

ANEXO I

Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas na Bacia Hidrográfica

Modelo de Simulação
Hidrológica da Bacia do
Rio Araguari



Rua Coronel José Cardoso, 90
Sobreloja - Centro
Monte Carmelo - MG
CEP: 38 500 - 000
montepplan@montepplan.com.br

ÍNDICE

1 – O Modelo Chuva-Vazão.....	06
1.1 – Cálculo da chuva efetiva.....	06
1.1.1 – Introdução.....	06
1.1.2 - Formação do escoamento.....	07
1.1.3 – Volume de escoamento.....	08
1.1.4 – Escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo.....	11
1.1.5 - Afluxos à rede de drenagem.....	14
1.1.6 – Evapotranspiração.....	15
1.1.7 – Resumo dos parâmetros do modelo Xinanjiang.....	16
1.2 – Concentração.....	19
2 – DADOS PARA A APLICAÇÃO DO MODELO.....	23
2.1 – Introdução.....	23
2.2 – Estações selecionadas.....	23
2.3 – Resultados da calibração.....	30
2.3.1 – Resultados gerais.....	30
2.3.2 – Resultados para a bacia do rio Quebra Anzol.....	32
2.3.3 – Resultados para a bacia do alto Araguari.....	36
2.3.4 – Resultados para a bacia do baixo Araguari.....	38
2.4 – Recomendações.....	40
3 – O SOFTWARE.....	41
3.1 – Introdução.....	41
3.2 – Módulo global.....	43
3.2.1 – Características principais.....	43

3.2.2 – Procedimentos para a simulação.....	45
3.2.3 – Resultados da simulação.....	48
3.3 – Módulo sub-bacia.....	50
3.4 – Módulo de atualização.....	50
4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I – Localização da bacia e principais mananciais.....	54
ANEXO II – Estações pluviométricas operadas pela ANA.....	55
ANEXO III – Estações pluviométricas operadas pela CEMIG.....	56
ANEXO IV – Estações pluviométricas operadas por DNAEE-MG e INMET....	57
ANEXO V – Estações fluviométricas operadas pela ANA.....	58
ANEXO VI – Estações fluviométricas operadas pela CEMIG.....	59
ANEXO VII – Divisão da bacia do rio Araguari.....	60
Cópia digital do Documento.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do modelo utilizado.....	06
Figura 2 – Distribuição espacial da capacidade de tensão da água do solo....	09
Figura 3 – Distribuição espacial da capacidade de água livre.....	12
Figura 4 – Vazões simuladas versus vazões observadas para a bacia do rio Quebra Anzol.....	33
Figura 5 – Vazões simuladas <i>versus</i> vazões observadas para a bacia do rio Araguari (montante).....	36
Figura 6 – Vazões simuladas <i>versus</i> vazões observadas para a bacia do rio Araguari (jusante).....	38
Figura 7 – Tela principal do modelo global.....	43
Figura 8 – Bacia selecionada.....	44
Figura 9 – Tela do menu “Dados”.....	45
Figura 10 – Exemplo de entrada de dados.....	46
Figura 11 – Exemplo de dados preenchidos.....	47
Figura 12 – Tela de espera do programa.....	47
Figura 13 – Tela de resultados.....	48
Figura 14 – Tela principal do módulo de atualização.....	51
Figura 15 – Entrada de dados para a atualização.....	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estações pluviométricas de responsabilidade da ANA.....	24
Tabela 2 – Estações pluviométricas de responsabilidade da CEMIG.....	25
Tabela 3 – Estações pluviométricas de responsabilidade de outras Instituições.....	25
Tabela 4 – Estações fluviométricas de responsabilidade da ANA.....	27
Tabela 5 – Estações fluviométricas de responsabilidade da CEMIG.....	28
Tabela 6 – Regiões Analisadas.....	30
Tabela 7 - Estatísticas da vazão simulada para a bacia do rio Quebra Anzol.....	35
Tabela 8 – Parâmetros calibrados para a bacia do rio Quebra Anzol.....	35
Tabela 9 - Estatísticas da vazão simulada para a bacia do rio Araguari (Montante).....	37
Tabela 10 – Parâmetros calibrados para a bacia do rio Araguari (Montante).....	37
Tabela 11 - Estatísticas da vazão simulada para a bacia do rio Araguari (Jusante).....	39
Tabela 12 – Parâmetros calibrados para a bacia do rio Araguari (Jusante).....	39

Figura 1 – Fluxograma do modelo utilizado

A descrição a seguir detalha cada parte da formação do escoamento superficial mostrado na figura 1. A descrição é uma adaptação da metodologia descrita em Naghettini et al. (2002, 2006).

1.1.2 - Formação do escoamento

Em áreas úmidas e semi-úmidas, pode-se admitir que a intensidade de uma precipitação não representa o fator mais importante para se determinar o volume de escoamento superficial. Este irá depender particularmente da umidade inicial presente no solo e do volume de precipitação. No modelo Xinanjiang, a formação do escoamento se limita às situações em que é superado o volume máximo de armazenamento de umidade do solo. Em outras palavras, não haverá escoamento antes que a umidade do solo da zona aerada alcance a capacidade de campo ou retenção específica. Depois de alcançá-la, todo o volume precipitado, a menos da evapotranspiração, converte-se em escoamento.

Para uma dada amostra de solo, pode-se escrever o balanço hídrico da seguinte forma:

- antes de atingir a capacidade de campo

$$P - E = WC_2 - WC_1 \quad (1)$$

- depois de atingir a capacidade de campo

$$P - E - R = WM - WC_1 \quad (2)$$

sendo,

P: precipitação;

E: evapotranspiração;

R: escoamento;

WM: capacidade de campo;

WC2, WC1: conteúdo de umidade do solo ao início e ao final do intervalo de tempo.

A capacidade de campo é o conteúdo de umidade que uma dada amostra de solo teria, depois de haver completado a drenagem do excesso de água gravitacional. A capacidade de campo representa um nível relativamente baixo de umidade presente no solo, representando um limite inferior do ponto de vista de formação do escoamento e da perda por evapotranspiração. Dentro da estrutura conceitual do modelo Xinanjiang, a parte da capacidade de campo que se pode eliminar por meio da evapotranspiração é denominada de capacidade de retenção específica da água ou simplesmente capacidade de tensão capilar da água do solo. Representa o déficit máximo da umidade do solo para a evapotranspiração. Logo, WM, WC1 e WC2 representam respectivamente a capacidade de tensão e os conteúdos de umidade capilar em seus respectivos intervalos de tempo.

1.1.3 – Volume de escoamento

As equações 1 e 2 representam os balanços de umidade em um ponto. Ao modelar uma bacia, deve-se ter em conta a distribuição espacial da capacidade de tensão capilar da água, uma vez que a mesma não é uniforme. Utiliza-se aqui uma curva paramétrica para a distribuição espacial da capacidade de água de tensão tal como tipificada na figura 2. Nesta figura, as ordenadas representam a capacidade de tensão pontual W_m' e as abscissas denotam a fração f (da área total F da sub-bacia) em que a capacidade de tensão é menor ou igual W_m' , sendo IMP a razão correspondente à área impermeável.

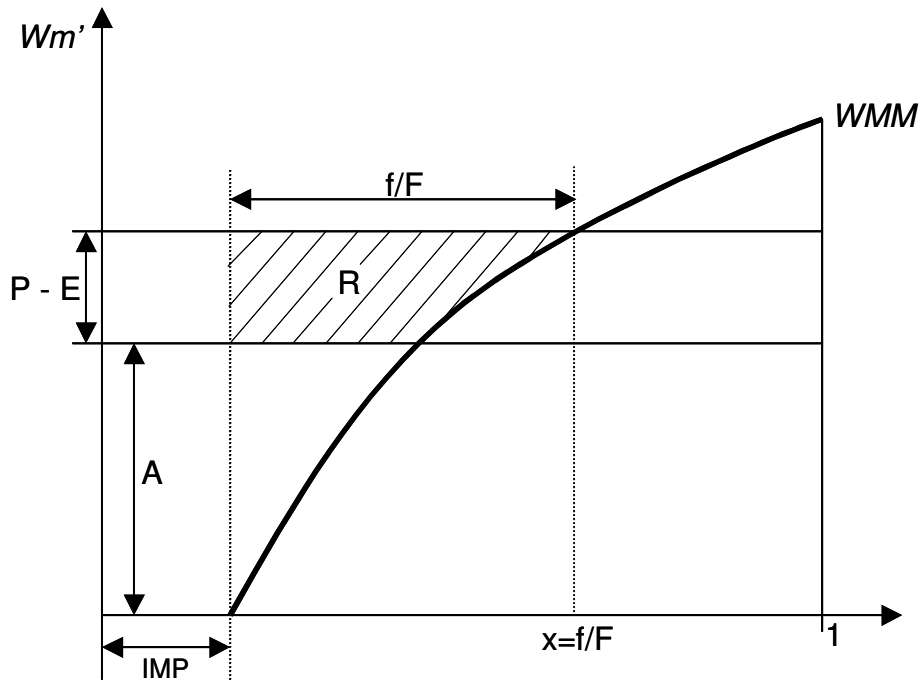


Figura 2 – Distribuição espacial da capacidade de tensão da água do solo

O escoamento somente ocorrerá nas áreas onde o conteúdo de umidade do solo alcançar a capacidade de tensão capilar. Neste caso, a equação do balanço hídrico torna-se:

$$P - E - R = WC_2 - WC_1 \quad (3)$$

sendo,

WC1 e WC2: conteúdos médios espaciais de umidade capilar ao início e ao final do intervalo de tempo.

Pode-se ilustrar o emprego da curva de capacidade de tensão capilar a partir da Figura 2. De fato, pode-se expressar essa curva pela seguinte função do b-ézimo grau:

$$\frac{f}{F} = (1 - IMP) \left[1 - \left(1 - \frac{Wm'}{WMM} \right)^B \right] + IMP \quad (4)$$

Se $IMP = 0$, a Equação 4 torna-se

$$\frac{f}{F} = \left[1 - \left(1 - \frac{Wm'}{WMM} \right)^B \right] \quad (5)$$

sendo,

WMM: máxima capacidade de tensão capilar pontual, na bacia em análise.

De acordo com esse raciocínio, a capacidade de tensão média espacial pode ser dada por:

$$WM = \int_0^1 Wm' d\left(\frac{f}{F}\right) = \frac{WMM(1 - IMP)}{1 + B} \quad (6)$$

A ordenada correspondente à umidade inicial do solo WC1 é dada por:

$$A = WM \left[1 - \left(1 - \frac{WC_1}{WM} \right)^{\frac{1}{1+B}} \right] \quad (7)$$

Se a precipitação é menor do que a evapotranspiração, ou seja se $P - E \leq 0$, não ocorrerá nenhum escoamento ou $R = 0$. Caso contrário, se $P - E + A \leq WMM$, então

$$R = P - E - WM + WM \left[1 - \left(\frac{P - E + A}{WMM} \right)^{1+B} \right] \quad (8)$$

ou, se $P - E + A > WMM$, então

$$R = P - E - WM + WC_1 \quad (9)$$

Uma dedução das equações anteriores, e uma característica importante desse modelo, é dada por

$$\frac{dR}{d(P - E)} = 1 - \left(1 - \frac{Wm'}{WMM} \right)^B = \frac{f}{F} \quad (10)$$

Dessa forma, torna-se fácil compreender que a área geradora do escoamento (f/F) é igual a $(P - E)$, não havendo escoamento adicional no resto da área.

1.1.4 – Escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo

O escoamento ocorre em pontos da bacia onde a umidade do solo atinge a capacidade de tensão capilar. Pode-se dividir o escoamento em três tipos: superficial, sub-superficial e subterrâneo. O primeiro ocorre depois que a umidade do solo atinge o máximo armazenamento de água gravitacional ou livre. A água livre é definida como qualquer suprimento adicional, acima da capacidade de campo. Evidentemente, o escoamento proveniente das áreas impermeáveis é sempre superficial e calcula-se por

$$RB = IMP(P - E) \quad (11)$$

Sendo RB o escoamento das áreas impermeáveis para $P - E > 0$.

Para as áreas permeáveis, o cálculo do escoamento superficial é realizado por meio da curva de distribuição espacial da capacidade de água livre. De modo similar à água capilar, a curva de distribuição da capacidade de água livre pode ser expressa por

$$\frac{f}{F} = 1 - \left(1 - \frac{SM}{SMM} \right)^{EX} \quad (12)$$

onde EX denota o seu grau de não uniformidade. A figura 3 ilustra a forma dada pela equação 12.

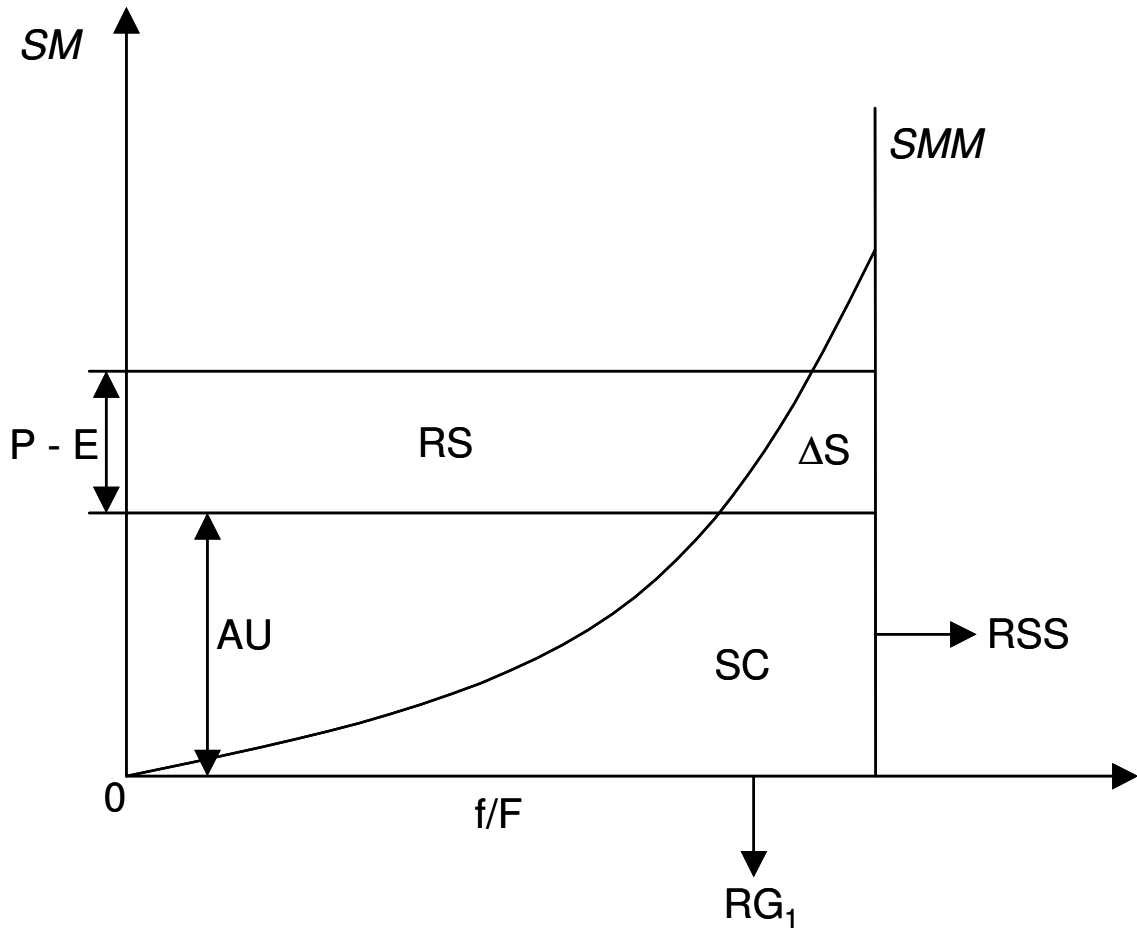


Figura 3 – Distribuição espacial da capacidade de água livre

A ordenada da umidade livre inicial é dada por

$$AU = SMM \left[1 - \left(1 - \frac{SC}{SM} \right)^{\frac{1}{1+EX}} \right] \quad (13)$$

sendo válida a seguinte relação entre capacidade máxima pontual SMM e a média espacial SM:

$$SMM = SM(1 + EX) \quad (14)$$

De acordo com as equações 12 a 14, o volume de escoamento superficial pode ser calculado pelas seguintes expressões:

se $P - E + A < SMM$,

$$RS = \left\{ P - E - SM + SC + SM \left[1 - \frac{(P - E + AU)}{SMM} \right]^{1+EX} \right\} FRC \quad (15)$$

se $P - E + A \geq WMM$,

$$RS = \{P - E - SM + SC + SM\} FRC \quad (16)$$

sendo,

RS: escoamento superficial;

SC: conteúdo de água livre ou gravitacional;

FRC: área geradora do escoamento superficial (existe água livre somente nessa área);

SM: capacidade de água livre média espacial;

SMM: capacidade máxima de água livre no ponto;

EX: expoente da curva de distribuição espacial da capacidade de água livre;

AU: coordenada relativa ao conteúdo inicial de água livre SC.

As contribuições de água gravitacional para os escoamentos sub-superficial e subterrâneo são especificadas pelos coeficientes KSS e KG. Essas contribuições podem ser calculadas por meio das seguintes equações:

$$RSS = SC \times FRC \times KSS \quad (17)$$

$$RG = SC \times FRC \times KG \quad (18)$$

sendo,

RSS: escoamento sub-superficial;

RG: escoamento subterrâneo;

KSS: coeficiente do escoamento sub-superficial;

KG: coeficiente do escoamento subterrâneo.

1.1.5 - Afluxos à rede de drenagem

Esta fase representa o movimento da água proveniente das colunas de solo em direção ao sistema de drenagem. Os escoamentos superficial e das áreas impermeáveis fluem diretamente até os elementos do sistema de drenagem e de forma muito mais rápida do que o fazem os escoamentos sub-superficial e subterrâneo. A inclusão desse fato no modelo é realizada por meio da propagação dos fluxos sub-superficial e subterrâneo através de um modelo de reservatório linear.

Os afluxos sub-superficiais à rede de drenagem, aqui denotados por QIC, são calculados por

$$QIC_t = QIC_{t-1}.CI + RSS(1 - CI) \quad (19)$$

sendo CI o coeficiente de recessão do escoamento sub-superficial para o intervalo de tempo utilizado $[t-1, t]$.

Por sua vez, os afluxos subterrâneos à rede de drenagem, representados por QGC, são calculados por

$$QGC_t = QGC_{t-1}.CG + RG(1 - CG) \quad (20)$$

sendo, CG o coeficiente de recessão do escoamento subterrâneo para o intervalo de tempo utilizado $[t-1, t]$.

Os termos RS, RB, QIC e QGC, todos expressos em mm/km², somam-se para que possa ser obtido o deflúvio total CIN, afluente à rede de drenagem, durante o intervalo de tempo em questão. Formalmente,

$$CIN = RS + RB + QIC + QGC \quad (21)$$

1.1.6 – Evapotranspiração

À medida que a coluna de solo é submetida à ação da evapotranspiração, inicia-se a depleção da umidade armazenada na forma de água sob tensão capilar. Pode-se dividir a região aerada do solo em zonas superior, inferior e profunda, com capacidades de tensões capilares médias espaciais dadas respectivamente por WUM, WLM e WDM. Tanto o armazenamento quanto a depleção da umidade da região aerada do solo ocorrem na seguinte ordem: zona superior, depois inferior e, em seguida, profunda.

A evapotranspiração potencial (EM) pode ser estimada diretamente a partir de dados de tanque evaporimétrico ou indiretamente por meio de dados meteorológicos. No primeiro caso, pode-se empregar o coeficiente de tanque K para estimar a ETP potencial a partir dos dados evaporimétricos. Em geral, este coeficiente, apesar de ser uma variável sazonal, é tomado como uma constante entre 0,6 e 0,85.

Na zona superior, a evapotranspiração é igual à ETP potencial. Em consequência, se $WUC > EM$, pode-se escrever:

$$EU = EM \quad (22)$$

sendo,

WUC: conteúdo de água capilar na zona superior;

EM: ETP potencial;

EU: ETP real ou efetiva na zona superior.

Na zona inferior, a evapotranspiração é igual à ETP potencial multiplicada pela razão entre o conteúdo e a capacidade de água de tensão capilar na zona inferior. Logo, se $WUC=0$,

$$EL = EM \frac{WLC}{WLM} \quad (23)$$

sendo,

WLC: conteúdo de água capilar na zona inferior;

EM: ETP potencial;

EL: ETP real ou efetiva na zona inferior.

Na zona profunda, a evapotranspiração é uma fração da ETP potencial, a qual é proporcional à área da bacia com vegetação de raízes profundas ou freatófitas. Logo, se $WUC=0$ e $WLC=0$,

$$ED = C.EM \quad (24)$$

sendo,

C: coeficiente de evapotranspiração da zona profunda;

EM: ETP potencial;

ED: ETP real ou efetiva na zona profunda.

Se a evapotranspiração real da zona inferior é menor do que $ED = C.EM$, ou seja, se $WLC/WLM < C$, então:

$$EL = C.EM \quad (25)$$

Finalmente, a evapotranspiração efetiva total, denotada por E, é calculada somando os termos correspondentes às zonas superior, inferior e profunda, ou seja:

$$E = EU + EL + ED \quad (26)$$

1.1.7 – Resumo dos parâmetros do modelo Xinanjiang

Em resumo, os 13 parâmetros utilizados pelo modelo são:

- B: expoente da curva de distribuição em área da tensão capilar, o qual é uma medida da não-uniformidade espacial. O expoente B pode ser tomado como função do tamanho da bacia: 0,1 para áreas de drenagem até 10 km² a 0,4 para áreas de alguns milhares de km²;
- IMP: fração de área impermeável da bacia – para bacias rurais, em geral, IMP > 0,002;
- SM: capacidade média espacial de água livre ou gravitacional, a qual controla a magnitude do escoamento superficial. O valor de SM depende da profundidade da camada superficial de maior condutividade hidráulica, podendo ter valores desde 10 mm para solos rasos até 50 mm ou mais para solos espessos e porosos;
- EX: expoente da curva de distribuição espacial da curva de capacidade de água livre. Em geral, é tomado entre os valores de 0,5 a 2, com maior frequência entre 1,0 e 1,5;
- KSS: coeficiente do fluxo diário do escoamento sub-superficial;
- KG: coeficiente do fluxo diário do escoamento subterrâneo. A relação KSS/KG representa a proporção entre os fluxos sub-superficial e subterrâneo. A soma KSS+KG indica a velocidade de drenagem da água gravitacional. Para uma bacia de cerca de 1000 km², KSS+KG ≈ 0,7;
- CI: coeficiente de recessão do fluxo sub-superficial diário, o qual pode ser facilmente obtido por análise de hidrogramas observados; o valor CI, correspondente ao intervalo de tempo de cálculo, pode ser obtido por exponenciação de CID à razão entre intervalos sub-diários e diário. Os valores usuais estão entre 0,5 e 0,9;

- CG: coeficiente de recessão do fluxo sub-superficial diário, igualmente passível de determinação por análise de hidrogramas observados; o valor CG, correspondente ao intervalo de tempo de cálculo, pode ser obtido por exponenciação de CGD à razão entre intervalos sub-diários e diário. Os valores usuais estão entre 0,96 e 0,998;
- K: coeficiente de ajuste da ETP potencial;
- WU: capacidade média espacial da tensão na zona superior, compreendida entre 5 mm para áreas desnudas até 25 mm para bacias com densa vegetação;
- WL: capacidade média espacial da tensão na zona inferior, compreendida entre 60 e 90 mm. Recorde-se aqui que $WM = WU + WL + WD$ representa a capacidade de tensão média espacial total e é uma medida da aridez da bacia (WM varia de 80 mm em áreas úmidas até 180 mm em áreas semi-úmidas);
- WD: capacidade média espacial da tensão na zona profunda;
- C: coeficiente de evapotranspiração profunda, com valores entre 0,08 até 0,2 para regiões muito úmidas. Este parâmetro, apesar de inativo durante os períodos de cheia, é importante durante os períodos secos.

A forma com que estes parâmetros afetam o fluviograma resultante da transformação chuva-vazão é resumida a seguir:

- K: afeta diretamente a evaporação. Como consequência, afeta diretamente o total de água no solo;
- $WU + WL + WD$: a variação conjunta desses parâmetros afeta o pico do fluviograma final. Basicamente, temos que o aumento desses parâmetros

diminui o pico do fluviograma ocorrendo o contrário quando se diminui os parâmetros;

SM: esse parâmetro afeta sensivelmente o pico do fluviograma. Da mesma forma que os parâmetros WU, WL e WD um aumento em SM provoca uma diminuição no pico, sendo verdadeira a alternativa contrária;

EX: esse parâmetro também interfere no pico do fluviograma. No entanto, uma diminuição do mesmo provoca uma diminuição do pico.

B: o parâmetro B altera o volume final do fluviograma. Seu aumento provoca uma elevação no fluviograma, maior volume escoado para o sistema de drenagem;

KSS e KG: esses parâmetros afetam a recessão do fluviograma. Um aumento do parâmetro provoca uma diminuição da recessão. Ou seja, há um volume final maior de água no sistema de drenagem.

1.2 – Concentração

Conforme visto anteriormente, o modelo Xinanjiang produz uma série de pulsos discretos (diários) de lâminas de escoamento total CIN, incluindo os fluxos superficial, sub-superficial e subterrâneo, sobre uma área unitária da bacia em estudo.

Embora se presuma a uniformidade destas lâminas de escoamento sobre a bacia em estudo, há que se considerar que diferentes áreas irão concentrar suas respectivas contribuições em diferentes tempos, na seção exutória. Desta forma, deve ser feita a concentração de tais lâminas considerando-se a distribuição

espacial da bacia. Para tal, é utilizada uma função de transferência baseada no hidrograma unitário sintético de Clark, de acordo com a formulação do Hydrologic Engineering Center do U. S. Army Corps of Engineers (HEC, 1981).

A metodologia proposta por HEC (1981) apresenta uma formulação em unidades horárias para o hidrograma unitário sintético de Clark. Uma vez que os pulsos de lâminas efetivas sobre a bacia são dados em intervalos diários, é realizada a desagregação dos mesmos em intervalos horários através de uma função uniforme e, após concentrados pela metodologia do HEC (1981), os pulsos são novamente agregados em intervalos diários.

O hidrograma unitário sintético de Clark requer os três seguintes parâmetros:

TC: tempo de concentração da sub-bacia, aqui fixado como um número inteiro de horas e usado para ter em conta os efeitos de translação;

R: coeficiente de armazenamento da sub-bacia, também expresso em um número não necessariamente inteiro de horas e empregado para se incorporar os efeitos de armazenamento aos de translação;

Histograma tempo-área, o qual representa a distribuição temporal das áreas da sub-bacia que contribuem para a formação das vazões na seção exutória.

O tempo de concentração (TC) e o coeficiente de armazenamento (R) são obtidos pelas relações empíricas propostas pelo HEC (1981). São elas,

$$TC + R = 0,625 \cdot \sqrt{AT} \quad (27)$$

e

$$\frac{R}{TC + R} = 0,5 \quad (28)$$

onde AT é a área total da bacia em km².

HEC (1981) propõe uma formulação sintética para o histograma tempo-área que é suficientemente genérica para ser incluída em um modelo de simulação. Esta formulação, abaixo descrita, pressupõe o conhecimento de TC e da forma dominante da sub-bacia entre retangular, losangular e intermediária. Se T denota a fração do tempo de concentração, ou seja,

$$T = \frac{t}{TC} \quad (0 \leq T \leq 1) \quad (29)$$

e AI a área acumulada, como fração da área total AT, ou seja,

$$AI = \frac{A}{AT} \quad (0 \leq AI \leq 1) \quad (30)$$

então, o histograma tempo-área sintético é dado pela seguinte função potencial:

$$AI = a \times T^n \quad \text{se } (0 \leq T \leq 0,5) \quad (31)$$

$$AI = 1 - a \times (1 - T)^n \quad \text{se } (0,5 \leq T \leq 1) \quad (32)$$

onde o expoente n, função da forma dominante da sub-bacia, assume os seguintes valores:

n = 1,0 \Rightarrow bacia de forma retangular;

n = 2,0 \Rightarrow bacia de forma losangular;

n = 1,5 \Rightarrow bacia de forma elipsoidal ou intermediária entre as duas primeiras.

O parâmetro a pode ser deduzido a partir da fixação do valor de n e por considerações de simetria do histograma tempo-área. Assim,

a = 1 bacias retangulares

a = 2 bacias losangulares

a = 1,414 bacias elipsoidais

Uma vez obtido o histograma tempo-área, ele deve ser transformado em ordenadas incrementais, ou seja, $[AI_i - AI_{i-1}]$ para $\frac{t_i}{TC}$, e posteriormente em de $\frac{m^3}{s \cdot mm \cdot km^2}$. Isso irá corresponder ao HU de translação, cujas ordenadas são denotadas por y_i no tempo t_i .

O método de Clark pressupõe ainda uma propagação do HU de translação por um reservatório linear de constante R (horas). A propagação é feita da seguinte forma:

$$Q_i = CA \cdot y_i + CB \cdot Q_{i-1} \quad (33)$$

onde

$$CA = \frac{\Delta t}{R + 0,5 \cdot \Delta t} \quad (34)$$

e

$$CB = 1 - CA \quad (35)$$

sendo Δt o intervalo de tempo (horas) dos pulsos de chuva efetiva ou lâminas de escoamento total em mm/km².

As ordenadas do HU de Clark, denotadas por x_i , no tempo i , são calculadas por:

$$x_i = \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \quad (36)$$

Lembrando que $x_{i=0} = 0$ (para $t = 0$) e que o número total de ordenadas (M) será dado quando o volume total HU superar 0,995.

A partir do hidrograma unitário de Clark obtêm-se a série de vazões médias diárias pela convolução deste com a série de deflúvios superficiais (CIN).

2 – DADOS PARA A APLICAÇÃO DO MODELO

2.1 – Introdução

O modelo acima descrito foi aplicado à bacia do Rio Araguari. A bacia hidrográfica do Rio Araguari localiza-se na região do Triângulo Mineiro, na porção oeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas de 18° 20' e 20° 10' de latitude Sul e 46° 00' e 48° 50' de longitude Oeste, ocupa uma área de aproximadamente 22.000 km², abrangendo parte de 20 municípios. O Rio Araguari é afluente da margem esquerda do Rio Paranaíba. O mapa da figura A.1 (anexo A) mostra a localização da bacia e os principais rios da região.

A aplicação do modelo se refere, basicamente, à calibração dos 13 parâmetros para uma determinada condição da bacia. De acordo com Naghettini et al. (2006), quase todos os modelos de simulação hidrológica ou ambiental possuem parâmetros, de construção conceitual ou de efetiva fundamentação física, que são de difícil, ou mesmo impossível, determinação a partir de medições de campo. Para que tais modelos sejam úteis na simulação ou previsão de cenários hidrológicos ou ambientais, é necessário que seus parâmetros sejam ajustados de modo que os resultados das simulações repliquem, pelo menos aproximadamente, as observações obtidas em campo. O processo de ajuste ou identificação dos parâmetros de um modelo, condicionado às observações históricas da bacia ou sistema ambiental, é denominado calibração.

2.2 – Estações selecionadas

A calibração é feita a partir da comparação entre as séries de vazões observadas e as séries geradas pelo modelo. O melhor conjunto de parâmetros é

aquele que gera uma série de vazões mais próxima da observada. Nesse sentido selecionou-se as estações fluviométricas e pluviométricas da bacia

Dentre as estações pluviométricas disponíveis, aquelas de responsabilidade da ANA (Agência Nacional das Águas), mostradas no anexo A.2, são as seguintes:

Tabela 1 – Estações pluviométricas de responsabilidade da ANA

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Período da série		Operando
					Início	Fim	
1846002	Charqueada do Patrocínio	Patrocínio	18° 55' 48"	46° 58' 00"	01/11/1966	04/06/2001	Sim
1847009	Patrocínio	Patrocínio	18° 57' 00"	47° 00' 00"	01/01/1941	01/01/1947	Não
1848001	Uberlândia	Uberlândia	18° 55' 00"	48° 16' 00"	01/09/1941	01/12/1949	Não
1848003	Ponte Melo Viana	Tupaciguara	18° 26' 00"	48° 35' 00"	01/03/1967	01/10/1979	Não
1848010	Araguari	Araguari	18° 39' 04"	48° 12' 33"	01/12/1974	19/03/2001	Sim
1946002	Araxá (INMET)	Araxá	19° 35' 00"	46° 54' 00"		01/12/1978	Não
1946003	Campos Altos	Campos Altos	19° 41' 00"	46° 10' 00"	01/07/1942	01/02/1947	Não
1946004	Ibiá	Ibiá	19° 28' 30"	46° 32' 31"	01/09/1944	05/06/2001	Sim
1946005	Salitre	Patrocínio	19° 04' 14"	46° 47' 45"	01/09/1944	05/06/2001	Sim
1946007	Fazenda São Mateus	Ibiá	19° 31' 00"	46° 34' 16"	01/03/1967	05/06/2001	Sim
1946008	Serra do Salitre	Serra Salitre	19° 06' 46"	46° 41' 18"	01/10/1974	05/06/2001	Sim
1946010	Pratinha	Pratinha	19° 45' 05"	46° 24' 43"	01/12/1974	05/06/2001	Sim
1946011	Tapira	Tapira	19° 55' 37"	46° 49' 31"	01/12/1974	05/06/2001	Sim
1946018	Ponte do Rio São João	Ibiá	19° 19' 24"	46° 38' 14"	01/11/1999	05/06/2001	Sim
1946019	Argenita	Ibiá	19° 40' 30"	46° 40' 58"	01/07/2000	05/06/2001	Sim
1946020	São José da Bela Vista	São Gotardo	19° 31' 51"	46° 06' 01"	01/08/2000	21/11/2001	Sim
1947001	Santa Juliana	Santa Juliana	19° 18' 57"	47° 31' 34"	01/09/1941	06/06/2001	Sim
1947006	Ponte João Cândido	Patrocínio	19° 08' 48"	47° 11' 05"	01/10/1967	06/06/2001	Sim
1947007	Perdizes	Perdizes	19° 20' 55"	47° 17' 43"	01/11/1974	06/06/2001	Sim
1947008	Lagoa	Sacramento	19° 52' 43"	47° 21' 17"	01/12/1974	06/06/2001	Sim
1947009	Zelândia	Santa Juliana	19° 32' 15"	47° 27' 11"	01/09/1975	06/06/2001	Sim
1947010	Nova Ponte	Nova Ponte	19° 08' 00"	47° 41' 00"	01/01/1941	01/05/1945	Não
1947019	Porto Saracura	Indianópolis	19° 04' 07"	47° 56' 03"	01/10/1977	01/08/1997	Não
1947025	Itaipu	Araxá	19° 36' 01"	47° 12' 32"	01/07/2000	06/06/2001	Sim
1947026	Itiguapira	Uberaba	19° 32' 09"	47° 48' 40"	01/07/2000	06/06/2001	Sim
1948006	Fazenda Letreiro	Uberlândia	18° 59' 18"	48° 11' 25"	01/03/1974	06/06/2001	Sim
2047037	Desemboque	Sacramento	20° 00' 49"	47° 01' 09"	01/05/1971	12/12/2001	Sim

Fonte: ANA 2007

As estações pluviométricas de responsabilidade da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), mostradas no anexo A.3, são:

Tabela 2 – Estações pluviométricas de responsabilidade da CEMIG

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Período da série		Operando
					Início	Fim	
1846024	SE Patrocínio	Patrocínio	18º 57' 00"	46º 59' 00"	01/07/1985	31/07/1996	Sim
1848013	Capim Branco (PCD INPE)	Araguari	18º 45' 00"	48º 16' 00"	01/03/1970	25/07/2002	Sim
1848050	UHE dos Martins	Uberlândia	18º 48' 00"	48º 25' 00"	01/07/1985	31/07/1996	Sim
1848051	UHE Miranda	Uberlândia	18º 55' 00"	48º 04' 00"	01/10/1990	22/06/1998	Sim
1946016	Campos Altos	Campos Altos	19º 42' 00"	46º 10' 00"	01/09/1988	31/07/1996	Sim
1946017	Ponte BR-146	Araxá	19º 20' 57"	46º 50' 00"		07/02/2000	Não
1947013	UHE Pai Joaquim	Sacramento	19º 29' 00"	47º 31' 00"	01/08/1964	22/06/1998	Sim
1947014	Sacramento (LIGHT)	Sacramento	19º 00' 00"	47º 00' 00"	01/10/1958	01/12/1963	Não
1947021	UHE Nova Ponte	Nova Ponte	19º 07' 00"	47º 40' 00"	01/04/1986	23/02/1996	Sim
1947023	UHE Nova Ponte	Nova Ponte	19º 09' 18"	47º 41' 44"	01/07/1998	07/02/2000	Sim
1947024	Fazenda Boa Vista - MG	Perdizes	19º 42' 57"	47º 24' 47"		07/02/2000	Não

Fonte: CEMIG 2007

As estações pluviométricas de responsabilidade de outras instituições (DNAEE-MG, INMET), mostradas no anexo A.4, são:

Tabela 3 – Estações pluviométricas de responsabilidade de outras instituições

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Período da série		Operando
					Início	Fim	
1847002	Usina Mandaguari	Indianópolis	18º 57' 00"	47º 56' 00"	01/06/1960	01/09/1966	Não
1847018	Patrocínio	Patrocínio	18º 57' 00"	47º 00' 00"	01/08/1974	07/06/1994	Sim
1848011	Araguari	Araguari	18º 38' 00"	48º 12' 00"	01/09/1958	01/02/1961	Não
1848018	Araguari	Araguari	18º 38' 00"	48º 11' 00"		18/09/1998	Não
1848049	Uberlândia	Uberlândia	18º 55' 00"	48º 17' 00"	01/12/1980	07/06/1994	Sim
1946015	Araxá	Araxá	19º 34' 00"	46º 56' 00"	01/09/1916	07/06/1994	Sim
1947011	Fanecos	Uberaba	19º 00' 00"	47º 00' 00"	01/09/1958	01/04/1961	Não
1947015	Barreiro do Araxá	Araxá	19º 32' 00"	47º 00' 00"	01/06/1925	07/06/1994	Sim

Fonte: IGAM 2007

As estações fluviométricas da bacia, mostradas nos anexos A.5 e A.6, são apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 4 – Estações fluviométricas de responsabilidade da ANA

Código	Nome	Rio	Município	Latitude	Longitude	Área (km²)	Período da série		Operando
							Início	Fim	
60220000	Desemboque	Rio Araguari	Sacramento	20º 00' 50"	47º 01' 04"	1.205	01/06/1955	15/05/2001	Sim
60230000	Cachoeira Pai Joaquim	Rio Araguari	Santa Juliana	19º 29' 00"	47º 32' 00"	3.752			Não
60235005	Ponte Santa Juliana	Rio Araguari	Santa Juliana	19º 18' 00"	47º 39' 00"	4.064	01/08/1972	01/09/1988	Não
60250000	Fazenda São Mateus	Rio Quebra Anzol	Ibiá	19º 31' 03"	46º 34' 12"	1.231	01/09/1944	15/05/2001	Sim
60265000	Ibiá	Rio Misericórdia	Ibiá	19º 28' 30"	46º 32' 31"	1.307	01/04/1948	15/05/2001	Sim
60285000	Estação do Salitre	Ribeirão do Salitre	Patrocínio	19º 05' 00"	46º 47' 00"	206			Não
60300000	Ponte da Antinha	Rio Capivara	Perdizes	19º 19' 00"	47º 02' 00"	1.250	01/04/1952	01/08/1992	Não
60305000	Porto da Mandioca	Rio Quebra Anzol	Perdizes	19º 11' 00"	47º 06' 00"	7.382			Não
60320000	Ponte João Cândido	Rio Quebra Anzol	Patrocínio	19º 09' 00"	47º 12' 00"	8.389	01/10/1967	01/07/1994	Não
60340000	Porto Saracura	Rio Araguari	Indianópolis	19º 04' 07"	47º 56' 03"	17.085	01/10/1977	01/08/1997	Não
60350000	Porto Monjolinho	Rio Araguari	Indianópolis	19º 02' 00"	47º 58' 00"	16.952	01/09/1941	01/10/1978	Não
60381000	Fazenda Letreiro	Rio Uberabinha	Uberlândia	18º 59' 18"	48º 11' 25"	924	01/09/1973	02/08/2002	Sim
60381005	Estação de Sucupira	Rio Uberabinha	Uberlândia	18º 56' 00"	48º 18' 00"	924			Não
60400000	Ponte Melo Viana	Rio Araguari	Tupaciguara	18º 26' 00"	48º 35' 00"	21.790	01/09/1941	01/10/1979	Não

Fonte: ANA 2007

Tabela 5 – Estações fluviométricas de responsabilidade da CEMIG

Código	Nome	Rio	Município	Latitude	Longitude	Área (km²)	Período da série		Operando
							Início	Fim	
60226080	Perdizes	Rio Araguari	Perdizes	19º 41' 00"	47º 24' 00"	3.000		21/08/2001	Não
60228000	Fazenda Boa Vista	Rio Araguari	Perdizes	19º 42' 57"	47º 24' 47"	3.010	01/04/1989	30/08/2002	Sim
60230002	UHE Pai Joaquim	Rio Araguari	Santa Juliana	19º 29' 00"	47º 32' 00"	3.610			Não
60235000	Santa Juliana	Rio Araguari	Santa Juliana	19º 23' 00"	47º 38' 00"	3.970	01/09/1964	24/06/1998	Sim
60280000	Ponte BR-146	Rio Quebra Anzol	Araxá	19º 20' 57"	46º 50' 00"	4.906	01/11/1988	30/08/2002	Sim
60320002	Ponte João Cândido	Rio Quebra Anzol	Patrocínio	19º 09' 00"	47º 13' 00"	8.490	01/11/1963	24/06/1998	Sim
60330080	UHE Nova Ponte-Eixo	Rio Araguari	Nova Ponte	19º 08' 00"	47º 42' 00"	15.300		30/08/2002	Sim
60335000	Nova Ponte (Ponte Jusante)	Rio Araguari	Nova Ponte	19º 07' 00"	47º 40' 00"	15.300		07/06/1994	Não
60336000	Ponte BR-452	Rio Claro	Araxá	19º 14' 00"	47º 48' 00"		01/05/1993	24/06/1998	Sim
60351080	Miranda	Rio Araguari	Uberlândia	18º 55' 00"	48º 02' 00"	17.800			Não
60355000	Miranda-Olaria	Rio Araguari	Uberlândia	18º 53' 00"	48º 05' 00"	18.060	01/07/1987	24/06/1998	Sim
60360000	Capim Branco (PCD INPE)	Rio Araguari	Araguari	18º 45' 00"	48º 16' 00"	18.700	01/10/1969	25/07/2002	Sim
60360080	Capim Branco	Rio Araguari	Uberlândia	18º 38' 00"	48º 24' 00"	19.000		30/08/2002	Não
60365000	Barra do Rio Paraná-JUS.	Rio Araguari	Uberlândia	18º 38' 00"	48º 20' 00"	19.000		24/06/1998	Sim
60400002	Ponte Melo Viana	Rio Araguari	Tupaciguara	18º 28' 00"	48º 36' 00"	21.900		07/06/1994	Não

Fonte: CEMIG 2007

A bacia do rio Araguari não conta com uma rede extensa de monitoramento de evaporação. Assim, para a aplicação do modelo, selecionou-se uma única estação evaporimétrica. A estação selecionada (Estação Araxá – CÓD 83482) possui dados contínuos de 01/01/2000 até 31/12/2004. O fato de se escolher uma única estação como representante do comportamento regional não é grave. Se por um lado, não se espera grandes variações da evaporação na região, uma vez que a região está sob as mesmas condições de insolação, por outro, aplicações do modelo em outras regiões mostrou que o mesmo é pouco sensível à evaporação local.

Além da espacialização da evaporação para toda a região. Fez-se um prolongamento da série de 5 anos para outros anos, de forma a compatibilizar o período de dados com o período disponível da chuva e da vazão. Da mesma forma que a espacialização regional, espera-se que o prolongamento temporal da série não acarrete grandes variações no modelo. Isso se deve ao fato de a variação temporal da evaporação ser bastante constante, ou seja, a série de evaporação pode ser considerada bastante homocedástica.

2.3 – Resultados da calibração

2.3.1 – Resultados gerais

Quanto mais discretizado for o modelo melhor este representará as características hidrológicas locais de cada curso d'água. Nesse sentido, buscou-se a maior divisão possível da bacia, respeitando a localização de cada estação fluviométrica com disponibilidade de dados. O mapa do anexo A.7 mostra a divisão obtida tendo como condicionante os seguintes critérios:

- Concordância temporal entre a estação fluviométrica e a estação pluviométrica;
- Quantidade de dados de cada estação. Neste posto, colocou-se como paradigma que a estação tenha no mínimo 5 anos de dados contínuos (sem falha);
- Possibilidade de obtenção dos dados da estação. Neste caso, considerou-se que os dados da CEMIG, INMET e outras instituições diferentes da ANA, não são de domínio público. Não permitindo, assim, utilizar essas estações.

As regiões consideradas são mostradas abaixo:

Tabela 6 – Regiões Analisadas

Código	Nome	Descrição
ARJ	Araguari (jusante)	Compreende o rio Araguari a jusante da represa de Miranda e o rio Uberabinha após a confluência com o rio Bom Jardim. O conjunto de parâmetros do modelo chuva-vazão não é válido para a calha do rio Araguari.
ARM	Araguari (montante)	Compreende a parte montante do rio Araguari até o ponto dado pela estação fluviométrica 'Desemboque' (60220000).
ARME	Araguari (médio)	Compreende região do médio Araguari desde o ponto dado pela estação fluviométrica 'Desemboque' (60220000) até a confluência com o rio Quebra Anzol.

Tabela 6 – Regiões Analisadas

(Continuação)

Código	Nome	Descrição
BJA	Bom Jardim	Compreende toda a bacia do rio Bom Jardim e a região imediatamente a jusante da confluência com o rio Uberabinha.
CAP	Capivara	Compreende toda a bacia do rio Capivara, incluindo a bacia do ribeirão Tamanduá.
CLA	Claro	Compreende toda a bacia do rio Claro até sua confluência com o rio Araguari.
MIS	Misericórdia	Compreende toda a bacia do rio Misericórdia até a confluência com o rio Quebra Anzol.
QAJ	Quebra Anzol (jusante)	Compreende a parte jusante do rio Quebra Anzol desde sua confluência com o rio Misericórdia até a entrada da represa da Nova Ponte. Excluem-se dessa região as bacias dos rios Misericórdia, Salitre e Capivara. Incluem-se nessa região, além do rio Quebra Anzol, o rio São João e o rio Gualheiros.
QAM	Quebra Anzol (montante)	Compreende a parte montante do rio Quebra Anzol até sua confluência com o rio Misericórdia.
RNP	Represa de Nova Ponte	Essa região não foi abordada no estudo pois as vazão dos cursos d'água depende da operação dos reservatórios da CEMIG.
SAM	Salitre	Compreende a parte montante do ribeirão do Salitre até o ponto dado pela estação fluviométrica 'Estação do Salitre' (60285000). Os dados dessa região podem ser utilizados para a geração de séries de vazão para bacia afluentes do ribeirão do Salitre a jusante da estação 'Estação do Salitre'.
UBJ	Uberabinha	Compreende a parte montante do rio Uberabinha até sua confluência com o rio Bom Jardim.

Fonte: Monte Plan 2007

Das regiões mostradas acima, somente 3 possibilitaram uma calibração satisfatória do modelo. São elas: ARJ, ARME e QAJ. As demais regiões não permitiram uma boa calibração, sendo os principais motivos, relacionados à qualidade dos dados observados de vazão e chuva.

Como exposto na tabela 6, a região RNP não foi abordada neste estudo devido à presença de um grande reservatório de regularização de vazões. Nesses

casos, deve-se elaborar um modelo específico que leve em consideração o amortecimento e a regularização proporcionada pelo reservatório.

Embora algumas regiões não sejam passíveis de calibração, o modelo pode ainda ser empregado, levando em consideração a similaridade hidrológica com as regiões onde foi possível a calibração. Nesse sentido, a bacia do rio Araguari pode ser agrupada em 4 grupos:

QAJ, com os parâmetros do modelo válidos para as regiões SAM, CAP, QAM, MIS;

ARME, com os parâmetros válidos para a região ARM;

ARJ, com os parâmetros válidos para as regiões CLA, BJA e UBJ;

RNP, onde não é possível utilizar o modelo.

Na verdade, os parâmetros da região ARJ são válidos para toda a bacia, uma vez que foram estimados considerando a área total da bacia, bem como a chuva média sobre ela.

Vale salientar, neste ponto, que qualquer modelo hidrológico é uma representação matemática das condições observadas. Assim, ao se aplicar o modelo para bacias diferentes daquelas que foram calibradas, procura-se uma estimativa do comportamento hidrológico médio da bacia. Portanto, os resultados gerados pelo modelo devem ser analisados à luz das características locais, bem como de outros estudos hidrológicos.

2.3.2 – Resultados para a bacia do rio Quebra Anzol – QAJ

A estação fluviométrica que serviu de paradigma para a calibração do rio Quebra Anzol foi a estação 60320000 (Ponte João Cândido). A chuva média

sobre a bacia foi estimada por meio dos polígonos de Thiessen utilizando as seguintes estações:

1946004 – 10,0%,

1946005 – 17,0%

1946010 – 21,5%

1947006 – 07,7%

1947007 – 43,6%

O período de dados utilizado na calibração foi de 01/01/1989 a 31/13/1993.

O gráfico abaixo mostra a concordância entre as vazões simuladas e as vazões observadas.

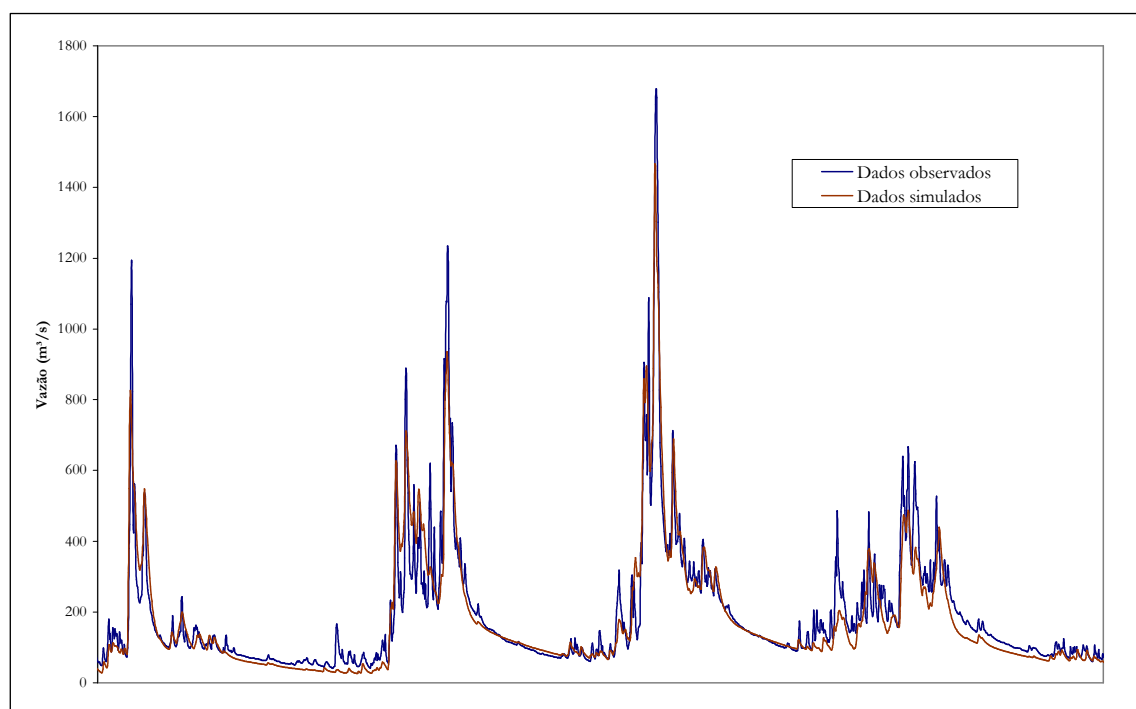


Figura 4 – Vazões simuladas versus vazões observadas para a bacia do rio Quebra Anzol

Uma forma de medir a qualidade do ajuste é por meio do critério de Nash-Sutcliffe. Tal critério é uma medida da quantidade da variância do processo

natural que pode ser explicada pelo modelo. O critério de Nash-Sutcliffe é expresso pela seguinte equação:

$$R = 100 \cdot \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \right] \quad (37)$$

onde, Q_t^{obs} é a vazão observada no dia t, Q_t^{calc} é a vazão calculada no dia t, \bar{Q}^{obs} é a vazão média observada e n é o número de dias simulados.

O valor de R varia entre 0 e 100, sendo que quanto maior o valor de R melhor é o ajuste do modelo. Podem-se considerar satisfatórios valores superiores a 60.

Além do critério de Nash-Sutcliffe, foram analisadas outras estatísticas:

Erro médio quadrático

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{n}} \quad (38)$$

Erro percentual no volume

$$EV = 100 \cdot \frac{\sum_{t=1}^n Q_t^{obs} - \sum_{t=1}^n Q_t^{calc}}{\sum_{t=1}^n Q_t^{obs}} \quad (39)$$

Raiz do erro quadrático dos inversos

$$EI = \sum_{t=1}^n \left(\frac{1}{Q_t^{obs}} - \frac{1}{Q_t^{calc}} \right)^2 \quad (40)$$

Diferença relativa média

$$DR = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{calc} - Q_t^{obs}) \quad (41)$$

Os valores encontrados para a bacia foram:

Tabela 7 - Estatísticas da vazão simulada para a bacia do rio Quebra Anzol

Estatística	Valor
R	88,200
RMSE	62,670
EV (%)	7,706
EI	0,066
DR (%)	-13,649
Vazão média simulada (m ³ /s)	163,464
Vazão média observada (m ³ /s)	177,113

Fonte: Monte Plan 2007

Como pode ser visto pelo gráfico e comprovado pelos valores da tabela 7, houve um bom ajuste do modelo, sobretudo no que diz respeito às vazões de estiagem.

Os parâmetros calibrados para a bacia foram:

Tabela 8 – Parâmetros calibrados para a bacia do rio Quebra Anzol

Parâmetro	Valor calibrado
K	0,721
IMP	0,029
WUM	9,475
WLM	80,824
WDM	50,346
SM	67,253
B	0,900
EX	0,672
C	0,055
KSS	0,304
KG	0,449
CI	0,873
CG	0,994

Fonte: Monte Plan 2007

2.3.3 – Resultados para a bacia do alto Araguari – ARM

A estação fluviométrica que serviu de paradigma para a calibração do rio Araguari (montante) foi a estação 60235005 (Ponte Santa Juliana). A chuva média sobre a bacia foi estimada por meio 1947013.

O período de dados utilizado na calibração foi de 01/01/1988 a 26/10/1993. O gráfico abaixo mostra a concordância entre as vazões simuladas e as vazões observadas.

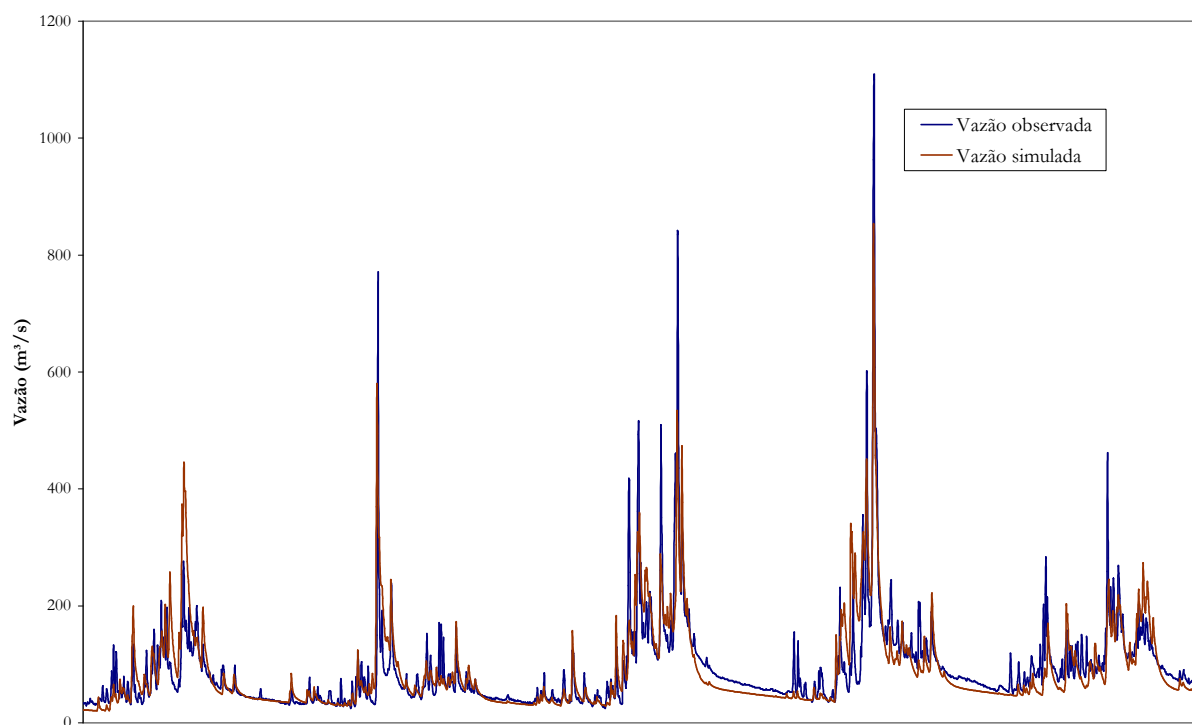


Figura 5 – Vazões simuladas *versus* vazões observadas para a bacia do rio Araguari (montante)

Os valores encontrados para as estatísticas da vazão simulada foram:

Tabela 9 - Estatísticas da vazão simulada para a bacia do rio Araguari (Montante)

Estatística	Valor
R	67,100
RMSE	45,948
EV (%)	0,587
EI	0,072
DR (%)	-0,504
Vazão média simulada (m³/s)	85,459
Vazão média observada (m³/s)	85,946

Fonte: Monte Plan 2007

Como pode ser visto pelo gráfico e comprovado pelos valores da tabela 9, houve um bom ajuste do modelo, sobretudo no que diz respeito às vazões de estiagem.

Os parâmetros calibrados para a bacia foram:

Tabela 10 – Parâmetros calibrados para a bacia do rio Araguari (Montante)

Parâmetro	Valor calibrado
K	0,686
IMP	0,034
WUM	21,132
WLM	81,212
WDM	50,461
SM	68,551
B	0,863
EX	0,808
C	0,109
KSS	0,306
KG	0,450
CI	0,891
CG	0,997

Fonte: Monte Plan 2007

2.3.4 – Resultados para a bacia do baixo Araguari – ARJ

A estação fluviométrica que serviu de paradigma para a calibração do rio Araguari (jusante) foi a estação 60400000 (Ponte Melo Viana). A chuva média sobre a bacia foi estimada por meio dos polígonos de Thiessen utilizando as seguintes estações:

1946002 – 21,0%

1946004 – 13,9%

1946007 – 07,6%

1947001 – 35,3%

1947006 – 13,3%

1947013 – 08,8%

O período de dados utilizado na calibração foi de 01/01/1968 a 31/07/1972. O gráfico abaixo mostra a concordância entre as vazões simuladas e as vazões observadas.

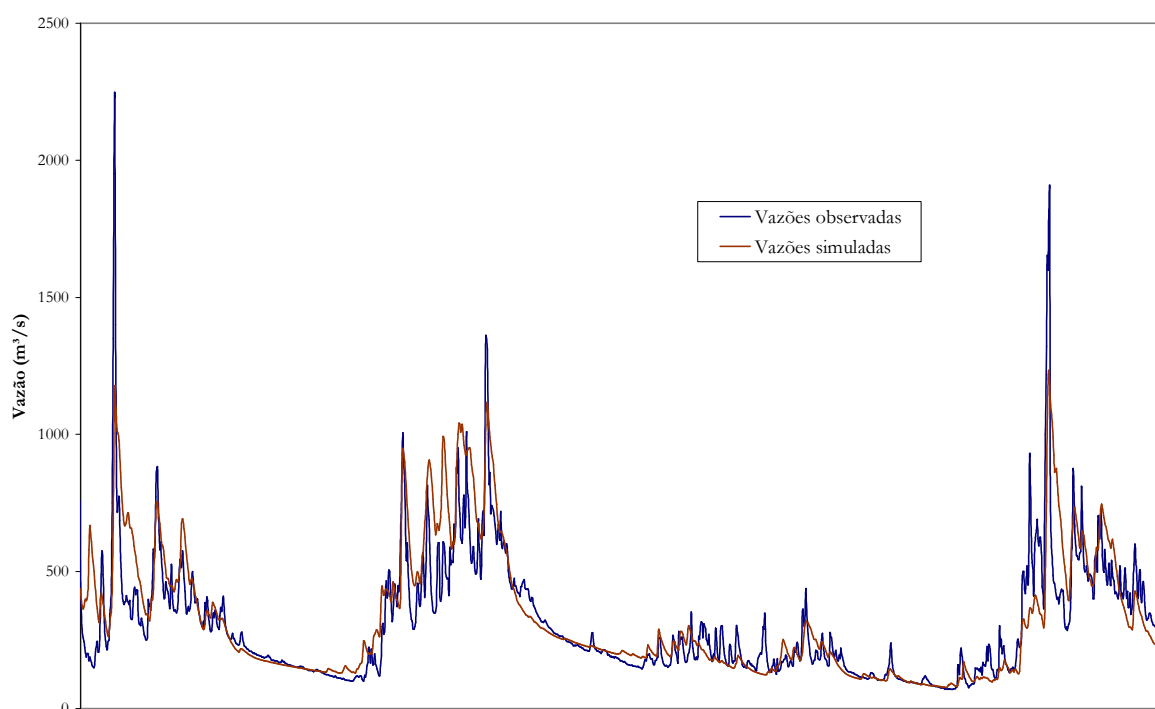


Figura 6 – Vazões simuladas *versus* vazões observadas para a bacia do rio Araguari (jusante)

Os valores encontrados para as estatísticas da vazão simulada foram:

Tabela 11 - Estatísticas da vazão simulada para a bacia do rio Araguari (Jusante)

Estatística	Valor
R	70,800
RMSE	150,547
EV (%)	5,953
EI	0,013
DR (%)	-18,982
Vazão média simulada (m ³ /s)	299,870
Vazão média observada (m ³ /s)	318,852

Fonte: Monte Plan 2007

Como pode ser visto pelo gráfico e comprovado pelos valores da tabela 11, houve um bom ajuste do modelo, sobretudo no que diz respeito às vazões de estiagem.

Os parâmetros calibrados para a bacia foram:

Tabela 12 – Parâmetros calibrados para a bacia do rio Araguari (Jusante)

Parâmetro	Valor calibrado
K	0,645
IMP	0,023
WUM	17,237
WLM	68,207
WDM	40,692
SM	63,132
B	0,899
EX	1,015
C	0,096
KSS	0,309
KG	0,448
CI	0,882
CG	0,996

Fonte: Monte Plan 2007

2.4 – Recomendações

Conforme foi visto anteriormente, o modelo apresentou bons resultados para as três bacias onde foi possível obter uma calibração. Mesmo assim, é necessário certo cuidado em seu uso. Os resultados obtidos por simulações diversas devem ser vistos com cautela e não como uma representação fiel do comportamento hidrológico da bacia.

No que se diz respeito às bacias onde não foi possível obter uma boa calibração, recomenda-se que sejam analisadas, caso a caso, cada uma das estações fluviométricas e pluviométricas da bacia. Deve-se fazer uma análise de curva chave e consistência dos dados no caso das estações fluviométricas e realizar um estudo de chuvas no caso das estações pluviométricas. Esses estudos podem apontar alguma discrepância nos dados, o que pode ter causado a má calibração dessas bacias.

Por fim, recomenda-se que se refaça a calibração dos parâmetros do modelo a cada ano ou quando houver novas informações disponíveis.

3 – O SOFTWARE

3.1 – Introdução

O modelo de transformação chuva-vazão mostrado neste trabalho é de difícil aplicação prática. Por isso, foi desenvolvido um software com a finalidade de tornar prático e rápido a aplicação do modelo para as bacias consideradas na tabela 6.

O software foi desenvolvido em ambiente Microsoft Windows© utilizando a linguagem Microsoft Visual Basic .NET 2002©. Os princípios que nortearam a construção do software foram:

Facilidade de instalação;

Facilidade de atualização;

Interface simples e auto-explicativa;

Modulação por regiões de estudo;

O software é dividido em 3 partes:

Módulo global: neste módulo é possível simular qualquer uma das 11 regiões da bacia, a partir de uma série de dados pluviométricos, uma série de dados evaporimétricos, a área da bacia e a forma aproximada da bacia.

Módulo sub-bacia: este módulo é subdividido em 11 partes (programas) onde é possível simular cada uma das regiões consideradas a partir da área e da forma da bacia em questão. Para estes módulos, as séries de chuva e evaporação são pré fixadas.

Módulo de atualização: nesta parte do programa é possível fazer a atualização dos dados de chuva e evaporação que serão utilizados em cada uma das partes do módulo sub-bacia.

Na seqüência é apresentado o manual de usuário para cada uma das partes do software. Esse manual pode ser encontrado na ajuda do programa.

3.2 – Módulo global

3.2.1 – Características principais

O módulo global é a parte do programa que permite a simulação de qualquer bacia. Ao instalar o software, o módulo global pode ser acessado pelo menu de programas em ‘Simulação Hidrológica do Rio Araguari → Modelo global’.

A tela principal do programa é mostrada a seguir:

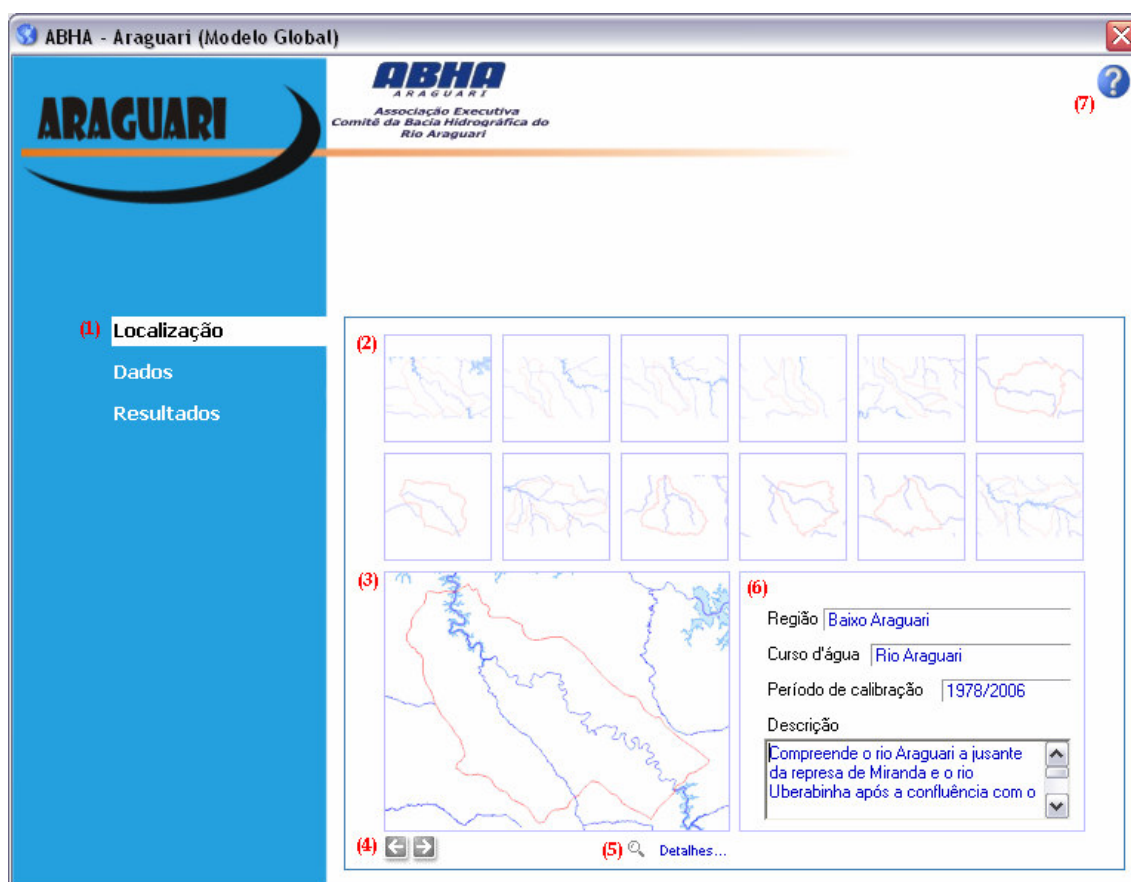


Figura 7 – Tela principal do modelo global

As principais características da tela principal do modelo global são:

- (1) Menu principal: este menu permite o acesso às demais partes do programa. No item “Localização” é possível escolher a bacia onde será feita a simulação (figura 7). No item “Dados” o usuário deve entrar com os dados necessários para a simulação (série de chuva, série de evaporação,

área de drenagem e forma aproximada da bacia). No item “Resultados” são mostrados os resultados obtidos pela simulação.

- (2) Mosaico de bacias: neste mosaico o usuário deve escolher a bacia onde será realizada a simulação. As bacias são dispostas de acordo com a descrição da tabela 6. As bacias são selecionadas com um clique do mouse e são mostradas com contorno vermelho, conforme mostrado na figura 8.

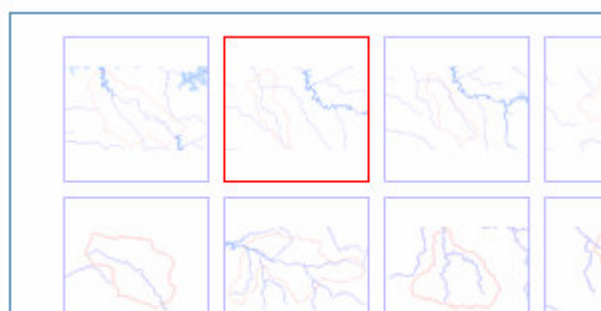


Figura 8 – Bacia selecionada

- (3) Detalhe da bacia selecionada: neste frame é mostrada uma ampliação da bacia selecionada. Para cada bacia, é possível visualizar a hidrografia fina (1:50000) e a hidrografia principal. Para mudar a visualização o usuário deve clicar nas setas indicadas, na figura 7, pelo número (4). Além disso, é possível verificar os detalhes da hidrografia da bacia selecionada a partir do zoom proporcionado pelo link indicado pelo número (5) ou a partir de um duplo clique sobre o frame da bacia.
- (6) Detalhes da calibração: neste ponto são mostradas as principais características descritivas da bacia. Tais como a sua localização e o período de calibração.
- (7) Botão de ajuda: ao clicar neste botão será mostrada a ajuda do programa. A qual é, basicamente, o conteúdo deste capítulo.

3.2.2 – Procedimentos para a simulação

Após selecionar a bacia onde será feita a simulação, conforme detalhado no item 3.2.1, o usuário seleciona o menu “Dados” com o propósito de realizar a simulação. A figura a seguir mostra a tela do menu “Dados”.

Figura 9 – Tela do menu “Dados”

As principais características da tela de entrada de dados são:

Dados pluviométricos e evaporimétricos: a entrada de dados de chuva e evaporação é feita por meio de arquivos de texto, conforme mostrado na figura 10. As séries devem ter o mesmo tamanho. Para selecionar o arquivo de origem dos dados o usuário deve clicar nos botões indicados pelos números (1) e (2) na figura 9.

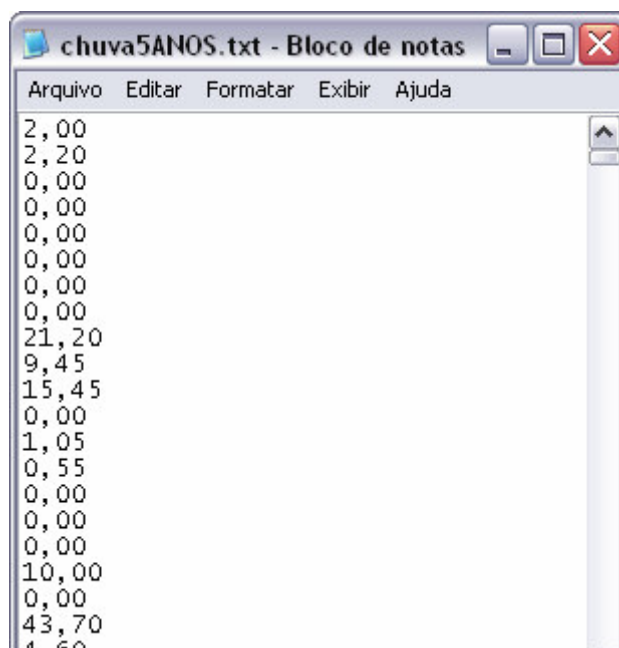


Figura 10 – Exemplo de entrada de dados

Como default a data inicial dos dados deve ser dia 01/01. O ano inicial da série é selecionado através do controle indicado pelo número (3) na figura 9.

As características físicas da bacia são referenciadas pela área de drenagem e pela forma aproximada da mesma. A área de drenagem da bacia, em km², deve ser colocada no controle mostrado pelo número (4) na figura 9. Neste ponto, vale salientar que o modelo se comporta melhor para bacias com áreas de drenagem maiores, visto as características das calibrações realizadas. A forma aproximada da bacia deve ser selecionada no controle mostrado pelo número (5).

Após o preenchimento dos dados referenciados pelos números (1), (2), (3), (4) e (5) o usuário deve capturar as séries e validar as entradas clicando no botão “Capturar dados” (número 6). As séries capturadas serão mostradas na tabela indicada pelo número (8). Caso se deseje excluir os dados e entrar com novos valores, deve-se clicar em “Excluir dados” e repetir os passos de (1) a (6). A figura a seguir mostra um exemplo com os dados preenchidos.

Dados hidrológicos

Dados pluviométricos

D:\Projeto Araguari\Programa\prjAraguari\TesteRioP

Dados evaporimétricos

D:\Projeto Araguari\Programa\prjAraguari\TesteRioP

Data inicial

01/01/1978

Dados fisiográficos

Área de drenagem (km²)

2260

Forma aproximada da bacia

☐ Retangular
☐ Intermediária
☒ Losangular

Capturar dados

Excluir dados

Dados capturados	
Chuva (mm)	Evap. (mm)
13,00	2,28
5,00	3,47
15,90	3,65
2,30	4,56
2,60	5,89
23,15	6,95
3,15	7,64
0,00	8,78
0,00	7,66
20,05	7,22
0,75	8,15
0,00	9,03
0,00	9,11
0,00	9,76
0,00	9,50
0,00	8,72
0,00	8,25

Figura 11 – Exemplo de dados preenchidos

Após o preenchimento dos dados, ao clicar no menu “Resultados” o sistema irá inicial a simulação hidrológica. O tempo de processamento pode ser bastante longo, dependendo da quantidade de dados a serem simulados e da capacidade de processamento do computador. A figura a seguir mostra a tela de espera do programa enquanto o modelo é simulado.

Gerando resultados

Hora de início

19:29:18

Hora atual

19:29:20

Tempo de processamento

0h 0m 1s

Cancelar

OBS.: Dependendo do tamanho da série a ser gerada o cálculo pode levar vários minutos.

Figura 12 – Tela de espera do programa

3.2.3 – Resultados da simulação

Após a simulação da bacia, é mostrada a tela de resultados. Nessa parte, é possível visualizar as estatísticas dos dados simulados, bem como gerar relatório de simulação. A figura a seguir mostra a tela de resultados do programa.

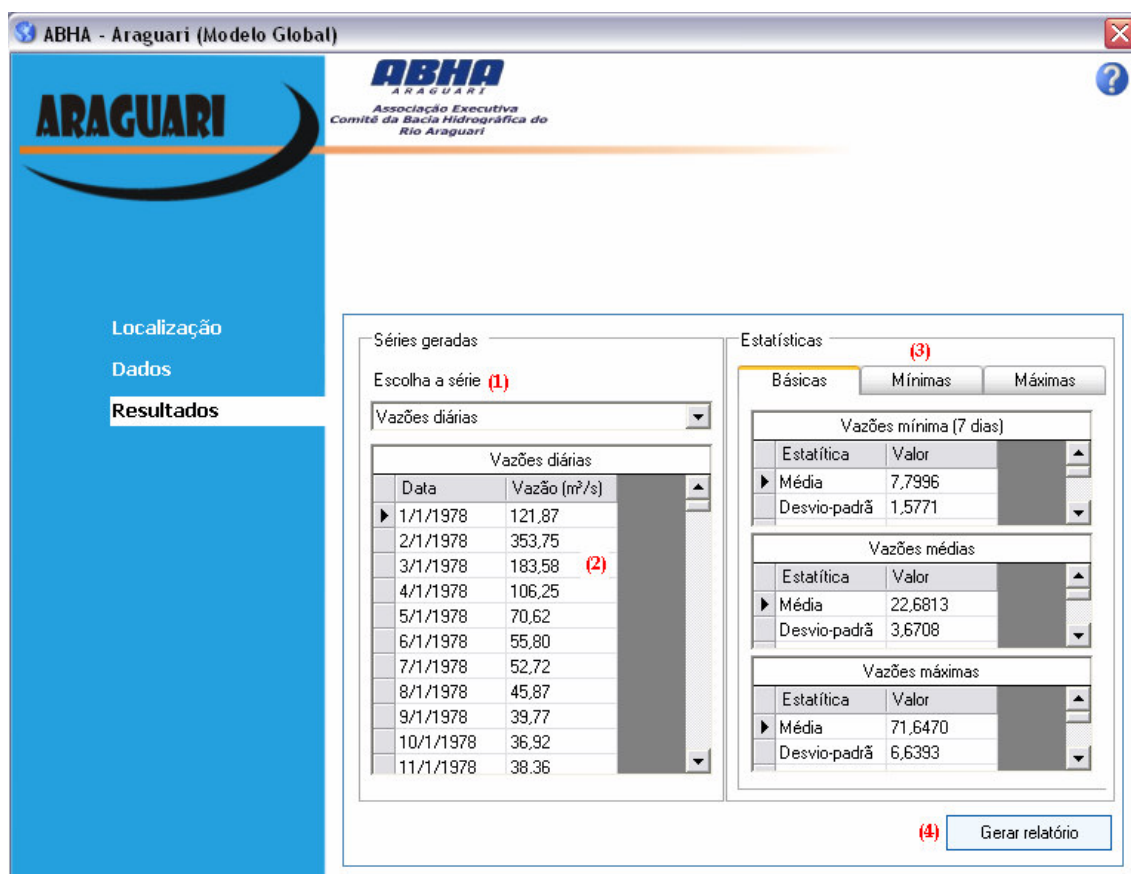


Figura 13 – Tela de resultados

As principais características da tela de resultados são:

- (1) Séries geradas: além da série de vazões diárias, o programa gera, ainda, outras séries de interesse hidrológico. São elas: vazões máximas anuais, vazões médias anuais, vazões de permanência e vazões mínimas anuais de 7 dias de duração (Q7). Para visualizar as séries, o usuário deve selecionar o tipo de dados no controle referenciado pelo número (1) na figura 13. As séries serão mostradas na tabela indicada pelo número (2).

(3) Estatísticas: as estatísticas são calculadas a partir das séries de vazão geradas pelo modelo. As estatísticas são divididas em 3 grupos:

Estatísticas básicas: são mostradas a média, o desvio padrão, a variância, o coeficiente de variação, o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose das séries de vazões mínimas anuais de 7 dias de duração, vazões médias anuais e vazões máximas anuais. Detalhes de cálculos e utilização dessas estatísticas básicas podem ser encontrados Rao & Hamed (2000).

Estatísticas mínimas: nessa aba são mostrados os resultados do ajuste estatístico das vazões mínimas anuais de 7 dias de duração. Para as vazões mínimas são ajustadas as distribuições de Gumbel e Weibull, adequadas a este fim. São mostrados os parâmetros de cada distribuição, bem como os quantis calculados para vários períodos de retorno. O ajuste é feito pelo método dos momentos-L. Para detalhes dessa metodologia, bem como uma discussão a respeito de cada distribuição consulte Rao & Hamed (2000) e Hosking & Wallis (1997).

Estatísticas máximas: nessa aba são mostrados os resultados do ajuste estatístico das vazões máximas anuais. Para as vazões máximas são ajustadas as distribuições: exponencial, Gumbel, normal, generalizada de valores extremos, generalizada normal e Pearson III. São mostrados os parâmetros de cada distribuição, bem como os quantis calculados para vários períodos de retorno. O ajuste é feito pelo método dos momentos-L. Para detalhes dessa metodologia, bem como uma discussão a respeito de cada distribuição consulte Rao & Hamed (2000) e Hosking & Wallis (1997).

(4) Relatório: finalmente, todos os resultados acima listados, podem ser exportados na forma de relatório. Para tal, basta clicar no botão referenciado com o número (4) na figura 13.

3.3 – Módulo sub-bacia

O módulo sub-bacia é bastante semelhante ao módulo global, e por isso, não será dado muitos detalhes sobre sua utilização.

As diferenças básicas entre o módulo global e o módulo sub-bacia residem no fato de esse último ser particularizado para cada região mostrada na tabela 6 e não ter necessidade de entrada de dados de evaporação e chuva.

De fato, foram construídos 11 programas, um para cada sub-bacia. Cada programa já possui, internamente, as séries de evaporação e chuva válidas para a bacia. Assim, para a geração de séries de vazão é necessária somente a área e a forma da bacia a ser estudada.

Para acessar cada programa entre em ‘Simulação Hidrológica do Rio Araguari → Sub bacia’ e selecione a bacia de interesse.

Como dito anteriormente, a operação de cada programa é semelhante à operação do módulo global e não será detalhada. Além disso, os resultados gerados também são os mesmos.

3.4 – Módulo de atualização

Conforme dito no item 3.3 cada programa de sub-bacia já possui, internamente, os dados de evaporação e precipitação. Para tornar o programa mais versátil, foi construído um módulo de atualização capaz de modificar as

séries internas de cada programa. A figura a seguir mostra a tela do programa de atualização.

Atualização de dados hidrológicos

Ponto de controle

- Baixo Araguari (ARJ)
- Bom Jardim (BJA)*
- Uberabinha (UBJ)*
- Claro (CLA)*
- Médio Araguari (ARME)*
- Alto Araguari (ARM)*
- Salitre (SAM)*

* Arquivo com erros ou arquivo não encontrado.

Características da região

Dados pluviométricos

Plu - Nome

Dados evaporimétricos

Eva - Nome

Data inicial

1985

Atualizar

Sair

Séries

Data	Chuva (mm)	Eva
1/1/1985	5,00	3,4
2/1/1985	15,90	3,6
3/1/1985	2,30	4,8
4/1/1985	2,60	5,8
5/1/1985	23,15	6,8
6/1/1985	3,15	7,8
7/1/1985	0,00	8,8
8/1/1985	0,00	7,8
9/1/1985	20,05	7,8
10/1/1985	0,75	8,8
11/1/1985	0,00	9,0
12/1/1985	0,00	9,0

Figura 14 – Tela principal do módulo de atualização

Para atualizar os dados de alguma sub-bacia, selecione a região na lista “Ponto de controle” e clique em “Atualizar”. Será aberta uma tela com a possibilidade de alterar os dados de precipitação e evaporação. A figura a seguir exemplifica o processo.

Figura 15 – Entrada de dados para a atualização

Após selecionar os arquivos de entrada de dados (arquivos de texto) e a data inicial dos dados, basta clicar em “Gravar” para atualizar os dados da sub-bacia.

4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hosking, J. R. M. & Wallis, J. R. Regional Frequency Analysis - an approach based on L moments. Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

Hydrologic Engineering Center, HEC-1 Flood Hydrograph Package - Reference Manual, U. S. Army Corps of Engineers, Davis, 1981.

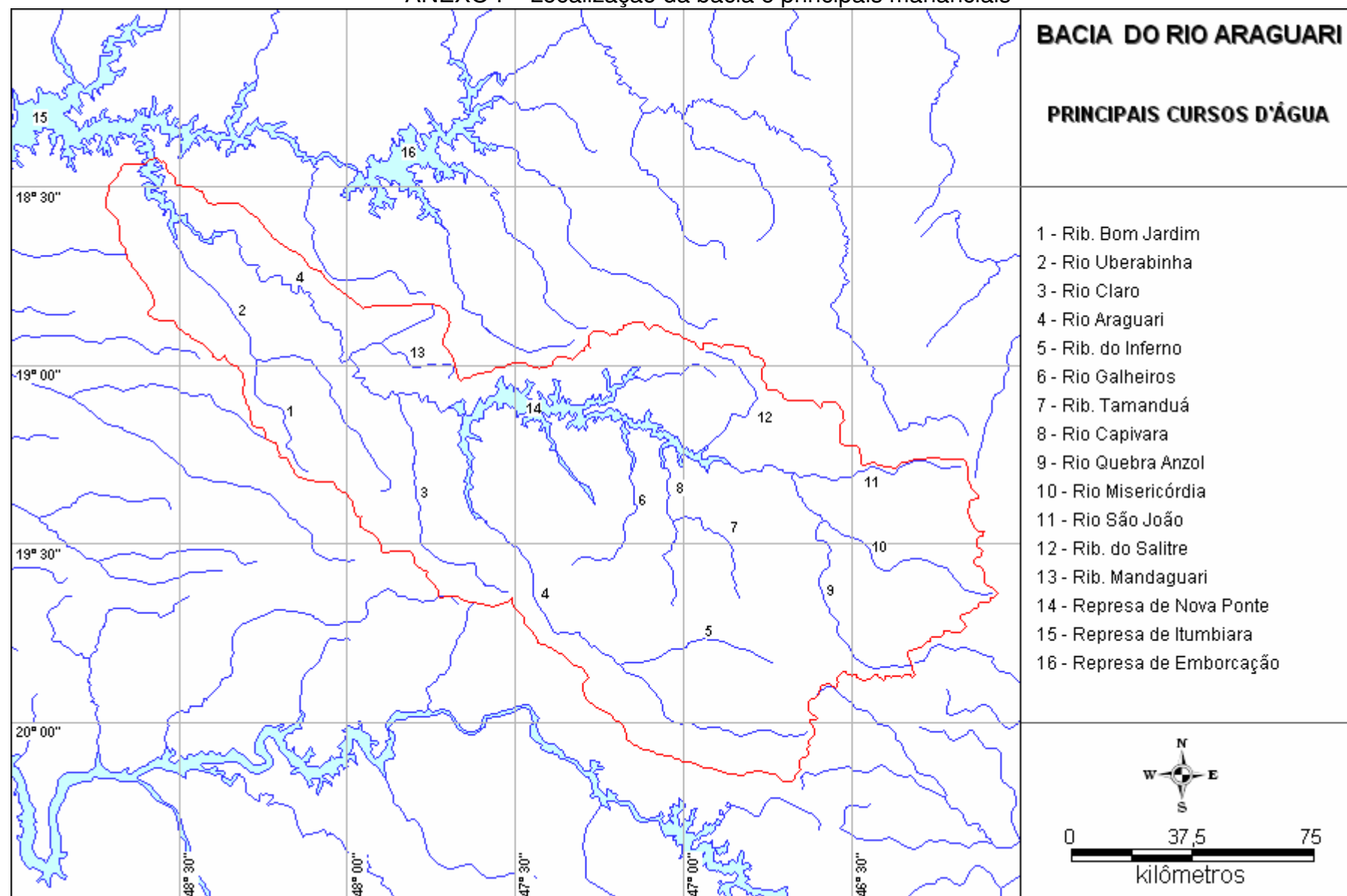
Naghattini, M. C., Nascimento, N. O. & Fernandes, W. S. A estrutura funcional do sistema Rio Grande – Um sistema integrado para simulação hidrológica e previsão de vazões afluentes a reservatórios de aproveitamento hidrelétrico. Relatório técnico 1, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

Naghattini, M. C., Nascimento, N. O., Thimotti, T., Lima, A. A. & Silva, F. E. O. Modelo Rio Grande de Simulação Hidrológica para Previsão de Vazões de Curto Prazo: Formulação Teórica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, Belo Horizonte, 2002.

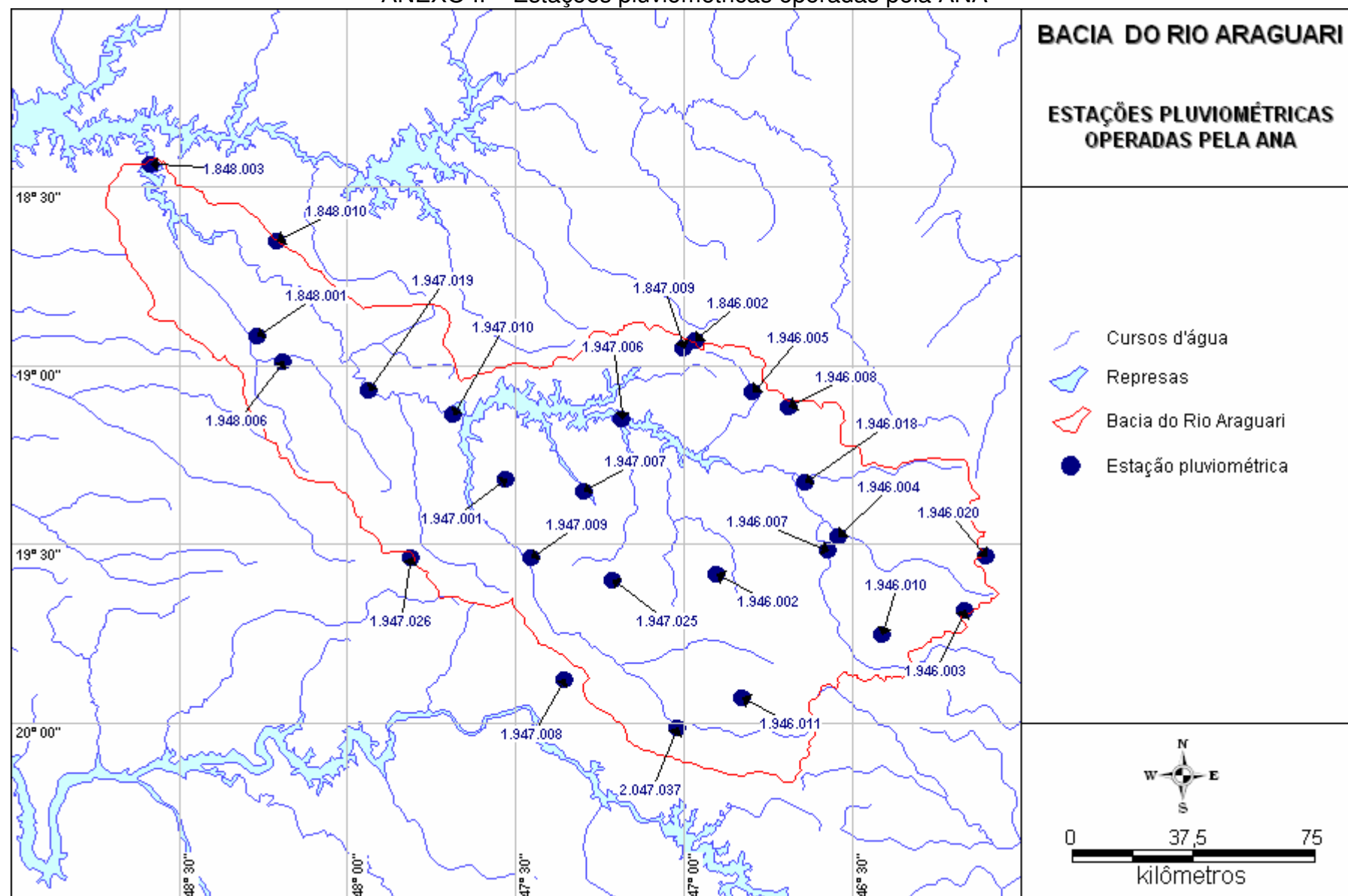
Rao, A. R. & Hamed, K. H. Flood frequency analysis, CRC Press, Boca Raton, Flórida, 2000.

Zhao, R. J., Zhuang, Y. L., Fang, L. R., Liu, X. R. & Zhang, Q. S. The Xinanjiang Model, Hydrological Forecasting Proceedings, Oxford Symposium, IAHS 129, pp. 351-356, 1980.

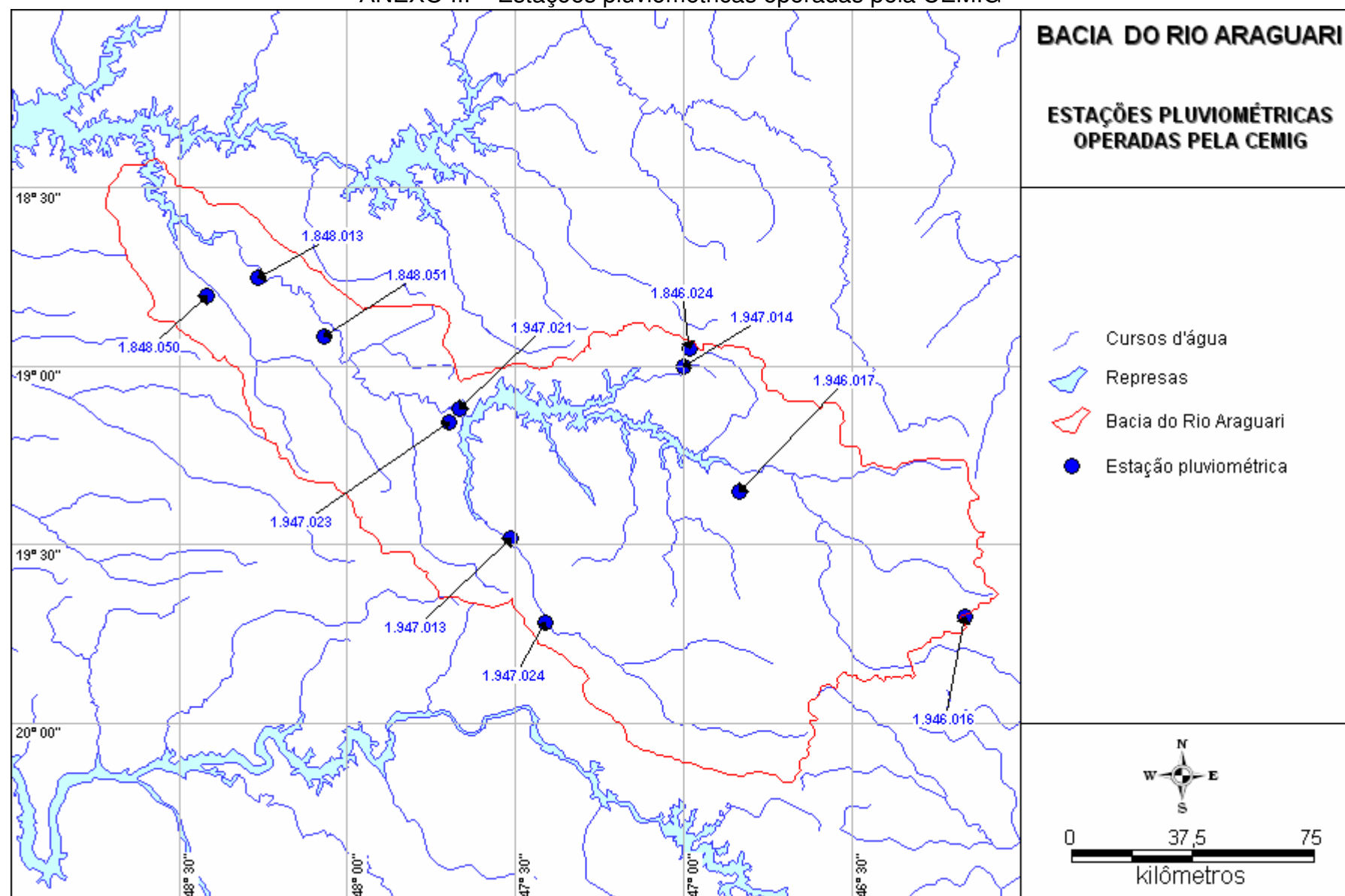
ANEXO I – Localização da bacia e principais mananciais



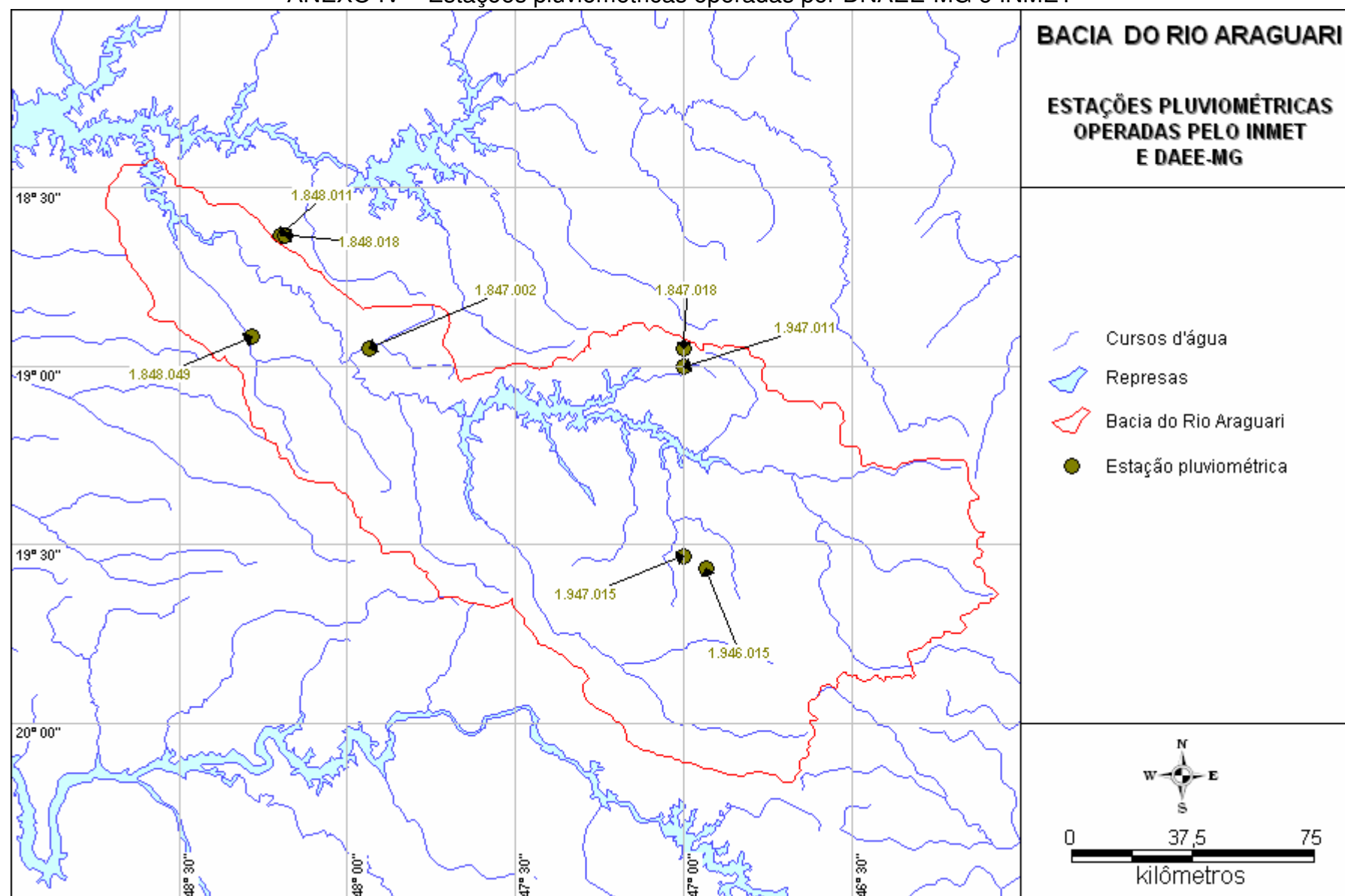
ANEXO II – Estações pluviométricas operadas pela ANA



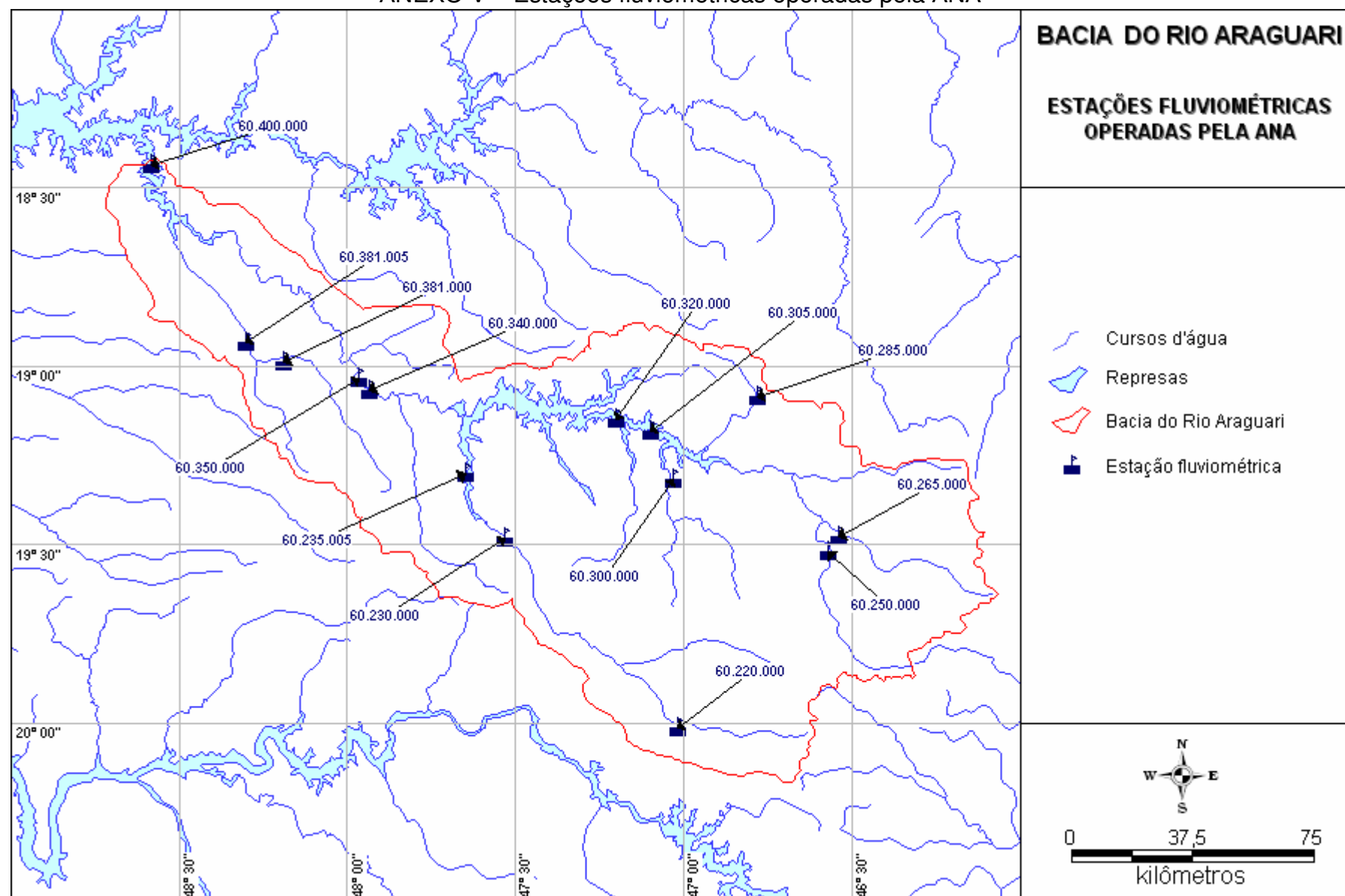
ANEXO III – Estações pluviométricas operadas pela CEMIG



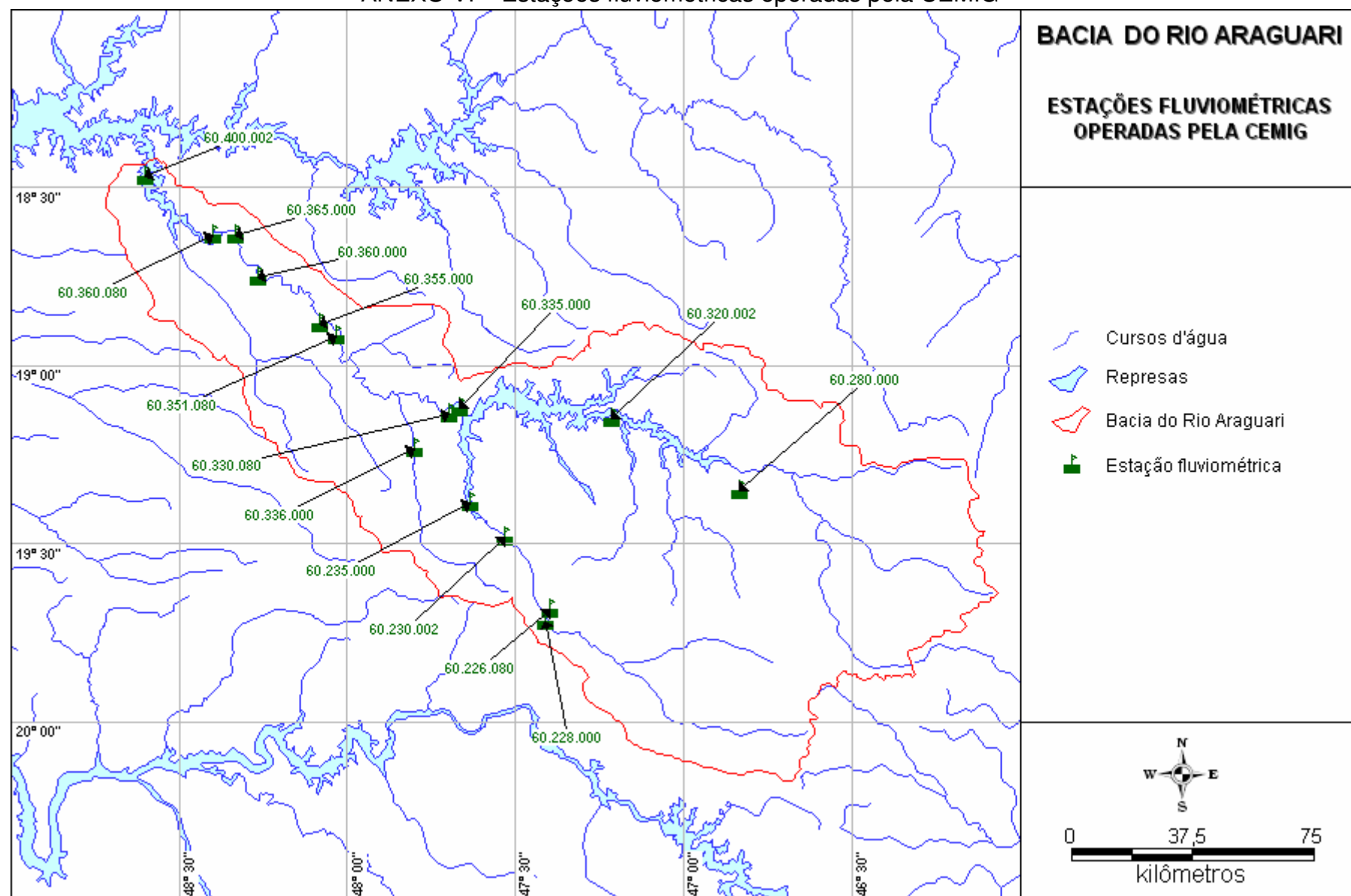
ANEXO IV – Estações pluviométricas operadas por DNAEE-MG e INMET



ANEXO V – Estações fluviométricas operadas pela ANA



ANEXO VI – Estações fluviométricas operadas pela CEMIG



ANEXO VII – Divisão da bacia do rio Araguari

