura 6.4 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E101-Derre

Estação E480 – EN1

A estação E480 - EN 1 (17°31'30"S; 36°16'18"E) no rio Lualua fica a jusante da estação E101 – Derre e a sua bacia hidrográfica tem uma área de 4 807 km².

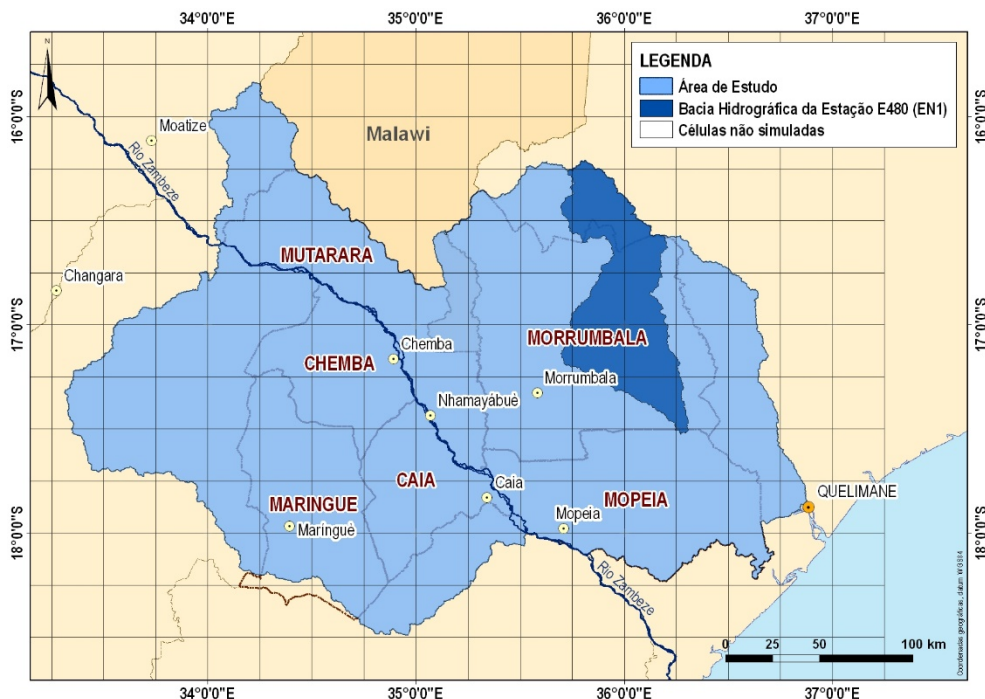


Figura 6.5 – Bacia hidrográfica da estação E480- EN1

De forma idêntica à estação E101, foram gerados os ficheiros de entrada do modelo ROUT para uma correcta descrição quer da área de drenagem quer da rede hidrográfica da estação E480-EN1. Na Figura 6.6 indicam-se as fracções contributivas de cada uma das células que descrevem a bacia hidrográfica e na Figura 6.7 apresenta-se a rede hidrográfica da estação E480 – EN1.

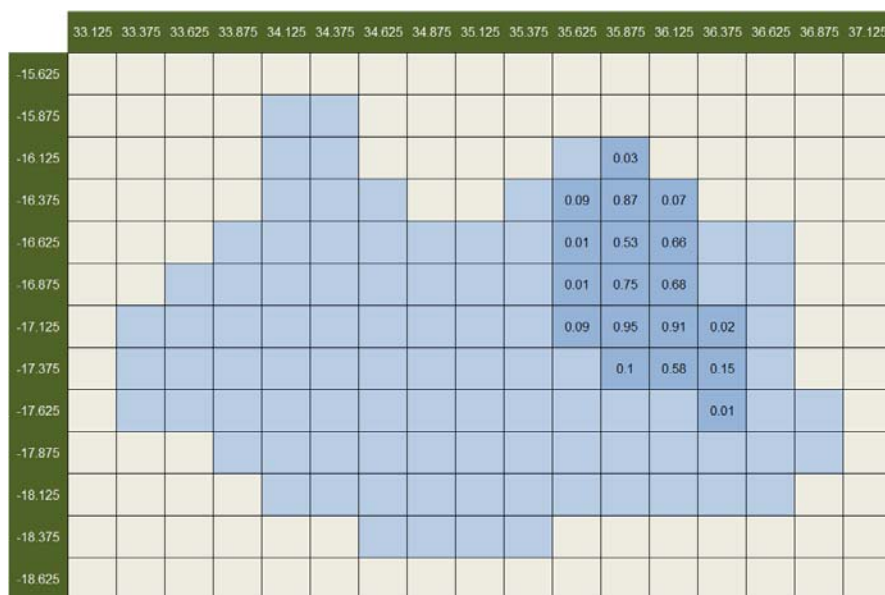


Figura 6.6 – Ficheiro fracção ("Fraction File") da bacia hidrográfica da estação E480 – EN1

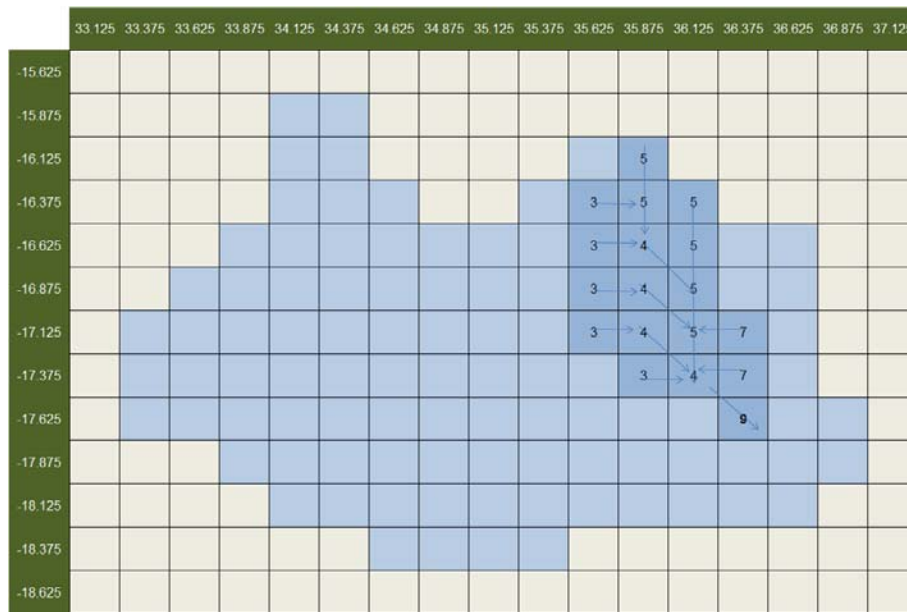


Figura 6.7 - Fichero direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E480 – EN1

Na Figura 6.8 apresentam-se as medições de caudal realizadas entre 2000 e 2013 e a curva de vazão adoptada para o cálculo dos caudais usados na calibração. A calibração do modelo VIC será feita para o período de Janeiro de 2006 a Outubro de 2011.

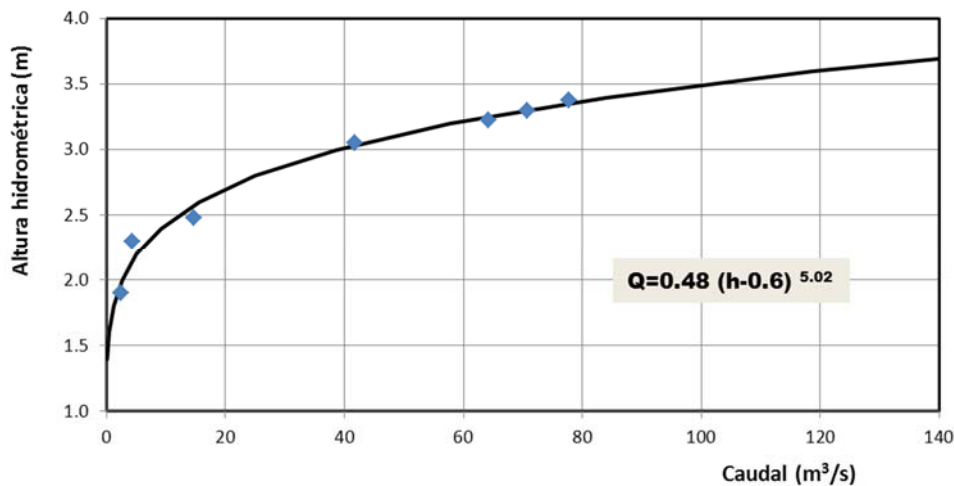


Figura 6.8 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal recentes na E480 - EN1

Estação E291 – Caia

A estação E291 – Caia no rio Zambeze foi também utilizada para calibração/verificação do modelo VIC. A bacia de drenagem desta estação tem 32 841 km² da sua superfície total na área de estudo (Figura 6.9). Na Figura 6.10 indicam-se as fracções contributivas de cada uma das células que descrevem a bacia hidrográfica e na Figura 6.11 apresenta-se a rede hidrográfica da estação E291 – Caia.

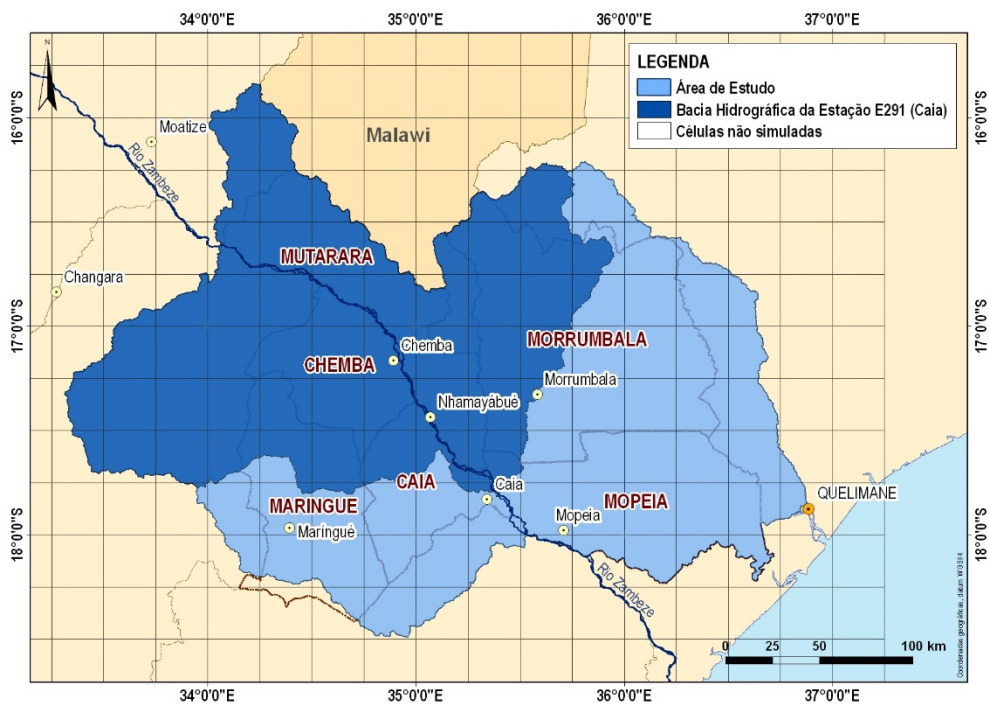


Figura 6.9 – Bacia hidrográfica da estação E291- Caia

	33.125	33.375	33.625	33.875	34.125	34.375	34.625	34.875	35.125	35.375	35.625	35.875	36.125	36.375	36.625	36.875	37.125
-15.625																	
-15.875					0.3	0.11											
-16.125					0.76	0.63						0.05					
-16.375					0.67	0.97	0.37				0.51	0.89					
-16.625					0.82	1	1	0.34	0.52	1	0.99	0.48					
-16.875			0.15	0.61	0.99	1	1	0.99	0.85	1	1	0.25					
-17.125		0.13	0.91	1	1	1	1	1	1	1	0.84						
-17.375		0.66	1	1	1	1	1	1	1	1	0.24						
-17.625		0.3	0.81	0.94	0.79	0.67	1	0.94	0.73	0.97	0.06						
-17.875				0.02		0.05	0.15		0.02	0.12							
-18.125																	
-18.375																	
-18.625																	

Figura 6.10 – Ficheiro fracção ("Fraction File") da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia

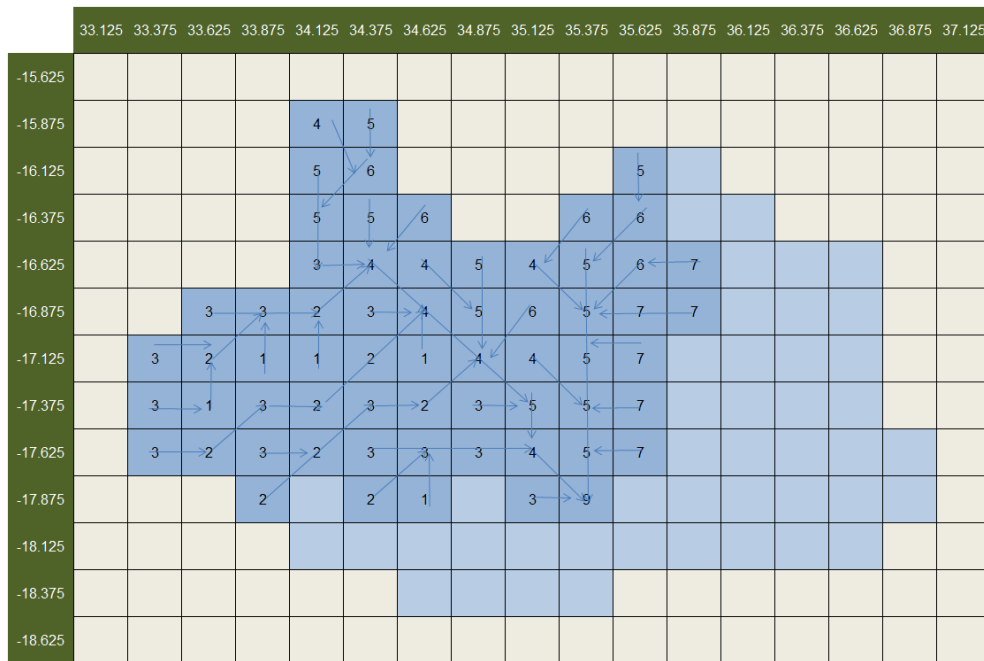


Figura 6.11 - Ficheiro direcção de escoamento ("Direction File") da bacia hidrográfica da estação E290 - Caia

A curva de vazão adoptada para a estação E2991 – Caia é apresentada na Figura 6.12. A calibração e verificação do modelo VIC será feita com os registos do período de Janeiro de 2006 a Dezembro de 2012, considerando igualmente os caudais do rio Zambeze em Lupata e do rio Chire em Chilomo.

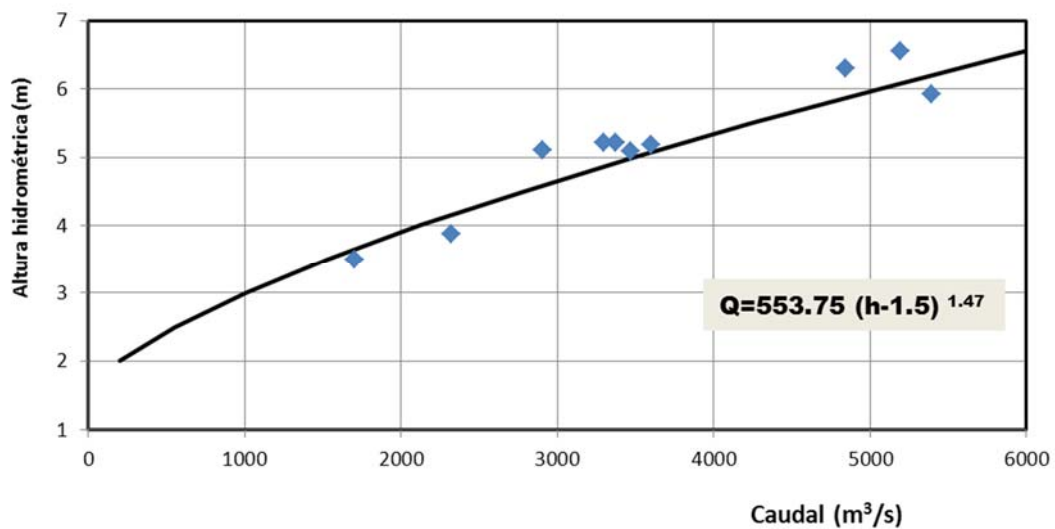


Figura 6.12 – Curva de vazão adoptada e medições de caudal na estação E291 – Caia

É de referir que para calibrar o rio Zambeze na secção do Caia foram também utilizados os caudais calculados em Lupata no rio Zambeze e em Chilomo no rio Chire. Estes caudais constituem as condições de fronteira a montante para a nossa área de estudo.

6.3 RESULTADOS OBTIDOS

Após várias tentativas de calibração dos parâmetros do Modelo VIC, indicam-se no Quadro 6.1 os valores considerados mais adequados para os parâmetros de calibração do modelo VIC. No Quadro 6.2 apresentam-se os valores dos critérios de avaliação para cada uma das bacias hidrográficas estudadas.

Quadro 6.1 – Parâmetros do modelo calibrados

Parâmetro	Valor calibrado
B_infilt (adim)	0,55
Ds (adim)	0,001
Dsmax (mm dia ⁻¹)	1,3
Ws (adim)	1
d ₁ (m)	0,1
d ₂ (m)	1,8
d ₃ (m)	2,0

Quadro 6.2 – Valores dos critérios de avaliação da calibração

Estatística de ajustamento	E101	E480	E291
Erro médio absoluto, EMAS (m ³ s ⁻¹)	9,6	20,4	414
Bias (%)	13,4	44,9	7,5
Coefficiente de regressão, b	0,95	0,97	1,1
Crítério de eficiência de Nash e Sutcliffe	0,48	0,57	0,71
Média dos valores observados (m ³ s ⁻¹)	15,3	27,4	2746
Média dos valores simulados (m ³ s ⁻¹)	17,4	39,7	2953

Na Figura 6.13 comparam-se os hidrogramas observados com os hidrograma simulados e na Figura 6.14 e Figura 6.15 apresentam-se os gráficos de regressão entre os valores observados e simulados.

A Figura 6.13 mostra que o hidrograma simulado tende a reproduzir os picos de cheia observados assim como os caudais mínimos. A eficiência de Nash e Sutcliffe é igual a 0,57 na estação E480 - EN1 e igual a 0,71 na estação E291 - Caia, o que significa que o erro médio quadrático do modelo é muito menor que a variância dos valores observados. Apenas na estação E101- Dere, o valor obtido para o critério de eficiência de Nash e Sutcliff foi ligeiramente inferior a 0,5, sendo, no entanto, este valor considerado bom na avaliação dos resultados de um modelo hidrológico (Wenger *et al.*, 2010).

O valor do coeficiente de regressão b é ligeiramente inferior a 1 quando se comparam os caudais observados com os caudais simuladas nas Estações E101 - Dere (b=0,9528) e E480 – EN1 (b=0,9736). Na estação E291 – Caia, o valor do coeficiente de regressão entres os valores observados e os simulados é de 1,0903. Quando se compara a média dos valores simulados com a dos valores observados, verifica-se que aquela é maior em todas as estações utilizadas na calibração.

O valor do indicador Bias é relativamente elevado para estação E480 – EN1, cerca de 45%. A causa de um erro de volume tão grande deve-se à diferença entre os valores observados e simulados no período 2009 a 2011. Nestes 3 anos os

caudais simulados são superiores aos observados. No processo de calibração optou-se por não reduzir mais o valor do Bias em prejuízo dos restantes critérios, uma vez que análise dos valores simulados para estação E101, situada no mesmo rio a montante da estação E480, mostra que caudais máximos simulados se ajustam aos observados no período 2009 a 2011. De facto se comparam os caudais registados nas duas estações, constata-se e que os caudais em 2010 e 2011 na estação e101 são superiores aos caudais registação na estação E480, cuja bacia hidrográfica inclui a bacia da estação E101.

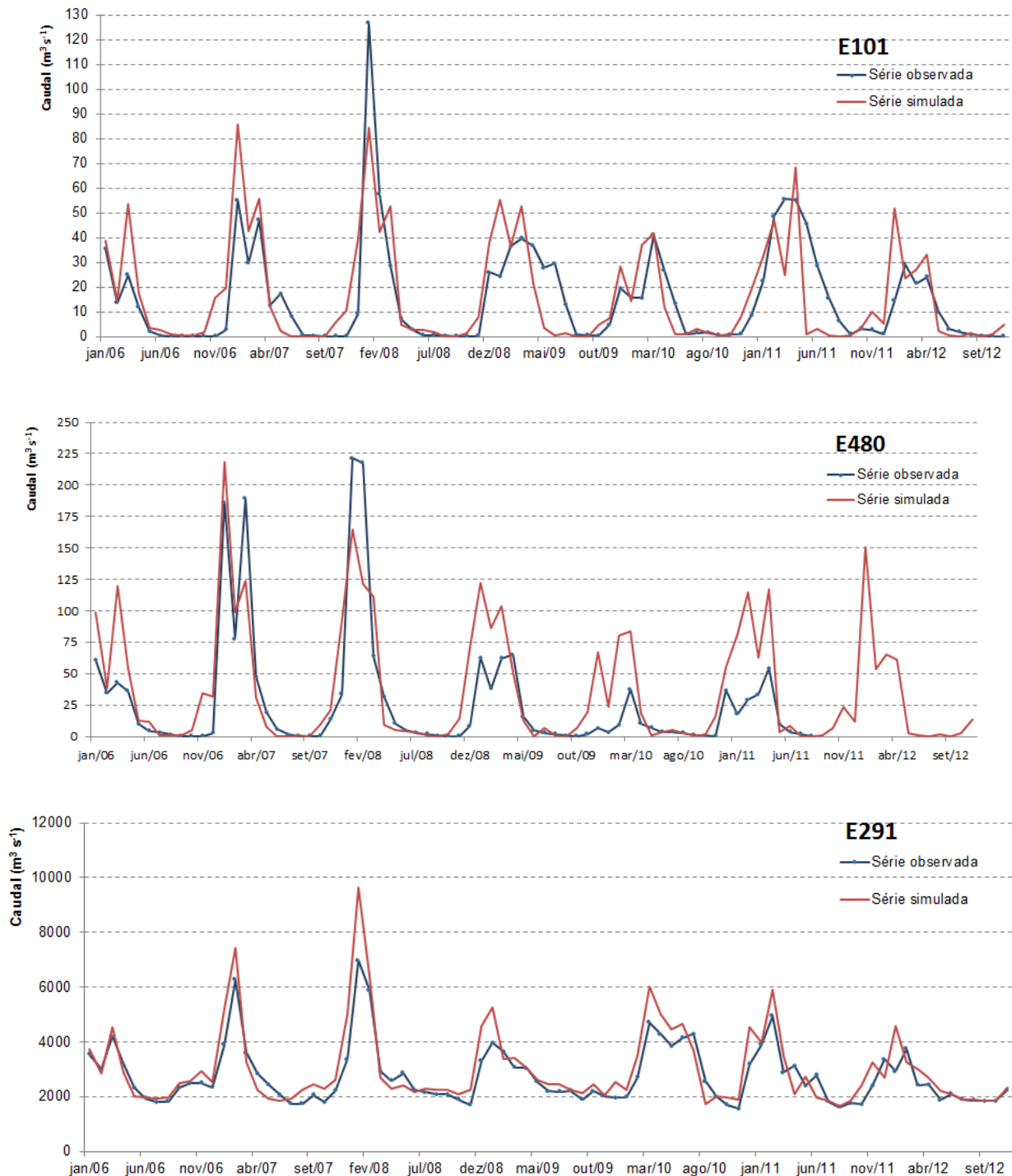


Figura 6.13 – Hidrogramas observados e simulados nas estações E101 – Derre, E480 – EN1 e E291 - Caia

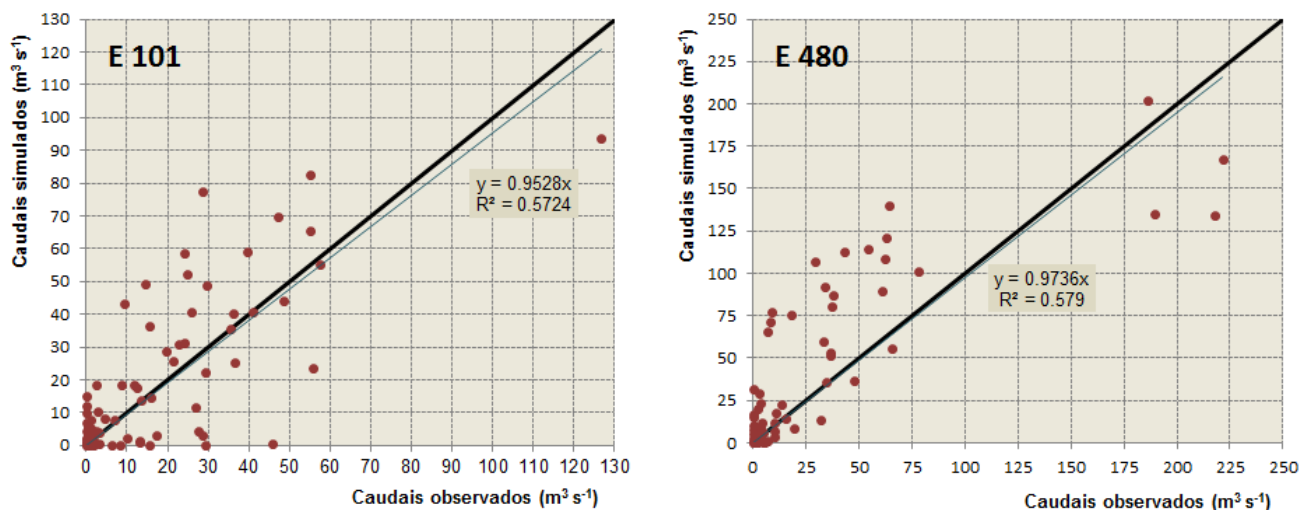


Figura 6.14 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Lualua

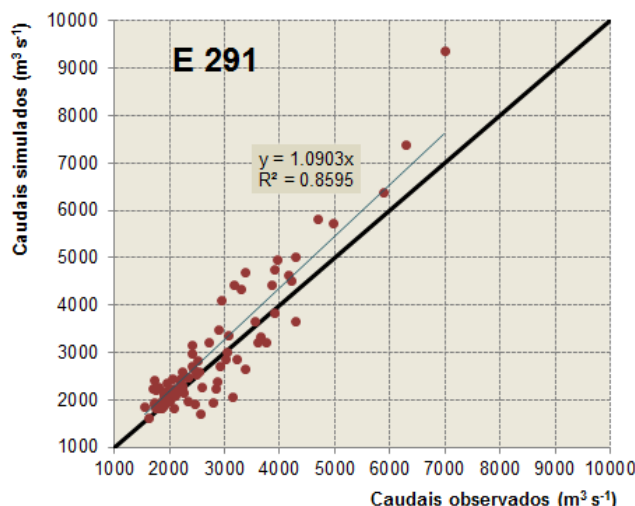


Figura 6.15 – Regressão entre os caudais observados e simulados no rio Zambeze

Os resultados obtidos na calibração do modelo permitem concluir que o modelo retransmite com uma aproximação adequada o regime hidrológico do Baixo Zambeze, reproduzindo os picos de cheia observados assim como as vazões mínimas. Os valores obtidos para o critério de Nash e Sutcliffe (entre 0,48 e 0,71) indicam que a variabilidade dos caudais observados é bem explicada pela simulação. Não obstante, a comparação dos hidrogramas observados com os simulados mostra que o volume de escoamento gerado pelo modelo tende a ser superior ao observado.

Assim e embora os resultados da calibração permitam ter confiança nos resultados da modelação do regime hidrológico do Baixo Zambeze, o processo de calibração e validação deverá prosseguir nos próximos anos pelos técnicos da ARA-Zambeze, a par do trabalho de campo que é necessário continuar a realizar para aferição das curvas de vazão de cada uma das estações hidrométricas.

7 CENÁRIOS DO USO E COBERTURA DA TERRA

Seguindo o preconizado nos Termos de Referência, foram definidos cenários de uso da terra cujas implicações no regime hidrológico se procuram identificar. A agricultura é reconhecida como fundamental para o desenvolvimento socioeconómico da região do Baixo Zambeze, o que se tem reflectido nos vários estudos que tem sido promovidos em torno da agricultura (Munguambe *et al.*, 2009).

Os dados obtidos junto dos Distritos, nomeadamente nos Planos de Desenvolvimento, mostram que na última década verifica-se uma tendência de crescimento da área agrícola, que passou de cerca de 5%, no início da década, para cerca de 9 a 10% da área total de estudo.

Por outro lado, a análise comparativa do coberto actual com os dados do mapa da cobertura vegetal segundo o Inventário Florestal Nacional (Marzoli, 2007), evidencia para além do crescimento da área agrícola, um aumento significativo das classes arbustivas (de cerca de 4% para 12% da área total) e matagal (de cerca de 0% para 5% da área total) e uma diminuição da área de floresta densa (de cerca de 27% para 16% da área total). Embora as cartas de coberto possuam uma escala diferente que poderá justificar algumas discrepâncias, pensa-se que as queimadas são a principal explicação para as diferenças significativas entre as cartas actuais de uso e coberto da terra e as cartas elaboradas aquando do Inventário Florestal Nacional em 2004-2005.

Com base nesta informação foram definidos três cenários (Quadro 7.1). Os cenários 01 e 02 reflectem as tendências actuais de alteração do uso e cobertura da terra, isto é um crescimento da área agrícola, das áreas arbustivas e do matagal e uma diminuição da floresta densa decídua e da floresta aberta (semi-) decídua (15-65% da cobertura). O cenário 03 corresponde à ocupação do solo segundo o Inventário Florestal Nacional, correspondendo ao levantamento efectuado no ano 2005, onde as classes florestais dominavam o Baixo Zambeze.

Quadro 7.1 – Representatividade das classes de uso e cobertura da terra para os cenários escolhidos

Classes de uso de cobertura da terra	Cenário Base	Cenário 01	Cenário 02	Cenário 03
Fracção da área agrícola dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta	2,7%	2,7%	2,7%	4,3%
Campos cultivados	9,0%	12,4%	17,2%	4,2%
Cultivos Arbóreos/Plantações Florestais	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%
Floresta densa decídua	16,3%	10,0%	10,0%	27,3%
Floresta densa sempre verde	4,0%	4,0%	4,0%	5,2%
Fracção da área florestal dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta	5,5%	5,6%	5,6%	4,7%
Pradaria	10,0%	10,2%	10,3%	12,5%
Áreas arbustivas	11,9%	12,9%	14,9%	4,2%
Matagal (2 a 5 m)	5,5%	7,6%	10,5%	0,0%
Floresta aberta (Semi-) Decídua (15-65% cobertura)	25,2%	24,6%	14,8%	25,1%
Floresta aberta sempre verde (15-65% cobertura)	2,4%	2,4%	2,4%	2,7%
Vegetação herbácea regularmente inundada	2,7%	2,8%	2,8%	5,0%
Arbustos em áreas regularmente inundadas	3,4%	3,3%	3,3%	3,7%
Floresta aberta em áreas regularmente inundadas (15-65% de cobertura)	1,3%	1,3%	1,3%	1,1%
Total	100%	100%	100%	100%

Os três cenários de uso e cobertura da terra identificados e o cenário base foram modelados com o mesmo conjunto de dados de entrada, diferindo apenas no que se refere ao uso da terra, conforme se apresenta no quadro atrás referido (Quadro 7.1).

8 EXPLORAÇÃO DO MODELO

8.1 INTRODUÇÃO

Após a calibração, o modelo VIC foi explorado em três etapas. Numa primeira etapa procedeu-se à análise dos resultados do modelo para a situação de referência, isto é para o uso e coberto actual do solo. Para além das séries mensais de caudais em obtidas em várias secções da área de estudo, procedeu-se à análise das séries temporais da precipitação, evapotranspiração, escoamento total e água no solo.

Numa segunda etapa procurou-se perceber qual o papel da floresta densa decídua, da agricultura, das áreas arbustivas e do matagal no regime hidrológico do Baixo Zambeze, para tal foi feita a simulação de duas células (numa zona seca e numa zona húmida) com as superfícies das células ocupadas por um único tipo de vegetação.

Finalmente foram identificados dois cenários de uso e coberto vegetal onde uma fracção da área florestal é convertida em agricultura, áreas arbustivas e em matagal. Foi ainda identificado um terceiro cenário que procura representar a ocupação vegetal de há 10 anos atrás do Baixo Zambeze, onde a floresta densa decídua era classe predominante. O regime hidrológico correspondente a estes três cenários foi comparado com o regime hidrológico correspondente ao uso e coberto actual da terra.

A aplicação dos modelos VIC e ROUT permitem analisar o regime hidrológico ao nível dos principais elementos do balanço de água (precipitação, evapotranspiração, escoamento gerado e água no solo), bem como para os caudais simulados em determinadas secções. Estes elementos são a base de análise para avaliar a influência do uso da terra no regime hidrológico.

8.2 ANÁLISE DO REGIME HIDROLÓGICO PARA A SITUAÇÃO DE REFERÊNCIA

A análise da situação actual (situação de referência) foi efectuada com base na análise em detalhe de 6 células, uma de cada um dos distritos que compõem a área de estudo.

Na margem direita do Zambeze será estudado o regime hidrológico das células 60 (17°52'30"S e 35°7'30"E), 63 (17°52'30"S e 34°22'30"E) e 114 (17°7'30"S e 34°22'30"E) localizadas nos distritos do Caia, Maringué e Chemba, respectivamente.

Dentro do distrito de Mutarara serão analisados os resultados da modelação do regime hidrológico da célula 148 (16°30'30"S e 34°22'30"E). No distrito de Morrumbala, os resultados de modelo VIC serão apresentados para a célula 107 (17°7'30"S e 36°7'30"E) que está dentro da bacia hidrográfica da estação E480 - EN1. No distrito de Mopeia serão analisadas as componentes do balanço de água da célula 73 (17°37'30" S e 36°7'30" E)

As células 107 e 73 são aquelas onde chove mais, sendo seguidas da célula 60. A célula onde chove menos é a célula 114 (distrito de Chemba). No Quadro 8.1 indicam-se os valores da precipitação anual em cada uma das células seleccionadas para análise do regime hidrológico.

Quadro 8.1 – Precipitação anual nas células seleccionadas

Ano	Precipitação (mm)					
	CEL60 (Caia)	CEL63 (Maringué)	CEL73 (Mopeia)	CEL107 (Morrumbala)	CEL114 (Chemba)	CEL148 (Mutarara)
2006	598	711	939	1212	540	559
2007	1206	863	1329	1314	826	927
2008	898	806	978	1209	713	741
2009	804	762	1122	1149	721	806
2010	746	710	794	890	651	709
2011	608	589	948	1107	590	615
2012	875	522	878	935	622	409

As células apresentam também diferenças importantes quanto ao uso e coberto vegetal (Quadro 8.2). A floresta decídua é classe dominante na célula 72 (distrito de Mopeia) onde representa 64% da superfície total da célula. Nas células 107 (Morrumbala) e Célula 148 (Mutarara), a floresta decídua assume também uma importância significativa, ocupando 27% e 19% da superfície total, respectivamente. O coberto vegetal dominante na célula 114 situada no distrito de Chemba é a floresta aberta (semi-) decídua que representa 71% da superfície total da célula.

No conjunto das células seleccionadas a agricultura assume expressão nas células 107 (15% da área total) e célula 73 (10% da área total).

Quadro 8.2 – Uso e cobertura da terra nas células 60, 63, 73, 107, 114 e 148

Classe de uso e cobertura da terra	CEL60 (Caia)	CEL63 (Maringue)	CEL73 (Mopeia)	CEL107 (Morrumbala)	CEL114 (Chemba)	CEL148 (Mutarara)
Agricultura itinerante (fracção da área agrícola dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta)		10%	5%	7%	3%	
Campos cultivados	5%		10%	15%	0.5%	
Floresta decídua	4%	7%	64%	27%	6%	19%
Floresta sempre verde	1%	2%		1%	9%	8%
Floresta fechada a aberta (fracção da área florestal dos mosaicos de agricultura itinerante com floresta fechada a aberta)		22%	13%	17%	7%	
Pradaria	8%		0%		0%	11%
Áreas arbustivas	41%	9%			2%	22%
Matagal (2 a 5 m)		14%	1%	1%	0.1%	
Floresta aberta (Semi-) Decídua (15-65% cobertura)	29%	35%	7%	30%	71%	18%
Vegetação herbácea regularmente inundada	12%					11%
Arbustos em áreas regularmente inundadas	1%	1%	1%	1%	2%	11%
	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Nas Figuras seguintes apresentam-se as séries temporais simuladas das principais componentes do balanço de água para 6 células consideradas.

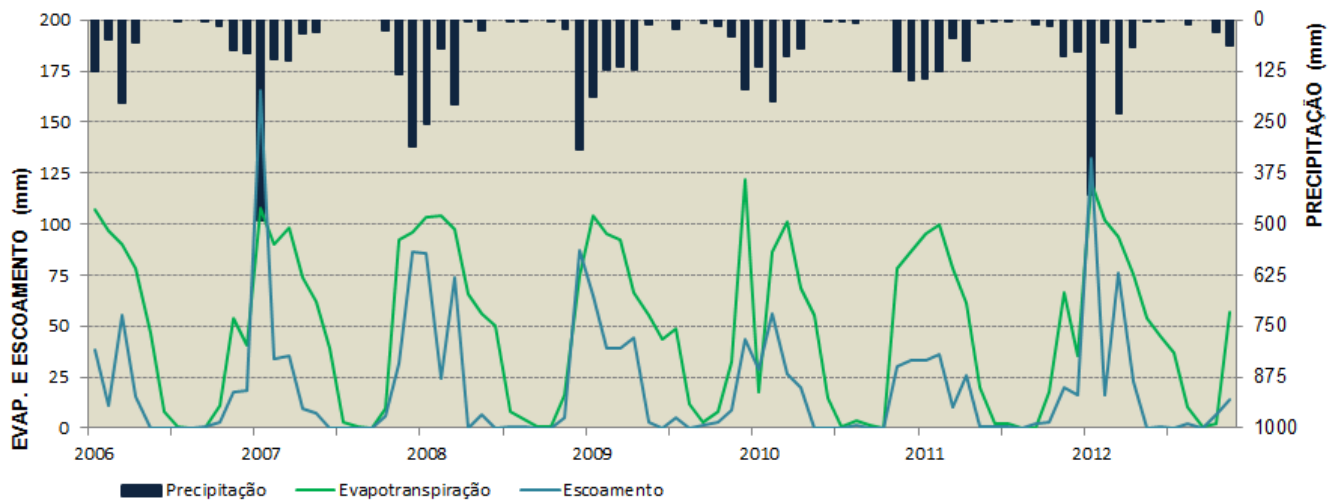


Figura 8.1 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 60 (Distrito de Caia)

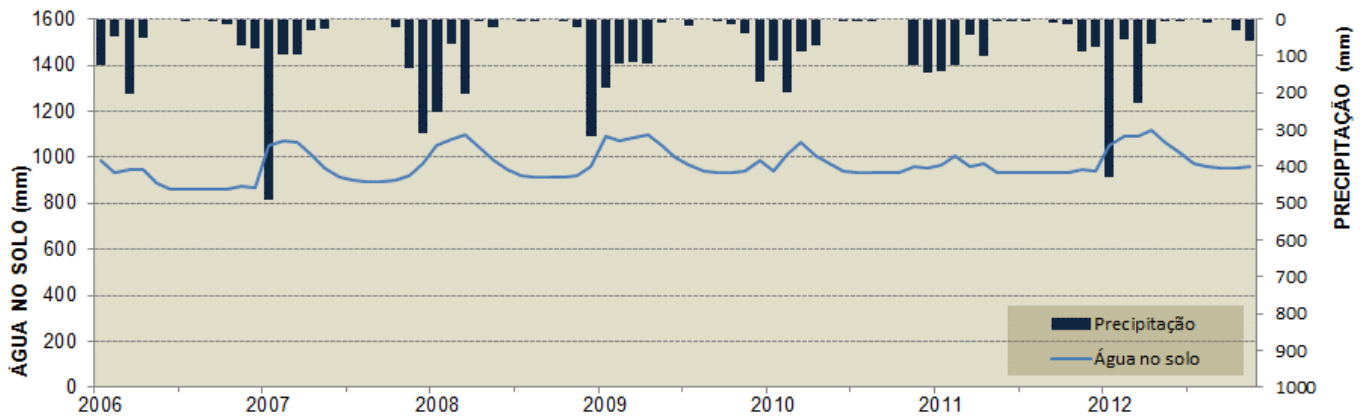


Figura 8.2 – Série mensal simulada da água no solo na célula 60 (Distrito de Caia)

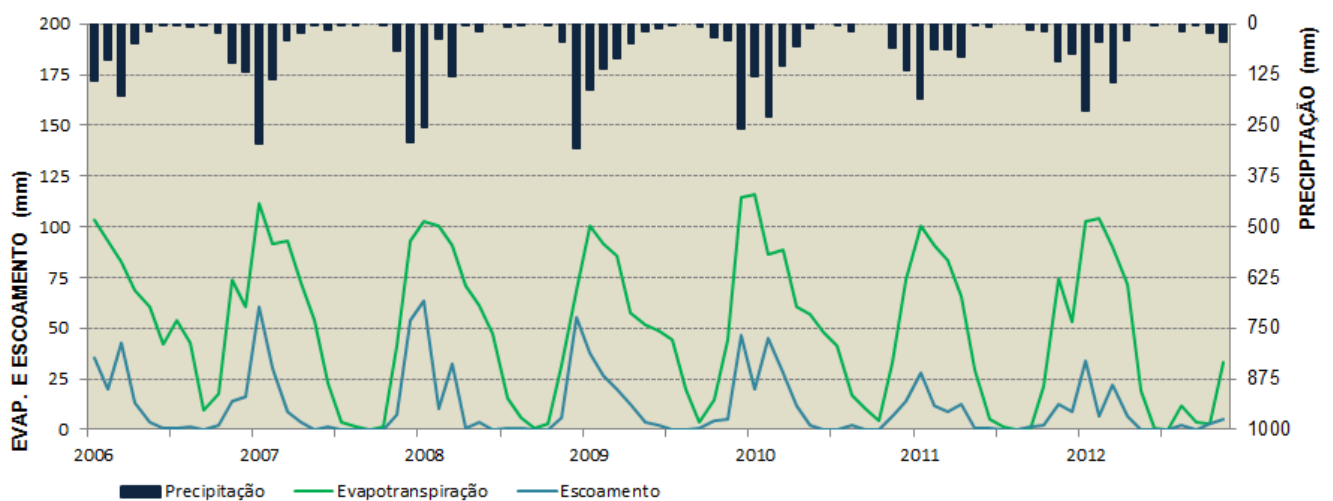


Figura 8.3 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 63 (Distrito de Maringué)

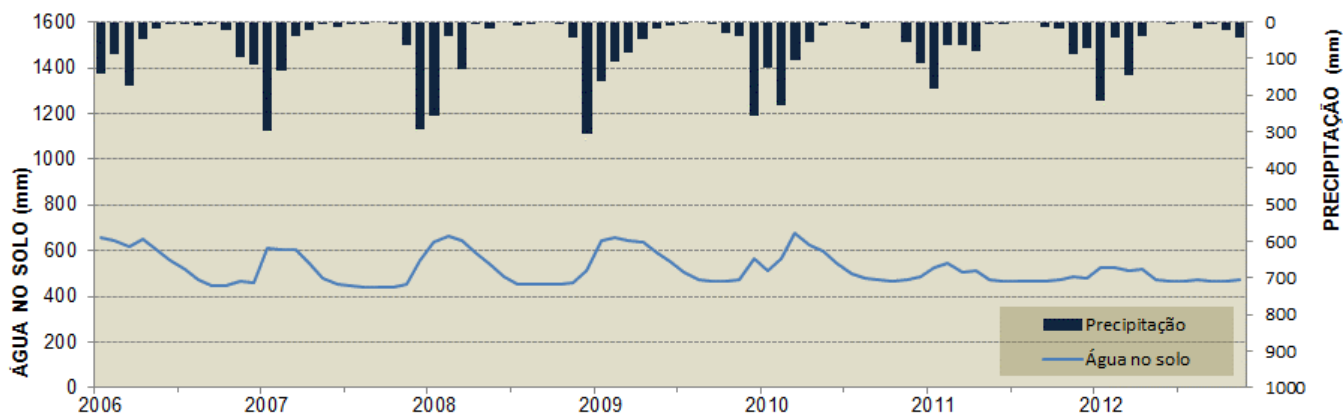


Figura 8.4 – Série mensal simulada da água no solo na célula 63 (Distrito de Maringué)

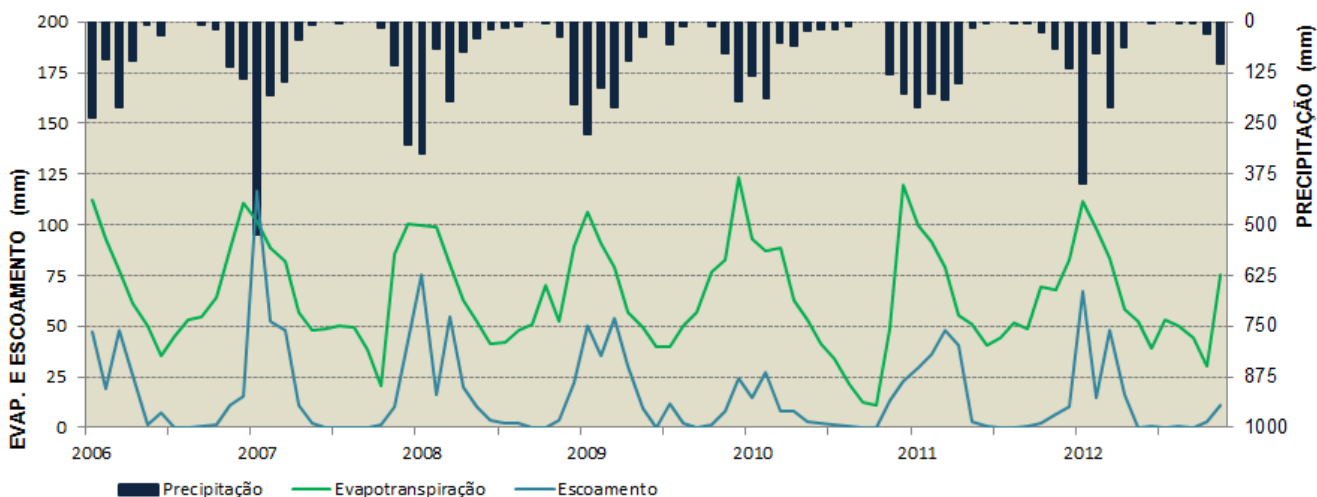


Figura 8.5 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 73 (Distrito de Mopeia)

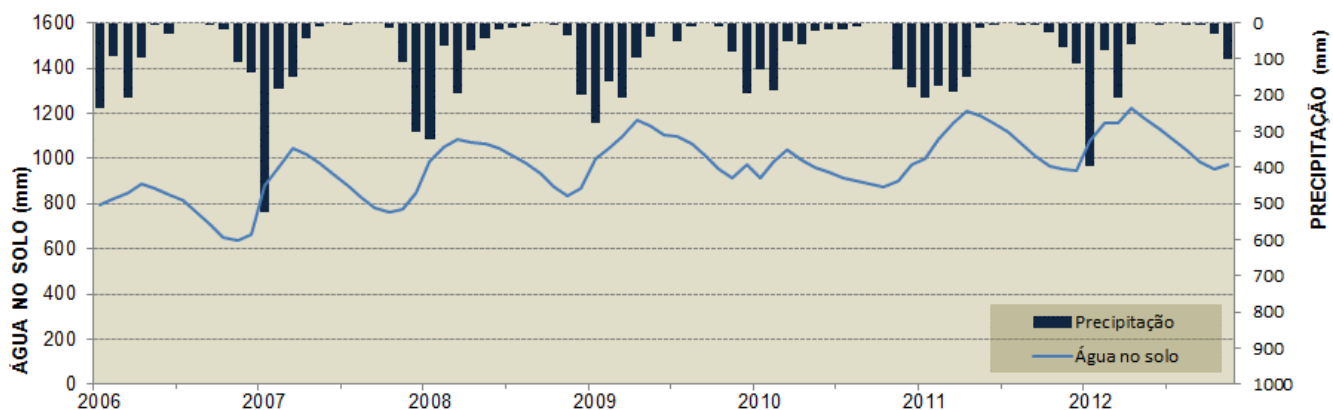


Figura 8.6 – Série mensal simulada da água no solo na célula 73 (Distrito de Mopeia)

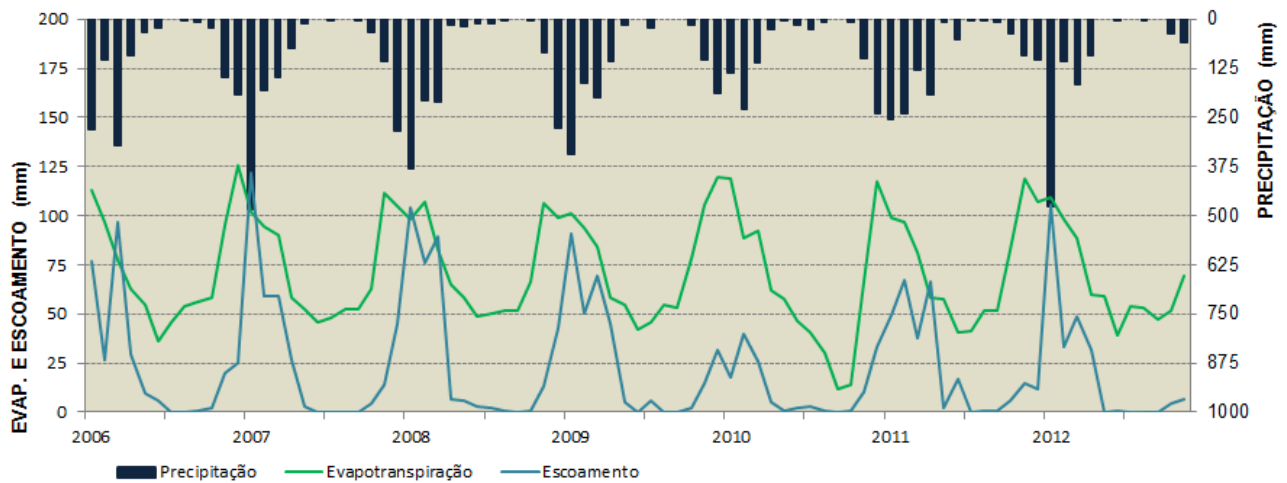


Figura 8.7 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 107 (Distrito de Morrumbala)

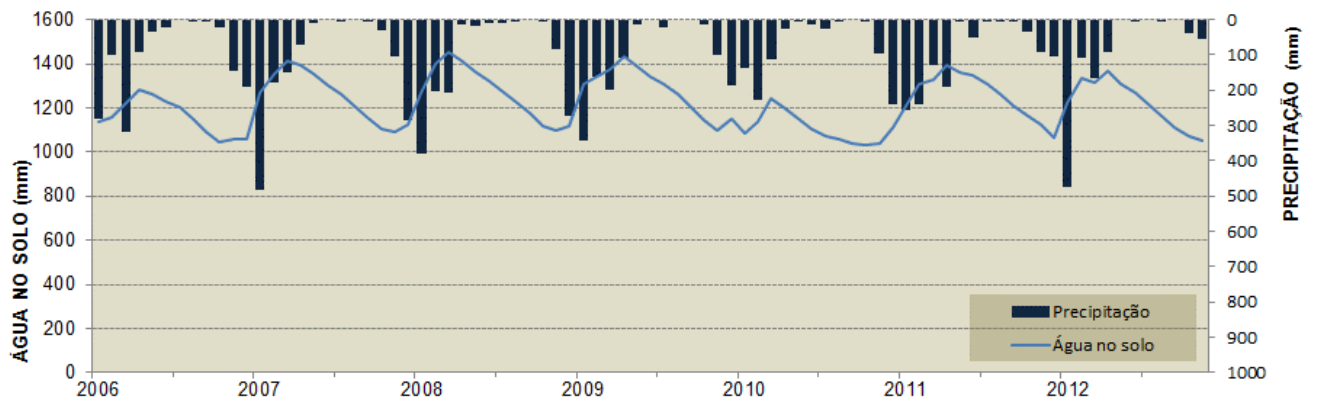


Figura 8.8 – Série mensal simulada da água no solo na célula 107 (Distrito de Morrumbala)

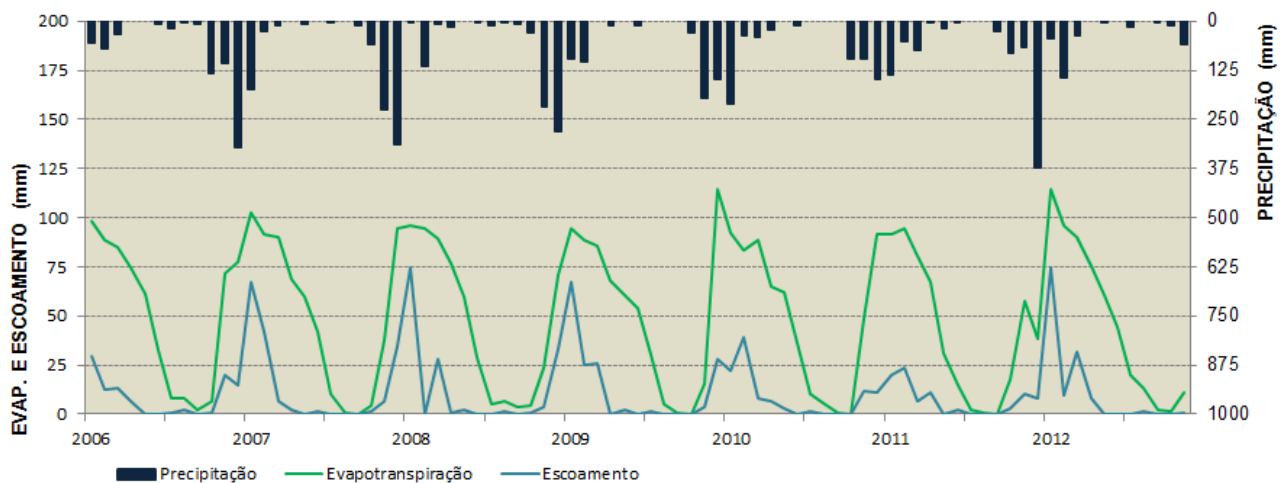


Figura 8.9 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 114 (Distrito de Chemba)

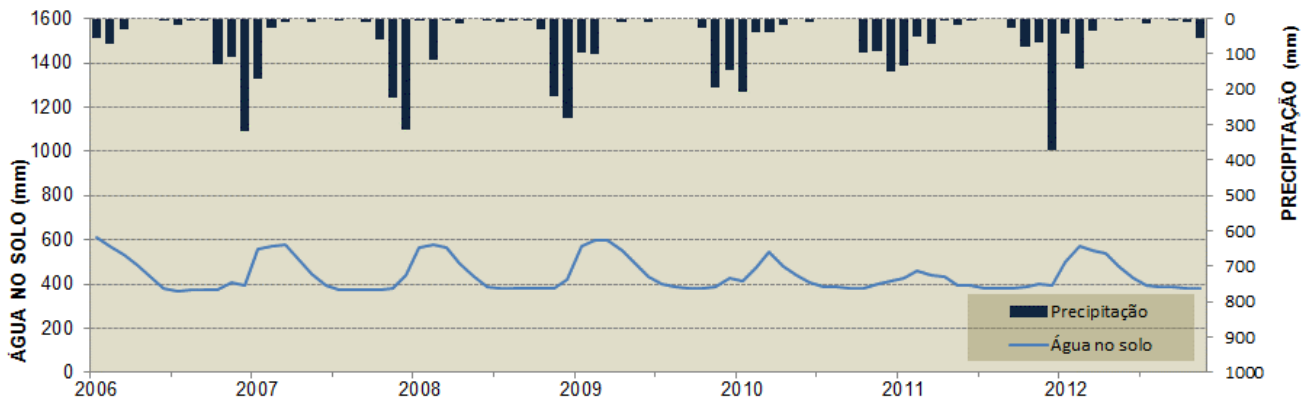


Figura 8.10 – Série mensal simulada da água no solo na célula 114 (Distrito de Chemba)

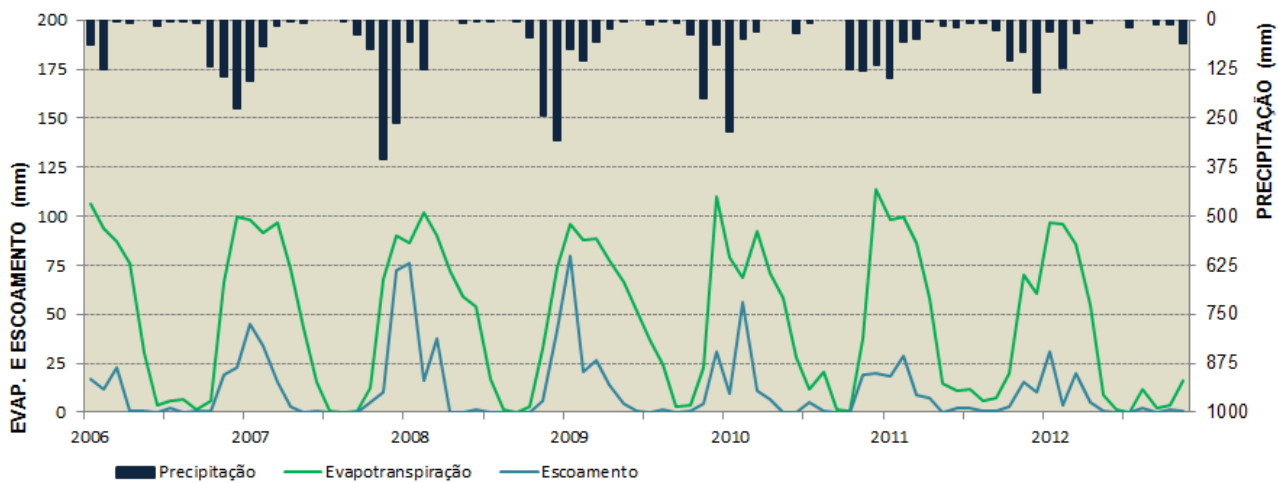


Figura 8.11 – Séries mensais simuladas da evapotranspiração e escoamento na célula 148 (Distrito de Mutarara)

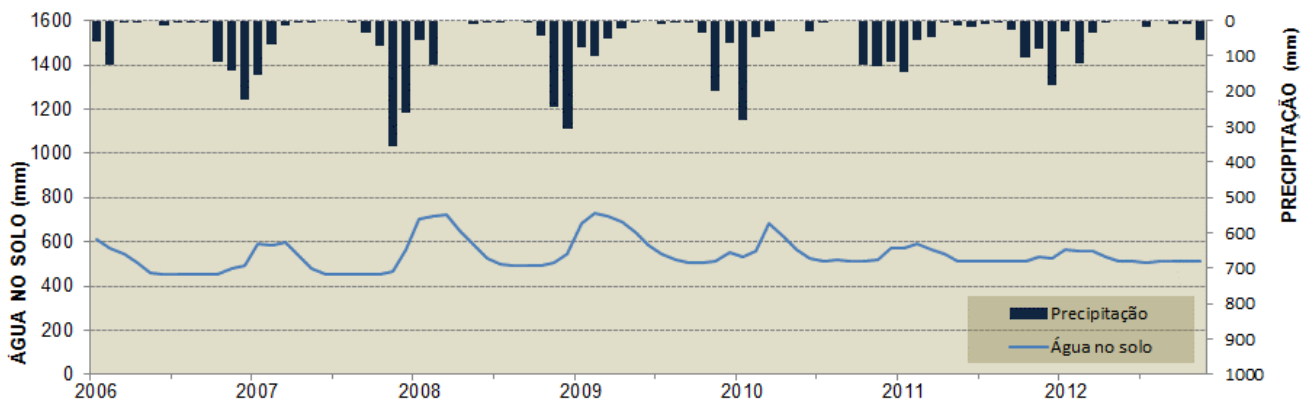


Figura 8.12 – Série mensal simulada da água no solo na célula 148 (Distrito de Mutarara)

O regime hidrológico simulado em cada uma das células reflecte bem as diferenças observadas quer ao nível da precipitação quer ao nível do uso e cobertura da terra.

A evapotranspiração é significativamente maior nas células 107 (Morrumbala) e 73 (Mopeia), principalmente durante a estação seca. Nestas duas células os valores mínimos de evapotranspiração (cerca de 10 mm mês⁻¹) ocorrem durante a estação seca do ano de 2010 (Figura 8.5 e Figura 8.7), que foi o ano mais seco da série simulada. Nas outras células a evapotranspiração desce frequentemente abaixo 5 mm mês⁻¹ na estação seca.

Os maiores valores da evapotranspiração simulados nas células 73 e 107 são consequência da maior quantidade de água disponível no solo (Figura 8.6 e Figura 8.8). O que explica também as diferenças encontradas ao nível do uso e coberto da terra. De facto, a floresta densa existente nas células 73 e 107 é parcialmente substituída pela floresta aberta e/ou pela floresta fechada a aberta nas outras células.

A análise das Figuras mostra também que o escoamento gerado nas células 170, 73 e 60 é significativamente superior ao gerado nas células 63, 114 e 148. O menor volume anual de escoamento simulado é quase sempre na célula 114 (no distrito Chemba) e 148 (no distrito de Mutarara).

Na Figura 8.13 e na Figura 8.14 apresenta-se os valores anuais da precipitação, evapotranspiração e do escoamento total para os anos de 2007 e 2010. Estas ilustram bem as diferenças espaciais no regime hidrológico do Baixo Zambeze.

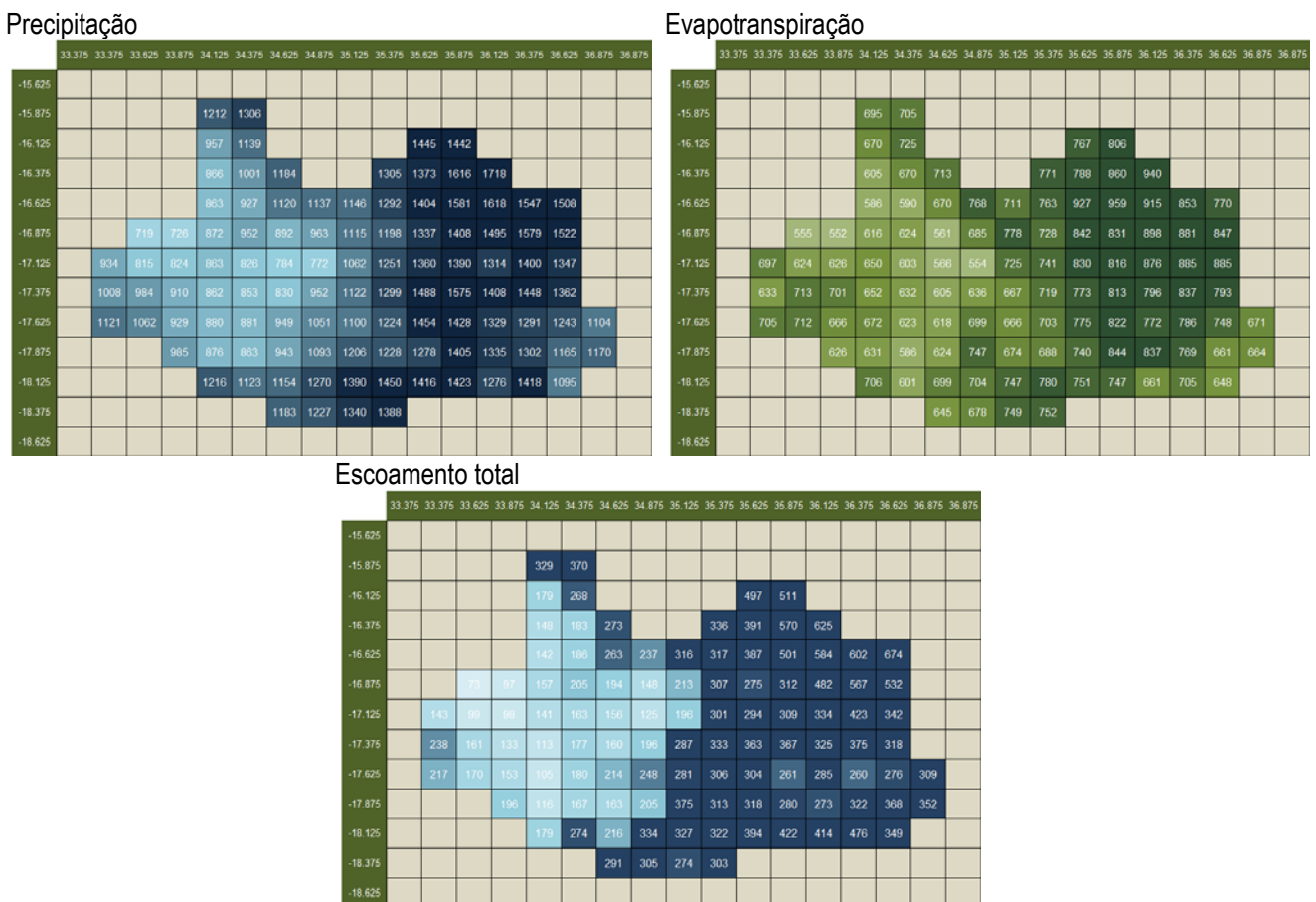
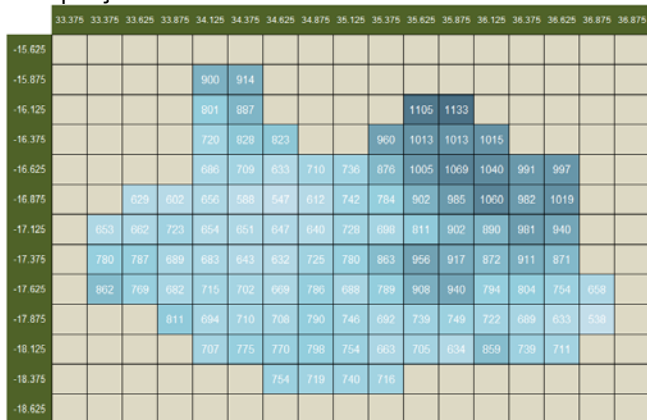
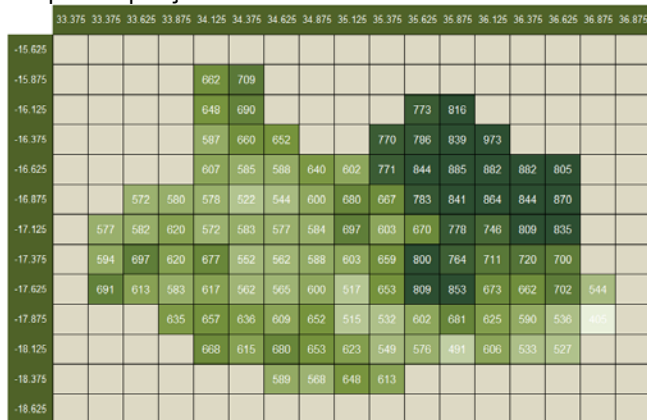


Figura 8.13 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2007

Precipitação



Evapotranspiração



Escoamento total

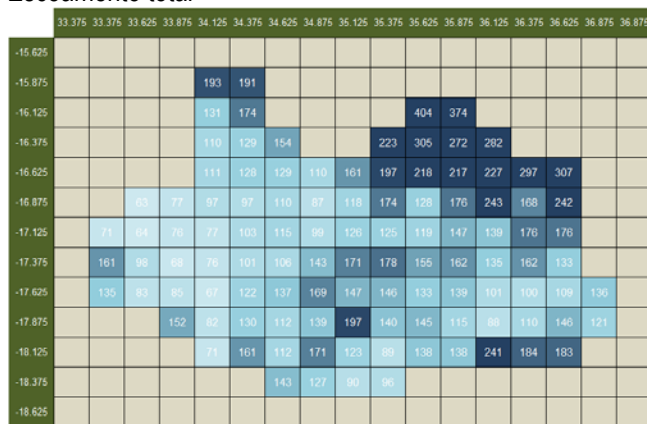


Figura 8.14 – Valores anuais simulados da precipitação, evapotranspiração e escoamento em 2010

8.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COBERTO VEGETAL NO REGIME HIDROLÓGICO

De modo a melhor compreender o efeito do tipo de coberto vegetal no regime hidrológico procedeu-se à simulação das células 107 (no distrito de Morrumbala) e 114 (no distrito de Chemba) assumindo que toda a superfície das células é ocupada por um único tipo de vegetação. As classes de vegetação consideradas nesta análise foram as seguintes:

- Floresta densa decídua;
- Agricultura;
- Área arbustivas; e
- Matagal.

As duas células consideradas para esta análise estão à mesma latitude, apresentando diferenças significativas no que se refere à precipitação (Quadro 8.1). Na Figura 8.15 e na Figura 8.16 apresentam-se as séries mensais simuladas da evapotranspiração nas células 107 e 114, respectivamente. Estas Figuras mostram que os valores máximos da evapotranspiração são simulados para o uso agrícola durante a estação húmida, que corresponde à estação de crescimento. Quando a água no solo não limita a evapotranspiração na estação seca (caso da célula 107, Figura 8.15 e Figura 8.17), a evapotranspiração das culturas é claramente inferior à das florestas, das áreas arbustivas e matagal. Efectivamente, o índice de área foliar das culturas na estação seca é inferior a qualquer um dos outros cobertos.

Quando a água no solo durante a estação seca limita evapotranspiração (caso da célula 114, Figura 8.18), verifica-se que os valores simulados da evapotranspiração são da mesma ordem de grandeza para todos os tipos de vegetação (Figura 8.16).

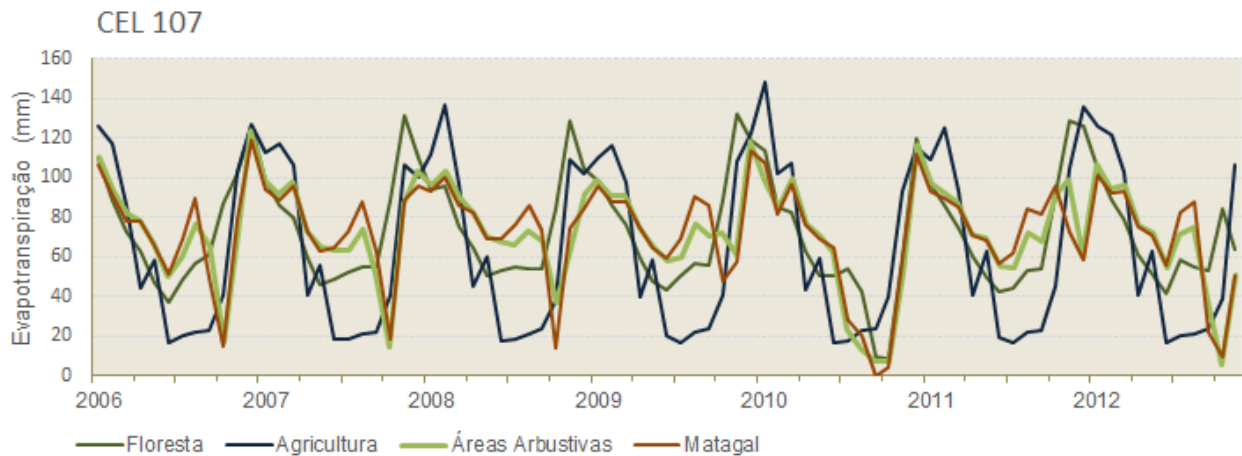


Figura 8.15 - Séries temporais de evapotranspiração na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação

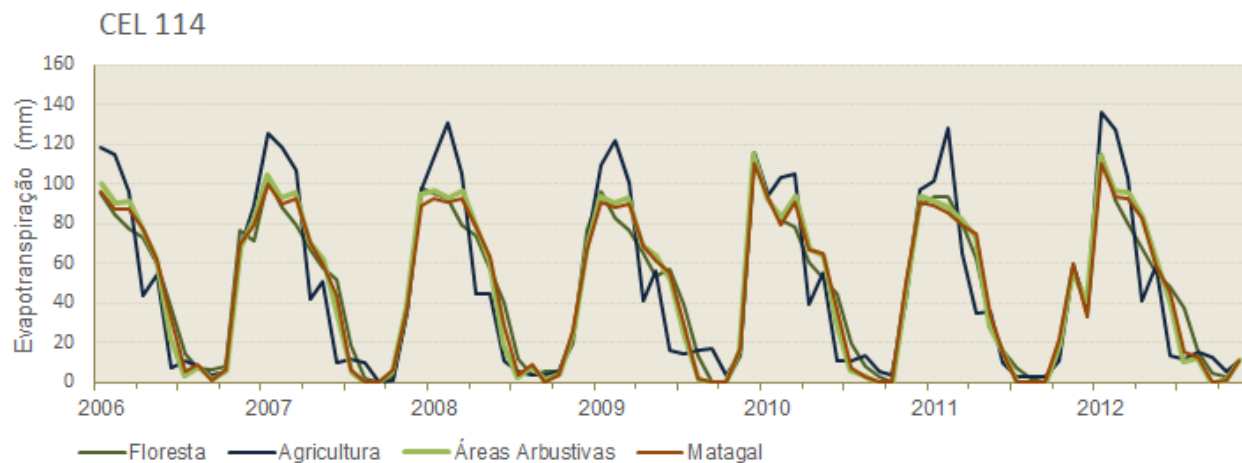


Figura 8.16 - Séries temporais de evapotranspiração na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação

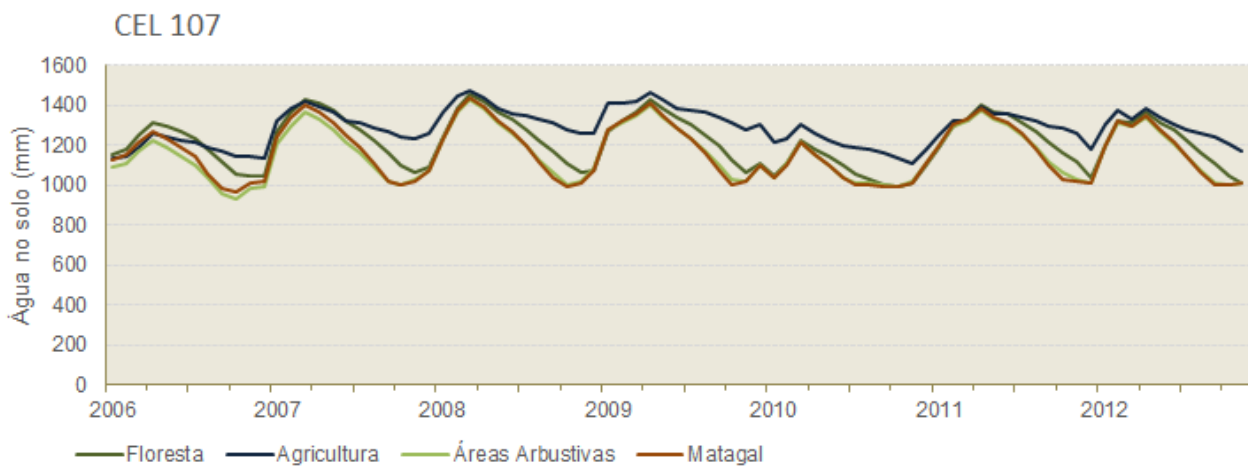


Figura 8.17 - Séries temporais de água no solo na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação

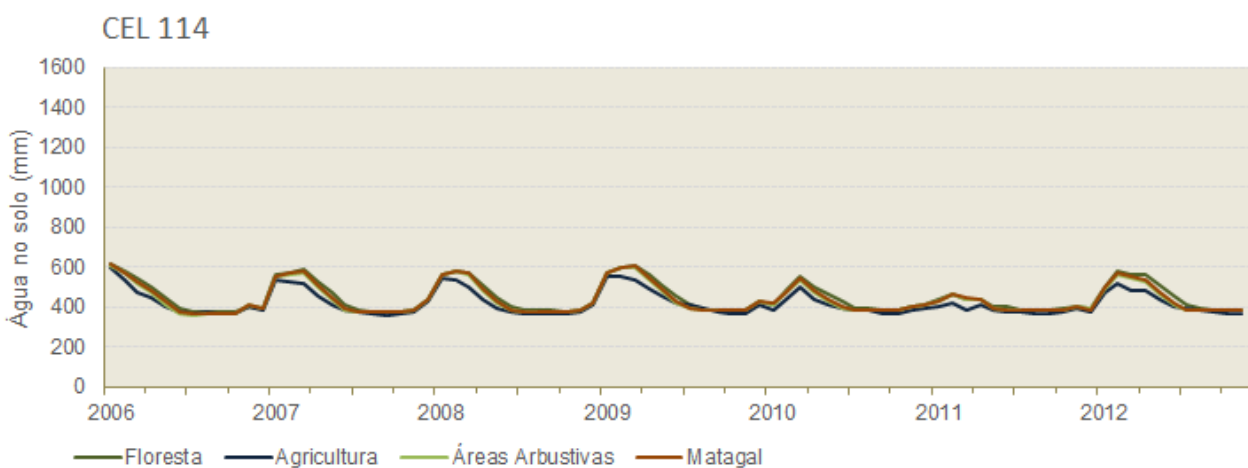


Figura 8.18 - Séries temporais de água no solo na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação

As séries mensais de escoamento simuladas para cada um dos tipos de vegetação nas células 107 e 107 são apresentadas na Figura 8.19 e Figura 8.20. Enquanto na célula 107, os caudais máximos simulados para o uso agrícola são claramente superiores aos simulados para floresta, áreas arbustivas e matagal, na célula 114 (Figura 8.19) não verificam diferenças significativas nos hidrogramas simulados para cada um dos tipos de vegetação (Figura 8.20).

Esta diferença entre as células 107 e 114 é explicada pela quantidade de água interceptada e armazenada pela vegetação. A quantidade de água interceptada e armazenada pela floresta é sempre superior a qualquer um dos outros tipos de vegetação, sendo seguida por ordem decrescente pelo matagal e áreas arbustivas. A agricultura é tipo de uso com menor capacidade de interceptação e armazenamento. Quando a precipitação é baixa (caso da célula 114), as diferenças da quantidade de água interceptada/armazenada entre os diferentes tipos de vegetação atenuam-se o escoamento gerado tende a ser da mesma ordem de grandeza.

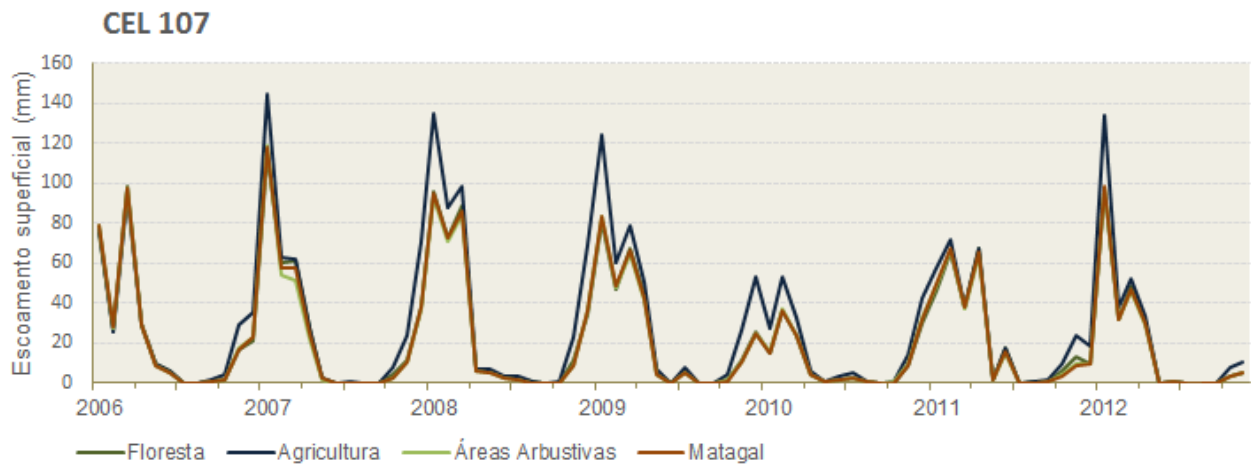


Figura 8.19 - Séries temporais de escoamento superficial na Célula 107 admitindo um único tipo de vegetação

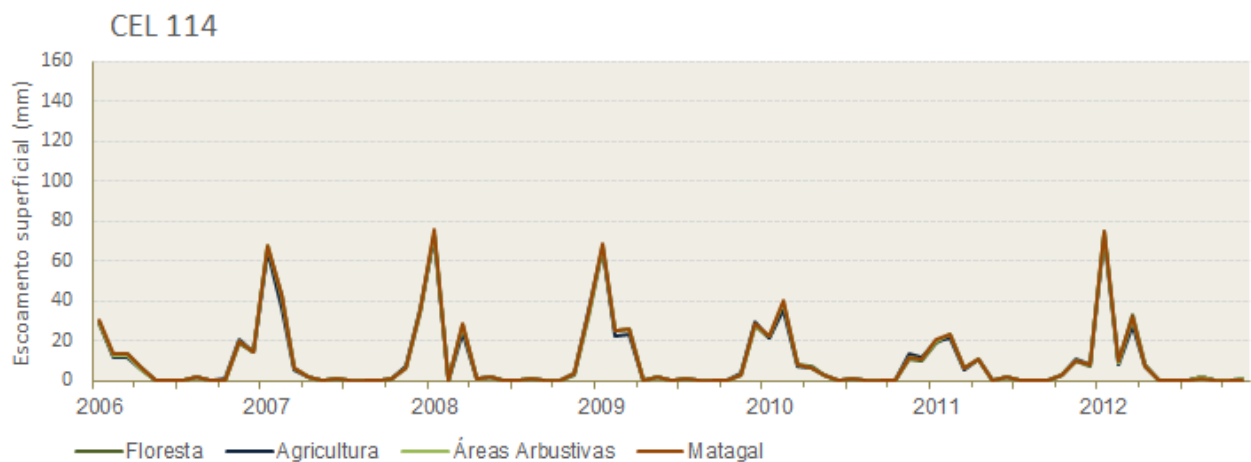


Figura 8.20 - Séries temporais de escoamento superficial na Célula 114 admitindo um único tipo de vegetação

8.4 RESPOSTA HIDROLÓGICA AOS DIFERENTES CENÁRIOS DE USO E COBERTURA DA TERRA

A resposta hidrológica às alterações do uso e cobertura da terra foram avaliadas com base nos três cenários seleccionados e considerando quatro secções da área de estudo: a montante das confluências dos rios Zangué e Sangadeze com rio Zambeze (CEL60 e CEL96, respectivamente), no rio Zambeze a jusante da confluência do rio Zangué (CEL59) e na secção final do rio Cuácua (CEL53).

A área drenada pelo rio Sangadeze distribui-se pelos distritos de Maringué e Chemba e a área drenada pelo rio Zangué concentra-se nos distritos de Maringué e Caia. O hidrograma na célula 59 resulta da propagação do escoamento de todas as células da área de estudo com excepção da bacia de drenagem do rio Cuácua. A bacia hidrográfica do Cuácua reparte-se pelos distritos de Morrumbala e Mopeia.

A avaliação foi feita em termos dos valores mensais dos caudais, da evapotranspiração e do escoamento total gerados nas células cujo escoamento produzido aflui para as células terminais referidas atrás (Figura 8.21).

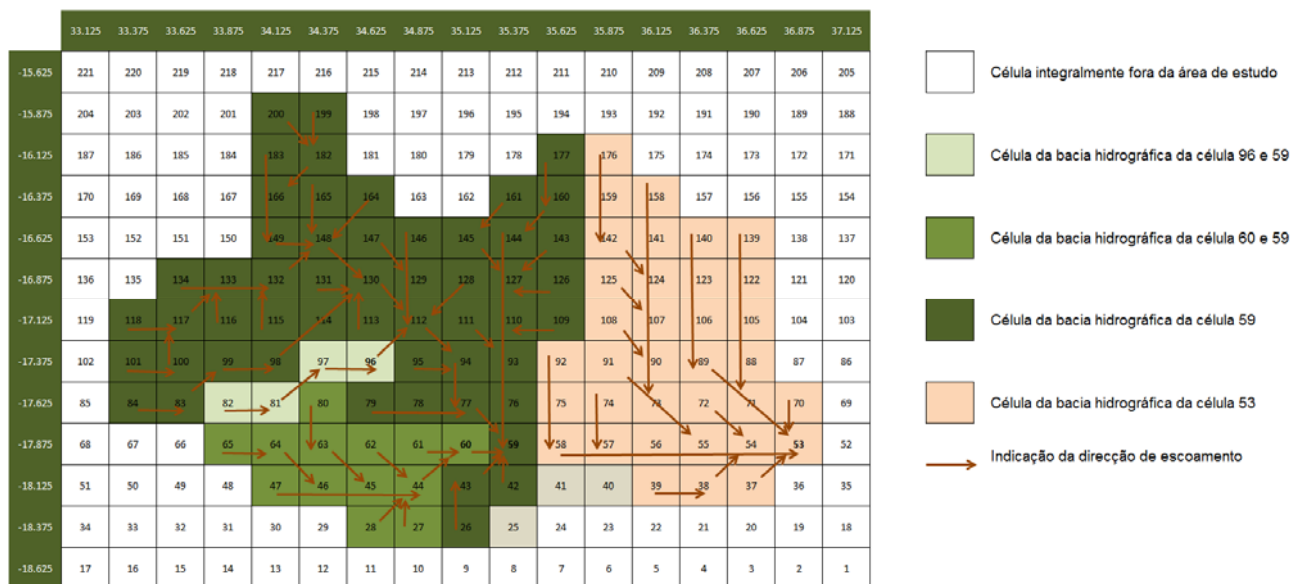


Figura 8.21 - Bacias hidrográficas das células 96, 60, 59 e 53

Na modelação dos impactos decorrentes das mudanças do uso e cobertura de terra não se entrou com os caudais em Lupata e em Chilomo. A inclusão destas duas condições fronteira iria mascarar quaisquer alterações no escoamento devidas às alterações do uso da terra na área de estudo.

No Quadro 8.3 apresentam-se os resultados obtidos. Embora o a área agrícola tenha como consequência um aumento do escoamento gerado como se viu no Capítulo 5.2, os resultados do Quadro 8.3 mostram que o aumento da área agrícola preconizados nos cenários 01 e 02 tem um efeito praticamente nulo no regime hidrológico do Baixo Zambeze.

Os resultados da modelação hidrológica dos cenários do uso e cobertura da terra mostram que o cenário 01 e 02 só se traduzem numa ligeira diminuição da evapotranspiração anual na margem esquerda do rio Zambeze. A ocupação de área florestal por campos cultivados assim como por área arbustivas e matagal, tem como efeito uma exígua diminuição da evapotranspiração na estação húmida e na estação seca. A diminuição da evapotranspiração na estação seca tem significado, apenas, nas células da grelha onde água no solo não constitui um factor limitante para evapotranspiração.

No que se refere às séries de escoamento simulados ao nível das células constata-se que os cenários 01 e 02 conduzem a um pequeno aumento dos picos máximos nas células onde a precipitação é elevada, como é o caso da célula 107 (Quadro 8.1).

Nas células onde a precipitação é baixa (caso da célula 114), os vários cenários não produzem diferenças ao nível do escoamento gerado.

Quadro 8.3 – Caudal médio, máximo e mínimo, simulados para diferentes cenários de uso e cobertura da terra

Cenários de uso e cobertura da terra		Ciclo hidrológico (2006-2011)						
		Caudal médio (m ³ /s)	Caudal máximo (m ³ /s)	Caudal mínimo (m ³ /s)	Precipitação média anual (mm)	Evapotranspiração média anual (mm)	Escoamento médio anual (mm)	Razão de escoamento
CEL96 (rio Sangadeze)	Cenário base	9,9	66,3	0,0	683	598	104	0,15
	Cenário 01	9,9	66,3	0,0		598	104	0,15
	Cenário 02	9,9	66,2	0,0		599	103	0,15
	Cenário 03	9,9	66,2	0,0		598	103	0,15
CEL60 (rio Zangué)	Cenário base	50,0	305,4	0,3	815	652	171	0,21
	Cenário 01	50,0	305,6	0,3		652	171	0,21
	Cenário 02	50,0	305,6	0,4		653	171	0,21
	Cenário 03	49,7	303,9	0,2		654	170	0,21
CEL59 (rio Zambeze)	Cenário base	188,5	1149,7	1,2	808	652	163	0,20
	Cenário 01	188,6	1150,7	1,3		652	163	0,20
	Cenário 02	188,6	1151,2	1,5		653	163	0,20
	Cenário 03	188,2	1150,0	1,1		653	162	0,20
CEL53 (rio Cuácua)	Cenário base	135,2	891,2	2,8	1077	801	263	0,24
	Cenário 01	136,2	901,6	3,0		799	265	0,25
	Cenário 02	137,1	906,1	3,1		797	267	0,25
	Cenário 03	135,4	884,1	2,3		799	265	0,25

O cenário 01 e o cenário 02 conduzem a um ligeiro aumento dos caudais mensais máximos gerados na foz do rio Cuácua (CEL53) assim como no rio Zambeze na célula 59. As alterações do uso e cobertura da terra não produziram qualquer modificação no hidrograma gerado para as células 96 (rio Sangadeze) e 60 (rio Zangué).

A análise dos dados do Quadro 8.3 mostra ainda que os cenários 01 e 02 tendem a conduzir a ligeiro aumento dos caudais mensais mínimos em consequência da diminuição da evapotranspiração que se faz sentir com mais significado na estação seca.

No cenário 03 a área florestal em toda a área de estudo é significativamente maior do que no cenário base o que se traduziu num aumento da evapotranspiração quer na estação húmida quer na estação seca e numa diminuição do escoamento em toda a área de estudo que se traduz numa pequena diminuição dos caudais máximos.

8.5 CONCLUSÕES

O modelo VIC depois de calibrado permitiu modelar com suficiente exactidão o processo hidrológico para as condições actuais de uso e coberto da terra e para os cenários futuros.

O desenvolvimento sócio-económico da região do Baixo Zambeze em conjunto com a contínua prática de queimadas tem-se traduzido nos últimos tempos numa mudança do coberto vegetal, com tendência para a diminuição das áreas florestais e um aumento das áreas agrícolas e das áreas arbustivas e mato.

Com base nesta tendência foram definidos três cenários de uso da terra: Os cenários 01 e 02 traduzem um agravamento da redução da área florestal e um aumento das classes de campos agrícolas, áreas arbustivas e de mato. O cenário 03 procura representar a ocupação existente há 10 anos no Baixo Zambeze, onde a floresta densa decídua era classe predominante.

A avaliação dos impactos no regime hidrológico decorrentes dos cenários identificados foi efectuada através da exploração do modelo VIC, cuja concepção destaca o coberto vegetal, como um dos principais dados de entrada do modelo. Todas as simulações foram feitas com o mesmo conjunto de dados de entrada fazendo variar unicamente as fracções de cada classe do coberto vegetal. A situação actual foi comparada com os três cenários simulados.

Os regimes hidrológicos simulados para os cenários 01 e 02 comparativamente com o cenário base caracterizam-se por uma pequena diminuição da evapotranspiração e por um ligeiro aumento dos valores mensais máximos de caudal nos anos de elevada pluviosidade. Este aumento dos caudais máximos é devido fundamentalmente à menor capacidade do reservatório do coberto vegetal. Durante a estação seca, as mudanças de coberto projectadas exprimem-se numa diminuição do índice de área foliar e consequentemente na diminuição da evapotranspiração que associada à menor profundidade de solo explorada pelas raízes resulta na extracção de menos água do solo. Verificando-se uma pequena tendência para o aumento dos caudais mínimos.

A análise aqui efectuada é feita com base em valores mensais, que não traduzem os caudais máximos instantâneos do regime hidrológico. É de esperar que as alterações de coberto vegetal dos cenários 01 e 02, que se traduzem numa diminuição da capacidade de interceptação do coberto vegetal, conduzam a incrementos superiores aos medidos nos caudais máximos instantâneos, embora o volume anual de escoamento gerado seja praticamente o mesmo do produzido no cenário base.

No cenário 03 observa-se a inversão dos impactos hidrológicos identificados nos cenários 01 e 02. O aumento generalizado da área florestal em toda a área de estudo tem como consequências directas uma diminuição dos caudais máximos e mínimos em resultado da menor produção de escoamento superficial e de base e um aumento da evapotranspiração.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo VIC depois de calibrado permitiu modelar com suficiente exactidão o processo hidrológico da área em estudo. Para tal foi feita uma análise exhaustiva os dados cartográficos, hidrometeorológicos, de solos e do uso e cobertura da terra.

As redes udométrica e meteorológica existente na área em estudo tem algumas deficiências na sua distribuição espacial e nalguns casos tem muitas falhas e má qualidade de dados, neste contexto e tendo em conta as características do modelo VIC, decidiu-se seguir a mesma metodologia utilizada na maioria dos estudos de aplicação do modelo VIC noutras partes do mundo, que passa pela utilização de dados de precipitação obtidos a partir da rede de satélites, cujos sensores e o tratamento de dados permite obter uma boa distribuição espacial da precipitação e que é de uso gratuito.

A comparação entre a precipitação da rede terrena e obtida de satélite denota algumas diferenças, principalmente para os meses com maior precipitação e para os locais onde a precipitação de origem orográfica é determinante, que registam valores na rede udométrica superiores aos dados de satélite e para os locais mais encaixados do vale do Zambeze, com valores na rede udométrica inferiores aos valores calculados via satélite. No entanto a precipitação de satélite apresenta uma boa variação espacial e representa muito bem os meses secos e húmidos e os anos húmidos e secos e como irá servir para gerar caudais através de um modelo calibrado, considerou-se adequado para correr o modelo VIC.

No que se refere aos solos e ao uso e coberto vegetal a informação recolhida é recente e permite uma boa caracterização destas variáveis e satisfazem as necessidades do modelo VIC.

No que se refere aos caudais utilizados na calibração do modelo VIC e como condição de fronteira a montante da nossa área de estudo, apresentam várias limitações que condicionam a qualidade da calibração do modelo, Conforme foi descrito no Volume II, existem uma clara inconsistência entre os caudais nas duas estações localizadas no rio Lualaba, no período de 2008/09 a 2010/11 com os caudais médios anuais na estação E101-Derre, a serem superiores ou semelhantes aos caudais na E480-EN1, enquanto a área da bacia hidrográfica da estação E101 é menos de metade da área da estação E480. Estas inconsistências podem ser devido a alterações dos fundos e da configuração do leito a jusante da estação E101-Derre, nomeadamente devido à existência neste período de um açude, cujo plano de água que deve atingir o local da estação, majorando os caudais calculados, pois as medições de efectuadas foram realizadas após a destruição desse hipotético açude. A ocorrência de situações deste tipo deve ser bem comentada pela equipa local e pelo respectivo leitor, para serem tomadas medidas adequadas.

Tendo em vista a exploração do modelo, foram previamente definidos cenários futuros de uso e cobertura da terra. O desenvolvimento sócio-económico da região do Baixo Zambeze e em conjunto com a prática das queimadas tem-se traduzido numa mudança do coberto vegetal, com tendência para a diminuição das áreas florestais e um aumento das áreas agrícolas e das áreas arbustivas e mato. Neste sentido foram definidos três cenários de uso e cobertura da terra: Os cenários 01 e 02 traduzem um agravamento da redução da área florestal e um aumento das classes de campos agrícolas, áreas arbustivas e de mato. O cenário 03 procura representar a ocupação existente há 10 anos no Baixo Zambeze, onde a floresta densa decídua era classe predominante.

A avaliação dos impactos no regime hidrológico decorrentes das mudanças no uso e cobertura da terra foi efectuada através da aplicação do modelo VIC, em cuja concepção, se destaca o coberto vegetal e uso da terra, como um dos principais dados de entrada.

Os regimes hidrológicos simulados para os cenários 01 e 02 comparativamente com o cenário base caracterizam-se por uma pequena diminuição da evapotranspiração e um dos valores máximos de caudal nos anos de elevada pluviosidade. As mudanças de coberto projectadas exprimem-se numa diminuição do índice de área foliar na estação seca e consequentemente na diminuição da evapotranspiração que associada à menor profundidade de solo explorada pelas raízes resulta na extracção de menos água do solo. Verificando-se uma pequena tendência para o aumento dos caudais mínimos. Nos cenários 01 e 02 observa-se ainda um aumento dos caudais máximos que se deve sobretudo à menor capacidade do reservatório do coberto vegetal.

No cenário 03 observa-se a inversão dos impactos hidrológicos identificados nos cenários 01 e 02. O aumento generalizado da área florestal em toda a área de estudo tem como consequências directas uma diminuição dos caudais máximos e mínimos em resultado da menor produção de escoamento superficial e de base e um aumento da evapotranspiração.

Podendo-se concluir que as alterações ao uso da terra não afectam de modo significativo o regime de caudais, para além do aumento da actividade agrícola, criar condições para uma resposta mais rápida às chuvadas intensas, com caudais mais elevados nos períodos húmidos e alturas de cheias.

Com base no trabalho realizado, as principais recomendações prendem-se com os dados de caudal que foram o principal condicionante à aplicação do Modelo VIC, conforme foi descrito no Volume II, devido à má qualidade dos dados que condicionaram a qualidade da calibração do modelo VIC. Neste sentido serão estes os dados a serem revistos e completados com maior prioridade de modo a obter caudais fiáveis que possam permitir rever a calibração do modelo, de modo ter um modelo que seja mais representativo da área em estudo, com destaque recomenda-se:

- Maior controle de qualidade das leituras das alturas hidrométricas e do funcionamento das estações, verificando possíveis alterações no leito do rio que afectem a qualidade dos dados;
- Treino dos leitores na leitura dos dados de precipitação, onde se detectaram alguns erros, com destaque para a estação udométrica de Licuare;
- Realizar mais medições de caudal para melhor suportar o estabelecimento das curvas de vazão
- Avaliar os perfis transversais das secções das medições para detectar possíveis alterações do fundo, que possam condicionar a período de validade das curvas de vazão calculadas.

No que se refere à influência do uso e cobertura da terra no regime hidrológico, mesmo que não seja muito claro nas simulações efectuadas, o coberto vegetal é fundamental na infiltração de água no solo e recarga dos aquíferos e atraso na resposta do escoamento superficial às chuvadas intensas, pelo que no período de início da época das chuvas, o solo deve estar o mais possível coberto pela vegetação, pelo que as queimadas são o factor mais negativo no que se refere ao uso da terra.

10 BIBLIOGRAFIA

A.O.C Technical Services, Hidrotécnica Portuguesa, R. F. LOXTON, HUNTING & associates, Empresa Técnica de Levantamentos aéreos, (1974), Recursos agrários e planeamento do uso da terra, Bacia do Rio Zambeze. Relatório sobre os solos do bloco 9 (Relatório nº 1A/9), Gabinete do Plano do Zambeze, Lourenço Marques.

A.O.C Technical Services, Hidrotécnica Portuguesa, R. F. LOXTON, HUNTING & associates, Empresa Técnica de Levantamentos aéreos (1975), Recursos agrários e planeamento do uso da terra, Bacia do Rio Zambeze. Relatório sobre os solos do bloco 11 (Relatório nº 1A/11), Gabinete do Plano do Zambeze; Lourenço Marques.

Allen R.G., *et al.*, (1998), Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, 300p.

Beernaert F. e L. Rochette, (1990), First evaluation on natural resources and agriculture systems of aldeias comunais in district of Guro, FAO/AGO/MOZ/75/011. FIELD DOCUMENT N° 20 DTA-BIBL.

Beernaert F., (1987), Geomorphological-pedological investigation of the Manangas in Southern Mozambique, Ph.D. Faculty of Sciences, State University of Ghent, Belgium.

Blondin C., (1991), Parameterization of land-surface processes in numerical weather prediction, in Land Surface Evaporation: Measurements and Parameterization, edited by T. J. Schmugge and J. C. Andre, pp. 31-54, Springer-Verlag, New York.

Dickinson R.E., (1984), Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. Climate Processes and Climate Sensitivity, *Geophys. Monogr.*, No. 29, Amer. Geophys. Union, 58-72.

Dijkshoorn J.A., *et al.*, (1993), Os Solos das Províncias de Maputo e Gaza. Nota Explicativa dos Mapas de Solos, Escalas 1:50 000 e 1:250 000 (versão preliminar). Com. 76, INIA/DTA, Maputo
Duband D., *et al.* (1993), Unit-hydrograph revised - an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification, *Journal of Hydrology*, 150(1), 115-149.

Duband D., C. Obled e J. Rodriguez, (1993), Unit hydrograph revisited: an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification. *J. Hydrology*. 150, 115–149.

Ducoudre, N. I., K. Laval e A. Perrier, (1993), SECHIBA, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land Atmosphere Interface within the Lmd Atmospheric General-Circulation Model, *J. Clim.*, 6(2), 248-273.

Empresa Técnica de Levantamentos aéreos, R. F. Loxton, Hunting & Associates, (1973), Recursos agrários e planeamento do uso da terra, Bacia do Rio Zambeze. Relatório sobre os solos do bloco 4 (Relatório nº 1A/4), Gabinete do Plano do Zambeze.

Empresa Técnica de Levantamentos aéreos, R. F. Loxton, Hunting & Associates, (1973), Recursos agrários e planeamento do uso da terra, Bacia do Rio Zambeze. Relatório sobre os solos do bloco 5 (Relatório nº 1A/5), Gabinete do Plano do Zambeze.

Empresa Técnica de Levantamentos aéreos, R. F. Loxton, Hunting & Associates, (1973), Recursos agrários e planeamento do uso da terra, Bacia do Rio Zambeze. Relatório sobre os solos do bloco 6 (Relatório nº 1A/6), Gabinete do Plano do Zambeze; Lourenço Marques.

- FAO, (2001), Lectures notes on the major soils of the World (with CD-Rom), by P. Driessen, J. Deckers, O. Spaargaren & F. Nachtergaele, eds. World Soil Resources Report, 94, Rome
- FAO/ISRIC, (2003), Soil and Terrain Database for Southern Africa, 1:2 million scale, Rome
- FERNANDES J.F., (1968), Os solos do Parque Nacional da Gorongosa, Instituto de Investigação Agronómica de Moçambique, Comunicações 19.
- Franchini M. e M. Pacciani, (1991), Comparative-analysis of several conceptual rainfall runoff models, *Journal of Hydrology*, 122(1-4), 161-219.
- Friedrich J.L. et al., (1980), Mopeia State Farm Rice Complex Province of Zambezia, Mozambique, FAO/MOZ/75/011 Field Report 15.
- Gao H., et al., (2010), Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model. In: *Algorithm Theoretical Basis Document for Terrestrial Water Cycle Data Records* (in review).
- Hidrotécnica Portuguesa, (1960), Vale do Zambeze. Elementos de estudo. Cartas Agrológicas, Urema-Zángoé, Junta Provincial de Povoamento/Missão de Fomento e Povoamento do Zambeze.
- INIA/DTA, (1995), Legenda da Carta Nacional de Solos, Escala 1:1 000 000. Com. 73, Sér. Terra e Água, Maputo.
- Laan F.B. Van Der e Rochette, (1980), Natural zones, present land use and infrastructure Manica Province, Central Part, FAO/MOZ/75/011.
- Landon J.R. et al., (1991), Booker Tropical soil Manual; a handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the Tropics and Subtropics, Longman Scientific & Technical.
- Liang X., E.F. Wood, e D.P. Lettenmaier, (1996), Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification, *Global Planet Change*, 13(1-4), 195-206.
- Liang X., Lettenmaier D.P., (1994), A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models, *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14415-14428.
- Liechti T. C., et al., (2012), Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 489–500.
- Lohmann D., et al., (1996), A large scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes, *Tellus* (48A), 708-721.
- Lohmann D., et al., (1998a), Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.*, 43(1), 131-141.
- Lowole M.W., (1965), Soil Map of Malawi; Department of Agricultural Research, Lilongwe. Nijssen, B., et al. (1996), Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resour. Res.* 1996.
- Nijssen B., Lettenmaier, D.P. Liang, X., Wetzel, S.W., e Wood, E.F., (1997), Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resour. Res.*, 33, 711-724.
- Pombo, S. M.; Oliveira, R. P. (2010). A Utilização de Informação de Satélite para Colmatar a Escassez de Dados Meteorológicos na Avaliação das Disponibilidades de Água. O Caso de Angola. 11º Congresso da Água, Porto
- SADCC, (1991), *Soil Map*. Draft. Malawi. (Revised legend FAO-Unesco 1988)

Sousa M.C.M., (1971), *Beneficiamento Hidroagrícola do colonato algodoeiro de Murraco*, Cooperativa Agrícola de CAIA, Direcção Provincial de Agricultura e Floresta.

Todini E., (1996), The ARNO rainfall-runoff model, *Journal of Hydrology*, 175, 339-382.

Wihjnhould J.D., (1998), Extended Explanatory Note on the National Soil Map of Mozambique, Scale 1:1 000 000, Part I; Main Report and Annexes, Com. 94a, *Série Terra e Água*, INIA, Maputo.

Wihjnhould J.D., (1998), Extended Explanatory Note on the National Soil Map of Mozambique, Scale 1:1 000 000, Part II. Typifying pedons and Soil analytical data, Com. 96b, *Série Terra e Água*, INIA, Maputo.

World Bank, (2006), *Baseline data on landuse, biodiversity, and hydrology*. GEF - Zambezi Valley Market Led Smallholder Development Project.

Zhao R.J., *et al.*, (1980), The Xinanjiang model. *Hydrological Forecasting (Proceedings Oxford Symposium)*, IASH 129, 351-356.

**ANEXO - DESCRIÇÃO DAS MISSÕES
DE TRABALHO DE CAMPO**

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

VOLUME I – DESCRIÇÃO GERAL DO PROJECTO

Anexo – Descrição das Missões de Trabalho de Campo

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

Anexo – Descrição das Missões de Trabalho de Campo

ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1-1
2 VISITA INICIAL Á ÁREA DE ESTUDO EM FEVEREIRO DE 2012.....	2-1
2.1 INTRODUÇÃO	2-1
2.2 CONTACTOS E ENCONTROS EM MAPUTO.....	2-2
2.2.1 Direcção Nacional de Promoção do Desenvolvimento Rural.....	2-2
2.2.2 Instituto de Investigação Agrária de Moçambique.....	2-3
2.2.3 Direcção Nacional de Águas	2-3
2.2.4 Administração Regional de Águas do Zambeze.....	2-3
2.3 CONTACTOS E ENCONTROS NA ÁREA DE ESTUDO.....	2-4
2.3.1 Introdução.....	2-4
2.3.2 Encontro na Direcção Provincial do Plano e Finanças de Sofala.....	2-4
2.3.3 Visita às bacias hidrográficas e aos distritos da margem esquerda do rio Zambeze.....	2-5
2.3.4 Visita às bacias hidrográficas e aos distritos da margem direita do rio Zambeze	2-9
3 TRABALHO DE CAMPO EM MAIO DE 2012.....	3-1
3.1 INTRODUÇÃO	3-1
3.2 INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA E442 - MOPEIA	3-1
3.3 MEDIÇÕES DE CAUDAL.....	3-1
3.4 TREINO.....	3-3
3.5 VISITA AOS DISTRITOS DE CHEMBA E TAMBARA	3-3
4 TRABALHO DE CAMPO DE OUTUBRO DE 2012	4-1
4.1 INTRODUÇÃO	4-1
4.2 ANÁLISE DO MODELO DE PREVISÃO DE CHEIAS NO ZAMBEZE	4-1
4.3 TREINO.....	4-1
4.4 RECOLHA DE DADOS A NÍVEL DISTRIAL	4-2
5 TRABALHO DE CAMPO DE MARÇO DE 2013.....	5-1

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 2.1 - Vista do rio Lualua para jusante na EN1	2-5
Fotografia 2.2 – Vista do rio Lualua para montante na EN1	2-6
Fotografia 2.3 - Rio Lungozi junto à EN1	2-7
Fotografia 2.4 - Rio Lungozi junto a Mopeia	2-7
Fotografia 2.5 - Abertura de um perfil numa machamba com cultura do milho (Casa Branca) em Mopeia	2-8
Fotografia 2.6 - Abertura de um perfil numa machamba com cultura do amendoim (Casa Branca).....	2-9
Fotografia 2.7 - Rio Zangué junto à EN1	2-10
Fotografia 2.8 - Rio Nhamapaza junto a Subwé	2-11
Fotografia 2.9 - Rio Nhamapaza junto à EN1	2-11
Fotografia 2.10 - Reconhecimento das principais características dos solos (Próximo de Sùbué)	2-12
Fotografia 2.11 - Abertura dum perfil num machamba com a cultura de milho	2-12
Fotografia 3.1 – Medição de caudal na estação E442 – Mopeia no rio Lungozi	3-2
Fotografia 3.2 – Escalas hidrométricas na estação E403 – Mopeia no rioCuácuai.....	3-2
Fotografia 3.3 – Estação E480 – EN1 no rio Lualua	3-2
Fotografia 3.4 – Rio Sangadeze (com poça de água) e rio Pompué (seco).....	3-3
Fotografia 3.5 – Rio Zambeze perto de Tambara.....	3-3

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY) E ELABORAÇÃO DA BASE DE DADOS DIF (DYNAMIC INFORMATION FRAMEWORK)

RELATÓRIO FINAL

Anexo – Descrição das Missões de Trabalho de Campo

1 INTRODUÇÃO

No âmbito do projecto de calibração do modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) foram realizadas várias visitas às entidades responsáveis do sector e à área de estudo. Estas visitas tinham como objectivo a recolha de dados, realizar algumas tarefas no trabalho de campo e efectuar contactos com as principais entidades e com os stakeholders. Neste anexo apresenta-se uma breve descrição das quatro visitas realizadas em Fevereiro de 2012, Maio de 2012, Outubro de 2012 e Março de 2013.

2 VISITA INICIAL À ÁREA DE ESTUDO EM FEVEREIRO DE 2012

2.1 INTRODUÇÃO

Esta visita marcou o início do trabalho do Projecto e decorreu de 12 a 26 de Fevereiro de 2012, com a participação de Eng.º António Alves, Eng.ª Maria João Capelo e Prof. José Raposo da empresa COBA e Prof. Dinis Juízo e Eng.º Francisco Saimone da empresa Salomon. Foram realizados contactos em Maputo com as entidades governamentais do sector da água, da agricultura e do ambiente e na área de estudo com os responsáveis distritais e do governo provincial de Sofala. A área de estudo e os principais distritos foram visitados de modo a obter-se uma visão da área na sua relação com os dados necessários para a modelação hidrológica.

Os contactos e encontros foram preparados conjuntamente com os responsáveis da Direcção Nacional de Promoção do Desenvolvimento Rural (DNPDR) e do Projecto de Desenvolvimento de Pequenos Produtores Orientados para o Mercado no Vale do Zambeze.

Na cidade de Maputo, para além do encontro com a DNPDR, foram realizados encontros e contactos com as seguintes entidades

- Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM);
- Direcção Nacional de Águas (DNA);
- Administração Regional de Águas do Zambeze (ARA-Zambeze).

Na área de estudo foram realizados encontros com as seguintes entidades:

- Direcção Provincial do Plano e Finanças de Sofala;
- ARA-Zambeze, que acompanhou a visita;
- Facilitador Distrital (FD) do Projecto em Mopeia;
- Administração do distrito de Mopeia;
- Facilitador Distrital (FD) do Projecto em Maringué;
- Posto Administrativo de Subwé;
- Administração do distrito de Maringué.

Foram ainda visitadas as seguintes áreas específicas:

- Rio Zambeze em Caia e em Mopeia;
- Rio Cuácuá
- Sub-bacia do rio Zangué e do rio Nhamapaza nas secções de Subwé e EN1;
- Sub-bacia do Lualua;
- Sub-bacia do Mecombeze;
- Sub-bacia de Lungozi;
- Zonas agrícolas para caracterizar o tipo de solo e de cobertura vegetal.

2.2 CONTACTOS E ENCONTROS EM MAPUTO

2.2.1 Direcção Nacional de Promoção do Desenvolvimento Rural

A reunião que deu início aos trabalhos em Moçambique ocorreu com os representantes da Direcção Nacional de Promoção do Desenvolvimento Rural, no dia 15 de Fevereiro de 2012 nas instalações da DNPDR em Maputo.

Da parte da DNPDR estiveram presentes a Dr.^a Sandra Bebe, Oficial Nacional de Procurement do “Projecto Smallholders” atrás referido, o Dr. Alfredo Ricardo Zunguze responsável do Projecto para a área do ambiente (apoiada financeiramente pelo GEF/Fundo Global para o Meio Ambiente) e o Eng. Distino Chiare, Coordenador de Operações no Terreno (COT) e responsável pela componente 2 do Projecto - “Desenvolvimento da Produção e da Comercialização Agrícola”. Da parte da Coba participaram os técnicos António Alves, Maria João Calejo e José Raposo e da parte da Salomon, os técnicos Dinis Juizo e Francisco Saimone.

Este encontro tinha como principais objectivos: a apresentação da equipa de estudo à DNPDR; o enquadramento do estudo “*Calibração do Modelo Hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) e elaboração do DIF (Dynamic Information Framework)*” no “Projecto de Desenvolvimento de Pequenos Produtores Orientados para o Mercado no Vale do Zambeze (SMALLHOLDER)”; a discussão dos objectivos a atingir e o seu enquadramento com o Projecto; a articulação e envolvimento da equipa do estudo com a ARA-Zambeze; a identificação de condicionantes e de medidas de mitigação; planificação dos contactos a estabelecer com as outras entidades interessadas (stakeholders); a visita à área de estudo e a recolha da informação.

Após apresentação da equipa que desenvolverá o estudo, a Dra. Sandra fez um enquadramento geral do Projecto de Desenvolvimento de Pequenos Produtores Orientados para o Mercado no Vale do Zambeze, que teve início em Maio de 2007. O projecto é financiado pela Agência Internacional de Desenvolvimento (IDA) e pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF) e tem como grande objectivo aumentar o rendimento dos pequenos produtores nos distritos seleccionados da região do Vale do Zambeze, através da mobilização das organizações de base comunitária; no apoio à produção (financiamento, assistência técnica e comercialização e agro-processamento), e no fortalecimento da capacidade das instituições locais num contexto de ampla descentralização. A componente ambiental apoiada pelo GEF está ligada a actividades relativas a degradação dos solos, biodiversidade e mudanças climáticas. O principal objectivo da componente ambiental é a sustentabilidade ambiental das medidas promotoras do desenvolvimento dos pequenos agricultores.

Este projecto é da responsabilidade da DNPDR mas tem fortes ligações com o Ministério da Agricultura e com o Ministério do Ambiente. Para implementação do Projecto, o DNPDR tem 13 pessoas contratadas no terreno e distribuídas pelas duas grandes áreas de actuação: a agricultura e o ambiente, coordenadas no campo respectivamente por Distino Chiare e Alfredo Zunguze. O Gestor do Projecto é o Sr. José Caravela, que não pode participar por estar na mesma hora numa reunião com organizações governamentais.

O estudo “*Calibração do Modelo Hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) e elaboração do DIF (Dynamic Information Framework)*” é parte da componente ambiental, sendo financiado pelo GEF. No final do estudo, o modelo VIC e o respectivo DIF ficarão instalados na ARA-Zambeze. Esta entidade irá colaborar no processo de obtenção de dados para calibração do modelo VIC. A DNPDR esclareceu que o Projecto tem uma verba prevista para suportar os custos da colaboração da ARA-Zambeze no estudo de calibração do modelo VIC.

O presente estudo irá compilar a informação obtida e analisada no âmbito do “*Baseline data on Landuse, biodiversity, and hydrology*”. A DNPDR forneceu o DIF, que foi desenvolvido no âmbito deste estudo preliminar.

2.2.2 Instituto de Investigação Agrária de Moçambique

O encontro com IIAM realizou-se no dia 16 de Fevereiro de 2012 no sector de Solos da Direcção de Agronomia e Recursos Naturais (DARN) e contou com a participação do Eng. Jacinto Mafalacusser. Este encontro para além de proporcionar o envolvimento do IIAM no estudo, permitiu a análise conjunta da metodologia que se propõe seguir para a obtenção dos parâmetros de solos exigidos pelo modelo VIC. Esta análise permitiu concluir que a carta de solos da província do Zambeze e os dados dos perfis de solos característicos das unidades de solo presentes na área de estudo constituem a informação de base para dedução dos parâmetros pedidos pelo modelo.

Este encontro permitiu também a troca de impressões sobre o trabalho realizado anteriormente no âmbito de uma primeira fase e que também contou com a colaboração do IIAM nomeadamente na realização dos Transects realizados para avaliação da biodiversidade que incluíram também a realização de sondagens com a recolha de amostras de solo para análise laboratorial no IIAM em Maputo, a classificação do solo no campo de acordo com taxonomia proposta pela USDA e a realização de ensaios de infiltração usando um infiltrómetro modificado.

2.2.3 Direcção Nacional de Águas

O encontro com a DNA realizou-se no dia 17 de Fevereiro de 2012 na sede da DNA em Maputo. Este encontro contou com a participação da Eng^a. Susana Loforte - Directora Nacional, do Eng. Hélio Banze - Director Nacional Adjunto, Eng^a. Ana Isabel Fotime - Directora Interina do Departamento de Gestão dos Recursos Hídricos (DGRH), Eng. Ronaldo Huguare – Responsável pelo Gabinete dos Rios Internacionais (GRI), Eng^a. Rute Nhamundo do DGRH, Eng. Isac Filimone do sector de hidrometia do DGRH e do Eng. Egídio Gouvane do DGRH.

Da DNPDR estiveram presentes o Director Nacional Adjunto Sr. Olegário Banze e o Sr. Alfredo Zunguze.

O Director Nacional Adjunto da DNPDR fez uma descrição geral do “Projecto de Desenvolvimento de Pequenos Produtores Orientados para o Mercado no Vale do Zambeze” e identificou os objectivos atingir e a importância do presente estudo “*Calibração do Modelo Hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity) e elaboração do DIF (Dynamic Information Framework)*” na identificação dos impactos dos vários cenários de desenvolvimento agrícola no regime dos rios que drenam os distritos da área de estudo. Foi realçada a intervenção da ARA-Zambeze a quem será entregue no final os resultados do estudo relativo ao modelo VIC e o DIF.

Os aspectos mais específicos do estudo que será desenvolvido foram apresentados pelo “Team Leader” Dinis Juízo e por António Alves.

Os técnicos da DNA colocaram algumas questões relativamente às relações do modelo VIC com os modelos utilizados na ARA-Zambeze, nomeadamente com o MIKE 11; ao papel da ARA-Zambeze no Estudo; à possibilidade de utilização do modelo para à identificação das áreas de inundação e sobre a definição da área de estudo (distritos de Chemba, Maringué, Mopeia, Morrumbala, Mutarara e Caia). A todas as questões levantadas foram prestados esclarecimentos.

2.2.4 Administração Regional de Águas do Zambeze

O encontro com a ARA-Zambeze realizou-se no dia 18 de Fevereiro de 2012 e contou a participação da Eng^a Cacilda Machava - Directora Geral da ARA- Zambeze, da Eng^a Isabel Cossa – Chefe do Departamento de Economia Rural da DNPDR e do Dr. Alfredo Ricardo Zunguze.

O encontro com ARA-Zambeze tinha como principal objectivo a concertação de esforços no sentido de se obter caudais nos principais rios da área de estudo, necessários para calibrar o modelo VIC. Foi referido que se deveria utilizar ainda esta época de chuvas para realizar algumas medições de caudais nos locais previstos para calibrar o modelo, nomeadamente no rio Lualua e no rio Lungozi na margem esquerda do Zambeze e possivelmente no rio Zangué ou no rio Nhamapaza na margem direita do Zambeze.

A Sr.^a Directora informou que os técnicos da ARA-Zambeze Carlos Rego e Pechisso se encontravam na Vila de Caia para fazer uma medição de caudais no Rio Zambeze no Caia e que acompanhariam a visita ao campo e iriam também realizar as primeiras medições de caudais, usando o micromolinetete que foi transportado da sede da ARA-Zambeze em Tete.

Foi destacado na reunião que para calibrar o modelo VIC é fundamental ter caudais nos locais de calibração do modelo e para isso é necessário efectuar medições de caudais em número suficiente para se obter as curvas de vazão. Neste sentido é necessário que no escritório da ARA-Zambeze no Caia esteja sempre um aparelho para medir caudais nos rios. Como a ARA-Zambeze apenas tem um aparelho destes, ficou definido que através do apoio financeiro do “Projecto Smallholders” à ARA-Zambeze, iria ser comprado um equipamento para ficar sediado em Caia. Enquanto não se faz a aquisição deste aparelho, deveria ser negociado o empréstimo de um aparelho da ARA-Centro para estas funções.

2.3 CONTACTOS E ENCONTROS NA ÁREA DE ESTUDO

2.3.1 Introdução

A visita à área de estudo decorreu entre os dias 20 e 23 de Fevereiro. A visita foi planeada conjuntamente com a DNPDR e contou com a presença ao longo de todo o tempo do Dr. Alfredo Zunguze, cuja participação na visita de estudo foi fundamental na facilitação dos contactos com as várias entidades locais, permitindo também uma intensiva e frutuosa troca de impressões ao longo de toda a visita.

A visita efectuada à área de estudo privilegiou o reconhecimento dos rios quer da margem esquerda quer da margem direita do rio Zambeze, com vista à identificação das bacias para as quais será feita a calibração do modelo, o reconhecimento dos principais usos e cobertura da terra, e o reconhecimento das características dos solos.

Para além do reconhecimento da área estudo, foram efectuados contactos com os diversos “stakeholders”. Na Beira houve uma reunião com a Directora Provincial do Plano e Finanças, com o Secretário Permanente do Distrito de Mopeia, com o Administrador do distrito de Maringué e com o secretário do Posto Administrativo de Subwé.

2.3.2 Encontro na Direcção Provincial do Plano e Finanças de Sofala

A visita à área de estudo iniciou-se com um encontro com a Sr.^a Directora Provincial do Plano e Finanças da Província de Sofala, na cidade da Beira. Neste encontro foi feita uma breve apresentação do projecto e do estudo a desenvolver, da equipa de trabalho responsável pelo trabalho e dos grandes objectivos da visita à área de estudo: contacto com os stakeholders, reconhecimento de campo e preparação da revisão da metodologia inicialmente proposta.

A importância dos estudos e projectos que permitam reduzir/combater a pobreza e garantir a sustentabilidade do ambiente foi realçada pela Sr.^a directora provincial.

2.3.3 Visita às bacias hidrográficas e aos distritos da margem esquerda do rio Zambeze

A visita efectuada às bacias da margem direita rio Zambeze teve como objectivo principal a selecção da(s) sub-bacia(s) a utilizar no processo de calibração assim como o reconhecimento dos usos e cobertura da terra e características dos solos dominantes na área de estudo.

No início da visita foi efectuada um primeiro encontro com uma brigada da ARA-Zambeze, constituída pelos técnicos Carlos Rego e Pechisso, que se encontrava no Caia para realizar medições de caudal no rio Zambeze e no rio Chire. Este encontro, no seguimento dos contactos efectuados com a Sr.^a Directora Geral da ARA-Zambeze, permitiu a concertação de esforços e a identificação dos principais problemas para a obtenção das curvas de vazão para calcular os caudais necessários para a calibração do modelo.

O trabalho de campo foi feito fundamentalmente no rio Lualua junto à EN1 (Fotografia 2.1 **Error! Reference source not found.** e Fotografia 2.2) e no rio Lungozi junto à EN1 (Fotografia 2.3) e junto a Mopeia (Fotografia 2.4), tendo-se visitado também os rios Mutiade e Mecombeze.

No rio Lualua junto à EN1 houve a oportunidade de visitar a estação hidrométrica tendo-se constatado que a escala para medição níveis baixos se encontra danificada obrigando o leitor da estação a inferir as leituras. Esta deficiência foi relatada à ARA-Zambeze no sentido de se proceder com a brevidade possível à substituição da escala. Houve ainda a oportunidade de trocar impressões com o leitor da estação, motivando-o para a importância dos dados desta estação e informando-o sobre o objectivos do Projecto.



Fotografia 2.1 - Vista do rio Lualua para jusante na EN1



Fotografia 2.2 – Vista do rio Lualua para montante na EN1

A visita efectuada revelou que esta sub-bacia reúne as condições necessárias para ser utilizada na calibração do modelo. Devendo para tal proceder-se à realização de medições de caudal para cálculo da curva de vazão tanto em Lualua na secção do rio junto à Estrada Nacional, como na estação hidrométrica de Derre. Este trabalho terá de decorrer durante o ano de 2012 e até ao fim da época de chuvas de 2013, para permitir gerar caudais diários e assim possibilitar a calibração do modelo VIC.

O rio Lungozi foi também visitado de modo a verificar a possibilidade de ser utilizado na calibração do modelo VIC. Para este efeito seria necessário instalar uma estação hidrométrica, que poderia ficar localizada na secção da estrada EN1 (Fotografia 2.3) ou numa secção perto de Mopeia (Fotografia 2.4), tendo-se optado por esta última.



Fotografia 2.3 - Rio Lungozi junto à EN1



Fotografia 2.4 - Rio Lungozi junto a Mopeia

Como já foi referido a visita a área de estudo tinha também como objectivos o reconhecimento dos usos e cobertura da terra e das unidades de solos dominantes. Neste âmbito foram abertos dois pequenos perfis: um numa área cultivada com milho (Fotografia 2.5) e outro com a cultura do amendoim (Fotografia 2.6) na Casa Branca.



Fotografia 2.5 - Abertura de um perfil numa machamba com cultura do milho (Casa Branca) em Mopeia

Na visita ao distrito de Mopeia houve ainda a oportunidade de trocar impressões com o Sr. Secretário Permanente do Distrito de Mopeia (João Pedro) que manifestou a total disponibilidade do Governo do Distrito em tudo o que possa colaborar.

Ao Facilitador Distrital (Eng. Labiano) foram solicitados os dados existentes no distrito relativamente às áreas cultivadas e a produtividade das principais culturas para o período 2006-2011, assim como os planos de desenvolvimento e ordenamento previstos para o Distrito de Mopeia. Estes dados são fundamentais a definição dos cenários de uso e ocupação das terras.



Fotografia 2.6 - Abertura de um perfil numa machamba com cultura do amendoim (Casa Branca)

2.3.4 Visita às bacias hidrográficas e aos distritos da margem direita do rio Zambeze

No reconhecimento efectuado aos afluentes da margem direita do rio Zambeze, foram visitados os rios Zangué (Fotografia 2.7) e Nhamapaza (Fotografia 2.8 e Fotografia 2.9), tendo-se verificado que se trata de rios de regime torrencial, com caudais apenas em situação de grandes chuvadas e sem caudais permanentes na época húmida. Esta contestação levou a desistir de instalar estações hidrométricas nesta zona.

Esta visita foi realizada conjuntamente com os técnicos da ARA-Zambeze, Carlos Rego e Pechisso, responsáveis pela medição de caudais.



Fotografia 2.7 - Rio Zangué junto à EN1



Fotografia 2.8 - Rio Nhamapaza junto a Subwé



Fotografia 2.9 - Rio Nhamapaza junto à EN1

No âmbito do trabalho de reconhecimento dos solos foram abertos dois perfis: o primeiro junto à localidade de Subwé numa parcela não cultivada ocupada com mato e o segundo numa machamba com a cultura do milho.

O primeiro perfil com uma profundidade relativamente pequena tinha como objectivo principal apenas o reconhecimento da textura do solo (Fotografia 2.10).



Fotografia 2.10 - Reconhecimento das principais características dos solos (Próximo de Subwé)



Fotografia 2.11 - Abertura dum perfil num machamba com a cultura de milho

No segundo perfil, com 1,50 m de profundidade, para além da descrição sumária no campo dos horizontes e do reconhecimento da textura procedeu-se à recolha de amostras de solo para determinação laboratorial da textura, pH, carbono orgânico total, fósforo e potássio extraíveis, bases de troca e capacidade de troca catiónica.

Na vista ao distrito de Maringué houve ainda a oportunidade de trocar impressões com o Sr. Administrador do Distrito. Ao Facilitador Distrital do Projecto (Eng. Abel Joia) foram solicitados os registos existentes no distrito das áreas cultivadas e produtividades das principais culturas para o período 2006-2011.

3 TRABALHO DE CAMPO EM MAIO DE 2012

3.1 INTRODUÇÃO

Esta visita decorreu entre 16 e 29 de Maio de 2012 e teve como principais objectivos, para além de instalar a estação E442 – Mopeia no rio Lungozi, realizar medições de caudal, e recolher dados na ARA-Zambeze em Tete. Teve a participação de Eng.º António Alves da empresa COBA e Eng.º Francisco Saimone da empresa Salomon.

Foi feita a recolha exaustiva de todos os dados relativos aos caudais na área de estudo, com particular atenção para os dados registados nas estações hidrométricas E101, E288, E289, E291, E298, E299, E403, E405, E442 e E480. Foram recolhidos dados desde o início do funcionamento de cada estação até aos dias de hoje. Verifica-se que entre 1982 e 1995, as estações indicadas estiveram na generalidade inoperacionais.

Foram recolhidos dados de alturas hidrométricas, medições de caudais e curvas de vazão. Estes dados vão ser alvo de estudo aprofundado de modo a permitir calcular os caudais médios diários que serão usados na calibração do modelo ZambezeVIC. Foi feita uma visita aos distritos da margem direita do Zambeze, que não foram visitados na primeira visita.

3.2 INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA E442 - MOPEIA

Foi instalada pela ARA-Zambeze a estação E442 – Mopeia no Rio Lungozi, com a montagem de escalas hidrométricas, a contratação e treino do leitor, de modo a que o registo das alturas hidrométricas seja executado com qualidade.

As estações hidrométricas actualmente em operação (E101 – Derre e E480 – EN1 no rio Lualua e E403 – Mopeia no rio Cuácua) foram revistas, de modo a resolver os problemas existentes e repor os equipamentos em falta. Os leitores foram motivados para se envolverem com maior qualidade no trabalho e não registarem falhas nas leituras.

Foi verificado, nas visitas às bacias hidrográficas dos rios Mepuze, Sangadeze, Pompué e Muira, o que já se tinha observado na bacia hidrográfica do rio Zangué, da impossibilidade de efectuar medições de caudais, pois estes rios só registam caudais em resposta a chuvadas intensas, permanecendo secos na maior parte do tempo, permitindo constatar que não tem sentido instalar estações hidrométricas nestes rios para fornecer dados de caudais para calibrar o modelo ZambezeVIC. É de referir que segundo o Eng.º Malaze, as características de rios torrenciais são comuns à maioria das pequenas bacias hidrográficas da margem direita do rio Zambeze.

3.3 MEDIÇÕES DE CAUDAL

Em Maio de 2012 foi realizada uma medição de caudal em cada uma das quatro estações atrás referidas. Na estação E442 no rio Lungozi foi realizada mais uma medição de caudal. Estes dados foram tratados e analisados e os resultados comparados com as medições históricas existentes.

Foram recolhidas todas as medições de caudal históricas realizadas nestas quatro estações. Estes dados irão permitir apoiar a definição de uma curva de vazão actual para cada estação, em complemento às medições recentemente realizadas e às que estão previstas efectuar até ao fim da próxima época chuvosa.



Fotografia 3.1 – Medição de caudal na estação E442 – Mopeia no rio Lungozi



Fotografia 3.2 – Escalas hidrométricas na estação E403 – Mopeia no rio Cuácua



Fotografia 3.3 – Estação E480 – EN1 no rio Lualua

3.4 TREINO

Durante o trabalho de campo na área de estudo e na sede da ARA-Zambeze, para além da recolha de dados e análise dos sistemas informáticos em uso, teve-se a preocupação de analisar os procedimentos em curso, tanto nas medições de caudal no campo, como no trabalho em gabinete, de modo a reforçar a qualidade do trabalho realizado, controlar os erros e agilizar os procedimentos.

Foi analisado o sistema em uso para previsão dos caudais de cheia no rio Zambeze e analisado o sistema de entrada de dados.

3.5 VISITA AOS DISTRITOS DE CHEMBA E TAMBARA

A viagem de Caia a Tete foi efectuada de carro pela margem direita do rio Zambeze, permitindo analisar os principais afluentes da margem direita do Zambeze de Caia a Tambara. No mês de Maio, que corresponde ao início da época seca, apresentava os vários rios por onde passamos secos ou apenas com algumas poças de água como se pode ver nas fotografias seguintes para os rios Sangadeze e Pompué.



Fotografia 3.4 – Rio Sangadeze (com poça de água) e rio Pompué (seco)



Fotografia 3.5 – Rio Zambeze perto de Tambara

Como se pode observar o rio Pompué está completamente seco e é só areia e perto da confluência do rio Pompué, o rio Zambeze é como se vê.

4 TRABALHO DE CAMPO DE OUTUBRO DE 2012

4.1 INTRODUÇÃO

Esta visita decorreu de 17 de Outubro a 1 de Novembro de 2013, teve com principal objectivo a continuação da recolha e tratamento de dados tanto em Maputo como em Tete, a realização de algumas acções de formação e análise do modelo de previsão de cheias existente para o rio Zambeze. Teve a participação de Eng.º António Alves, Eng.ª Maria João Capelo da empresa COBA e Prof. Dinis Juizo e Eng.º Francisco Saimone da empresa Salomon.

Foram realizadas algumas medições de caudal entre Outubro de 2012 e Janeiro de 2013, mas que são ainda insuficientes para a definição das curvas de vazão e conseqüentemente para fornecer caudais para a calibração do modelo VIC, pelo que se reforçou junto da ARA-Zambeze, a necessidade de ter pelo menos mais duas medições em Fevereiro e mais duas em Março, em cada uma das estações principais (E101, E442, E480). De 27 a 30 de Outubro a equipa do projecto acompanhou a equipa da ARA-Zambeze na medição de caudais nas estações E101 e E480, pois na estação E442, o rio Lungozi mantinha-se ainda seco.

4.2 ANÁLISE DO MODELO DE PREVISÃO DE CHEIAS NO ZAMBEZE

Foi analisado detalhadamente o programa utilizado na ARA-Zambeze para a previsão dos caudais de cheia no rio Zambeze e analisado o sistema de entrada de dados e saída de resultados, de modo a verificar a compatibilização entre os dois modelos. No entanto, como estes dois modelos têm funcionalidades bem diferentes, baseiam-se por isso em concepções igualmente bem diferentes.

O modelo de previsão de cheias é para execução em tempo real, de modo a dar informação antecipada dos eventos de cheias que possam ocorrer no rio Zambeze. O modelo VIC é um modelo contínuo para ser executado durante vários anos, com o objectivo de prever alterações ao regime actual dos caudais que possam ser provocados por alterações climáticas ou alterações de uso do solo. Por isso não tem sentido a sua ligação, pois um modelo é para simular períodos curta duração e execução em tempo real e outro é um modelo de planeamento, aplicado para simular períodos longos que permitam representar a realidade hidrológica actual ou futura de uma região ou de uma bacia.

4.3 TREINO

De 23 a 26 de Outubro de 2012 foram efectuadas algumas acções de formação de modo a introduzir o modelo VIC e preparar os técnicos para o curso a ser realizado sobre o VIC e o DIF. Durante este período participou também nos trabalhos o Dr. Alfredo Zunguze do Projecto “Smallholders” do Banco Mundial

A acção de formação incluiu a apresentação dos seguintes temas directamente relacionados com o Projecto:

- Modelação Hidrológica de modo genérico;
- Modelo VIC e Modelo Routing;
- Dados de base necessários:
 - Modelo digital do terreno;
 - Solos

- Coberto vegetal e uso da terra
- Precipitação
- Temperatura máxima e mínima do ar
- Velocidade média diária do vento
- Caudal
- Esquematização do Modelo do VIC
- Corrida do modelo VIC e resultados
- Corrida do modelo Routing e hidrograma de saída
- Medição de caudais e curvas de vazão

4.4 RECOLHA DE DADOS A NÍVEL DISTRITAL

A equipa de projecto acompanhada pelo responsável do Projecto “Smallholders” do Banco Mundial, Dr. Alfredo Zunguze recolheu vários elementos sobre a actividade agrícola nos vários distritos da área de estudo, tendo contactado directamente com responsáveis dos distritos de Morrumbala e Caia. Foram obtidos cópias dos Planos Estratégicos de Desenvolvimento dos Distritos e outros documentos similares. Contactou-se igualmente com a ONG italiana que está a desenvolver planos de uso da terra no distrito de Caia, que gentilmente nos forneceu os dados em formato digital. Estes dados juntamente com os dados recolhidos em Maputo sobre a zonagem agro-ecológica irá permitir definir com maior detalhe a situação actual da cobertura vegetal e o uso da terra e preparar a definição de cenários futuros.

5 TRABALHO DE CAMPO DE MARÇO DE 2013

Esta visita decorreu de 3 a 11 de Março de 2013 e concentrou a sua atenção na recolha e revisão dos dados anteriormente recolhidos de precipitação e alturas hidrométricas face às várias falhas encontradas. As principais entidades envolvidas foram a ARA-Zambeze em Tete e a Direcção Nacional de Águas em Maputo. Os dados em formato digital foram comparados com os documentos originais e com as cadernetas usadas em cada estação tanto para os dados de precipitação como para os dados de alturas. Participaram neste visita o Eng.º António Alves da COBA e Eng.º Grishal da Salomon.