

# DELIMITAÇÃO DE REGIÃO HIDROLOGICAMENTE HOMOGÊNEA

POR

J.Kelman<sup>1,2</sup> e J.M.Damazio<sup>1</sup>

RESUMO -- Uma característica comum a todas as técnicas de regionalização é a utilização do conceito de região hidrológicamente homogênea. Devido a variabilidade de clima, de topografia, de cobertura vegetal e de tipo de solo, regiões hidrológicamente homogêneas não devem se estender por grandes áreas. Por outro lado a delimitação de áreas excessivamente reduzidas resulta numa carência de dados que prejudica a confiabilidade das estimativas. Neste artigo apresenta-se um estudo de regionalização para vazões máximas anuais da bacia do rio Iguaçu sob duas hipóteses: (i) única região abrangendo a totalidade da bacia; e (ii) divisão da bacia em duas sub-áreas homogêneas. As precisões das estimativas obtidas em cada uma das hipóteses são comparadas com base num experimento de Monte-Carlo.

## INTRODUÇÃO

Como os dados hidrológicos só são coletados em alguns locais e são em geral de curta duração, é necessário o emprego de técnicas de transferência espacial de informação (regionalização) para a obtenção de estimadores de mínima variância das propriedades hidrológicas nos locais de interesse (exemplo: vazão média e vazão milenar). Um exemplo é o "index-flood approach" (Dalrymple, 1960) que considera para uma dada região uma única distribuição de probabilidades para as vazões máximas anuais divididas por um fator de escala, usualmente a média das vazões máximas.

Uma característica comum a todas técnicas de análise regional é a utilização do conceito de região hidrológicamente homogênea. No entanto devido a natural variabilidade de condições climáticas, topográficas e mesmo hidráulicas, cuidados especiais devem ser tomados na delimitação de uma região.

Langbein (1947), NERC (1975) e Damázio et al (1983) desenvolveram testes estatísticos a partir da hipótese nula da homogeneidade hidrológica de um conjunto de postos fluviométricos tentativamente agrupados numa região. Em todos estes testes a hipótese de homogeneidade é rejeitada caso as eventuais diferenças apresentadas pelos registros não possam ser consideradas como provenientes de variação amostral. Nestes casos, seria recomendável a subdivi-

<sup>1</sup> Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPTEL, Rio de Janeiro

<sup>2</sup> Professor visitante da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

são da região. No entanto, devido a pouca disponibilidade de dados, raramente a hipótese nula pode ser rejeitada e muitas vezes a subdivisão da região é mesmo assim feita a partir de outras informações, julgadas pelo hidrólogo como determinantes para a estimação da propriedade hidrológica em questão. Por exemplo, a mudança de declividade ao longo do curso principal de uma bacia tem sido usada para dividi-la em estudos de regionalização de cheias.

Por outro lado, de acordo com NERC (1975), a excessiva subdivisão tem basicamente duas desvantagens:

- i) Se duas regiões adjacentes fornecem resultados muito diferentes, qual a estimativa que se deve usar para locais na fronteira?
- ii) Pode acontecer que a regionalização adotada acabe fazendo com que a disponibilidade de dados de algumas sub-regiões seja extremamente reduzida prejudicando a confiabilidade das estimativas desta área.

Na prática a subdivisão da região só deve ser adotada caso se já esperada uma redução da variância dos estimadores.

#### O PROCEDIMENTO DE REGIONALIZAÇÃO USADO

Seja uma região onde existem  $m$  postos fluviométricos e considere que as funções de distribuições de probabilidades das vazões máximas anuais em cada posto  $i$  deste conjunto são bem representadas por distribuições Wakeby escritas como:

$$q_i(T) = m_i + a_i \left(1 - \left[\frac{1}{T}\right]^{b_i}\right) - c_i \left(1 - \left[\frac{1}{T}\right]^{-d_i}\right) \quad (1)$$

onde  $q_i(T)$  é o valor de população da vazão máxima anual, no posto  $i$ , com tempo de retorno de  $T$  anos e  $I_i = (m_i, a_i, b_i, c_i, d_i)$  é o conjunto de parâmetros da distribuição de Wakeby específica do  $i$ -ésimo posto. O uso da distribuição de Wakeby generaliza suficientemente a análise já que, de acordo com Henriques (1979) esta distribuição pode assumir a forma de diversas distribuições clássicas (gama, lognormal, Gumbel) através de escolhas adequadas dos seus parâmetros.

De acordo com a abordagem do "index-flood approach" admite-se uma única distribuição de probabilidades para as vazões máximas anuais adimensionais (divididas por seus valores médios  $\bar{q}_i$ ) dada por:

$$x_i(T) = \frac{q_i(T)}{\bar{q}_i} = m + a \left(1 - \left[\frac{1}{T}\right]^b\right) - c \left(1 - \left[\frac{1}{T}\right]^{-d}\right) \quad (2)$$

Muito embora esta hipótese implique na homogeneidade, pouco plausível, de todos os coeficientes adimensionais (exemplo: coeficientes de variação, assimetria e curtose) das distribuições de probabilidades de vazões máximas anuais em (1), espera-se que a variabilidade destes coeficientes possa ser suficientemente reduzida por uma delimitação bem feita das sub-regiões homogêneas.

Definidas as sub-regiões homogêneas deve-se estimar para cada sub-região a partir das séries históricas de máximos anuais dos seus postos uma relação entre vazão adimensional e tempo de retorno,  $x(T)$ . NERC (1975) adota um método gráfico que consiste na "plotagem" em papel Gumbel de todas as séries de vazões máximas adimensionais da região. A seguir divide-se o eixo das probabilidades em diversos intervalos e em cada um obtém-se um ponto com coordenadas iguais às médias das coordenadas de todos os seus pontos. Com esses pontos médios traça-se a olho uma curva que então é usada para ajustar-se uma equação da forma:

$$\bar{x}(T) = a + b \exp(cy) \quad (3)$$

$$y = -\ln(-\ln\left(\frac{T-1}{T}\right)) \quad (4)$$

Uma crítica que pode ser feita ao uso do método gráfico é o alto grau de subjetividade do traçado da curva, recomendando-se portanto um método automático como o sugerido por Wallis (1980).

- 1 - Ordene os dados de cada posto no vetor  $(q_1, q_2, \dots, q_n), q_1 < q_2 < \dots < q_n$ .
- 2 - Calcule para cada posto as estimativas dos "probability weighted moments",  $M_k$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, 4$ .

$$M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i (1 - F_i)^k \quad (5)$$

$$F_i = \frac{i - 0,35}{n} \quad (6)$$

- 3 - Padronize os  $M_k$  de cada posto fazendo  $M_k = M_k / M_0$ . Notar que se os dados já foram divididos pela média esta etapa é dispensável.
- 4 - Obtenha os valores regionais de  $M_k$  calculados pela média dos  $M_k$ 's de cada posto ponderados pelo número de observações das séries.
- 5 - Dados os valores regionais de  $M_k$  obtenha as estimativas  $(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}, \bar{m})$  dos parâmetros de uma distribuição Wakeby pelo algoritmo designado por Landwehr et al (1979) como, "caminho  $\{V_m, m=0\}$ ".

6 - As estimativas são fornecidas então pela aplicação da equação (2):

$$\bar{x}(T) = \bar{m} + \bar{a} (1 - [\frac{1}{T}]^b) - \bar{c} (1 - [\frac{1}{T}]^{-d}) \quad (7)$$

Damázio (1983) sugere o uso de uma distribuição exponencial com média 1, ajustada pelo método dos momentos, para o traçado da curva regional. Por esta abordagem é preciso apenas calcular um coeficiente de variação regional,  $\overline{CV}$  através das fórmulas:

$$\overline{CV} = \left( \frac{\sum_{j=1}^m (n_j - 1) CV_j^2}{\sum (n_j - 1)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$CV_j = \left( \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} \left[ \frac{q_{i,j} - \bar{q}_j}{\bar{q}_j} \right]^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

sendo  $q_{i,j}$ ,  $i=1, \dots, n_j$ , os valores da série do  $j$ -ésimo posto,  $\bar{q}_j$  a média dos  $n_j$  valores desta série e  $n_j$  o número de elementos. As estimativas devem ser então obtidas por:

$$\bar{x}(T) = 1 - \overline{CV} [1 + \ln(\frac{1}{T})] \quad (10)$$

A idéia básica de todos estes métodos é de que cada amostra individual, difere da curva de frequência da população (2), devido a variações amostrais. Entretanto adotando-se valores médios (pontos médios,  $M$ 's médios ou o coeficiente de variação médio) pode-se reduzir esta variação. Esta técnica será tão mais eficiente quanto mais independentes forem as séries disponíveis.

A figura 1 compara as curvas obtidas pelos métodos de Wallis (distribuição regional Wakeby) e Damázio (distribuição regional exponencial) com os pontos médios obtidos de acordo com NERC (1975) usando dados de nove postos fluviométricos da bacia do alto-Tocantins. Como se pode notar as duas curvas apresentam basicamente o mesmo ajuste aos pontos amostrais mas diferem significativamente na região da extrapolação. Como o propósito deste trabalho não é descobrir qual destes métodos é o melhor e sim investigar a conveniência de se subdividir a região, adotou-se simplesmente o método de Wallis.

Qualquer que seja o método usado para a obtenção da curva regional, o cálculo de vazões extremas para qualquer local da região exige ainda que se multiplique o valor obtido na curva regional por uma estimativa da média da vazão máxima anual no local:

$$\bar{q}_i(T) = \bar{q}_i \bar{x}(T) \quad (11)$$

Na prática,  $\bar{q}_i$  pode ser estimado com os dados no local (quando disponíveis) ou a partir de regressões com variáveis climáticas e fisiográficas. Matalas e Gilroy (1968) discutem a confiabilidade de de cada uma dessas estimativas. Neste estudo adotou-se as estimativas locais.

#### APLICAÇÃO AO RIO IGUAÇU

Neste estudo foram usados os dados de sete postos fluviométricos da bacia do rio Iguaçu listados na tabela 1. O método de Wallis, referido no item anterior, foi então aplicado para a estimação de uma curva regional representativa das distribuições de probabilidades de vazões máximas anuais adimensionais destes sete postos. Assumindo-se como hipótese a distribuição de Wakeby ajustada aos sete postos, nenhuma das sete séries pode ser rejeitada no teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 10%, justificando em termos estatísticos a não subdivisão da bacia. Por outro lado, de acordo com Ramos (1975) a bacia do rio Iguaçu apresenta uma divisão de comportamento explicada qualitativamente pelo perfil do rio cuja declividade até o local de Porto Vitória é menor do que a do trecho de jusante. Além disso existem diferenças importantes nos aspectos de pluviometria e tipo de solo entre as partes superior e inferior da bacia. Sugere-se portanto subdividir os sete postos da tabela 1 em duas regiões: região 1 formada pelos primeiros quatro postos e região dois pelos outros três.

O método proposto por Wallis foi então aplicado separadamente para cada uma das regiões. A aplicação dos testes de Kolmogorov-Smirnov também não rejeitou nenhuma das séries ao nível de significância de 10%.

Na tabela 2 apresenta-se os coeficientes de variação e assimetria e vazões adimensionais para diversos tempos de retorno da Wakeby ajustada sem subdivisão da região e das Wakeby's ajustadas separadamente para cada sub-região. Como se pode notar, para todas as características a distribuição ajustada sem subdivisão se situa entre os valores correspondentes das distribuições particulares de cada região. A figura 2 compara estas curvas regionais com os pontos médios obtidos de acordo com NERC (1975) separadamente para cada sub-região.

#### O ESTUDO DE MONTE-CARLO

Para a avaliação da influência na confiabilidade das estimativas de vazões extremas da subdivisão dos sete postos da tabela 1 em dois grupos foi desenvolvido um experimento de Monte-Carlo com posto pelos seguintes passos:

- 1 - Para cada uma das duas Wakeby ajustadas separadamente foi gerada uma série com um número muito grande de valores (400.000 para a primeira e 300.000 para a segunda).
- 2 - A seguir a série da primeira Wakeby foi dividida em quatro sub-séries, representando cada uma um dos postos desta região. A série

da segunda Wakeby foi também dividida em três subséries, representando cada uma um dos postos desta região. Estas séries podem então ser consideradas como uma amostra de 100.000 anos de vazões máximas plausível de ocorrer nos sete postos da bacia, desde que não acha correlação entre as vazões máximas destes postos.

- 3 - Esta série de 100.000 anos é então seguidamente dividida em  $ng$  sub-amostras de mesmo tamanho.
- 4 - Para cada sub-amostra o método de Wallis é então aplicado para estimar uma Wakeby conjunta para os sete postos e duas Wakeby's específicas de cada sub-região.
- 5 - Através das médias amostrais obtém-se então as estimativas das vazões de tempo de retorno de 10, 100 e 1000 anos para cada um dos postos usando-se tanto a curva regional de toda a área obtida no item anterior como as curvas regionais específicas de cada sub-região obtidas também no item anterior.
- 6 - A partir deste conjunto de estimativas de todas as sub-amostras, para cada opção, com divisão ou sem divisão da bacia, foi calculado o erro médio absoluto, EMA, da estimativa das vazões de cada tempo de retorno, através da fórmula:

$$EMA(T) = \frac{1}{7ng} \sum_{l=1}^{ng} \sum_{i=1}^7 \left| \frac{q_i(T) - \bar{q}_i(T)}{q_i(T)} \right| \quad (12)$$

onde  $q_i(T)$  é o valor de população do  $i$ -ésimo posto, e que nesta experiência é perfeitamente conhecido e igual a um dos valores de  $x(T)$  da tabela 2 para as distribuições específicas de cada sub-região. Foram ainda estimadas, por frequência relativa, as probabilidades de sub-dimensionamento maior que 10% do valor de população.

As tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para  $N = 10, 20, 30$  e  $40$ . Pode-se notar que sob o ponto de vista do erro médio absoluto das estimativas dois métodos são praticamente equivalentes (tabela 3). A equivalência das duas abordagens é confirmada na análise dos resultados obtidos para as probabilidades de sub-dimensionamento (tabela 4).

No entanto a experiência feita acima descreve uma situação ideal em que admite-se a total independência entre os postos e portanto maior disponibilidade de informações. Esta situação está longe de ser a realidade, conforme pode ser visto na tabela 5, que apresenta a matriz de correlação para as séries de máximos anuais dos sete postos da tabela 1. Uma outra situação extrema ocorre se é admitida a total dependência entre os postos de cada região. Isto pode ser simulado usando-se em cada sub-amostra apenas uma série de cada região para estimar as distribuições regionais. As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados obtidos adotando-se esta modificação na experiência anterior. Os resultados neste caso mos-

tram alguma vantagem para a não subdivisão da área, vantagem esta que aumenta com o crescimento do tempo de retorno e diminui com o tamanho do registro disponível.

### CONCLUSÃO

A subdivisão de áreas em sub-regiões hidrologicamente homogêneas pode ser contraproducente nos casos de pouca disponibilidade de dados, necessidade de grandes extrapolações e alta correlação espacial das informações. Foi demonstrado que mesmo na bacia do rio Iguazu que tem registros de vazões máximos anuais que cobrem períodos do tempo da ordem de 40 anos e que apresenta evidências de heterogeneidade hidrológica não existe vantagem na subdivisão.

### AGRADECIMENTOS

Este artigo resulta das atividades de pesquisa do projeto CEPTEL-7275 que recebe o apoio do Departamento de Estudos Energéticos da ELETROBRÁS.

### REFERÊNCIAS

- DALRYMPLE, T., Flood Frequency Analysis, U.S., Geological Survey, Water Supply paper 1543-A, 1960.
- DAMAZIO, J.M.; MOREIRA, J.C.; COSTA, J.P.; KELMAN, J.; Seleção de Método para Estimação de Vazões com Tempos de Retorno Elevados, Relatório Técnico CEPTEL nº 156/83, 1983.
- DAMAZIO, J.M.; Revisão da Curva Regional de Vazões Máximas Anuais na Bacia do Alto Tocantins, Relatório Técnico CEPTEL, 1983
- HENRIQUES, A.N.F.G., Modeling Flood Frequency Relationships Using Lambda Distributions, Tese de Doutorado Apresentada a Graduate School of Cornell University, 1979.
- LANGBEIN, W.B., Topographic Characteristics of Drainage Basins, U.S. Geol. Surv., paper 968-C, 1947.
- MATALAS, N.C., GILROY, J., Some Comments on Regionalization in Hydrologic Studies, Water Resources Research, vol. 4, nº 6, Dezembro, 1968.
- NERC, Flood Studies Report, Natural Environmental Research Council London, 1975.
- RAMOS, F.; Estudos Hidrológicos na Bacia do rio Iguazu, Comunicação 01, Frequência de Cheias, HG-35, Curitiba, 1975.

CÓDIGO DO DNAEE	NOME DA ESTAÇÃO	RIO	AREA DE DRENAGEM (Km²)	NÚMERO DE ANOS
65035000	Porto Amazonas	Iguaçu	3600	45
65095000	Rio Preto do Sul	Negro	3270	29
65100000	Rio Negro	Negro	4100	47
65155000	São Bento	Várzea	1670	47
65310000	União da Vitória	Iguaçu	24800	52
65895002	Salto Osório	Iguaçu	46400	39
65993000	Salto Cataratas	Iguaçu	68500	35

Tabela 1 - Postos Fluviométricos Utilizados

CARACTERÍSTICA	CV	ASSIMETRIA	x(10)	x(100)	x(1000)
Sem sub-divisão	0.41	1.36	1.52	2.35	3.23
Região 1	0.39	1.04	1.50	2.20	2.83
Região 2	0.45	1.86	1.54	2.54	3.79

Tabela 2 - Características de Curvas Regionais Ajustadas para a Bacia do Rio Iguaçu.  
(CV = Coeficiente de Variação)

T	10		100		1000	
	SS	CS	SS	CS	SS	CS
10	0,11	0,12	0,15	0,16	0,23	0,26
20	0,08	0,08	0,12	0,13	0,23	0,24
30	0,07	0,07	0,11	0,10	0,21	0,21
40	0,06	0,06	0,10	0,09	0,19	0,19

Tabela 3 - Erro Médio Absoluto - Independência  
(SS - Sem Sub-divisão, CS - Com sub-divisão)

T	10		100		1000	
	SS	CS	SS	CS	SS	CS
10	0.20	0.22	0.25	0.27	0.35	0.36
20	0.15	0.17	0.18	0.20	0.25	0.25
30	0.10	0.12	0.16	0.16	0.23	0.22
40	0.08	0.09	0.15	0.14	0.24	0.21

Tabela 4 - Probabilidade de Sub-Dimensionamento > 10%  
Independência (SS- sem subdivisão, CS- com subdivisão)

1.00	0.69	0.68	0.85	0.78	0.63	0.52
0.69	1.00	0.95	0.79	0.80	0.49	0.41
0.68	0.95	1.00	0.80	0.79	0.51	0.45
0.85	0.79	0.80	1.00	0.69	0.55	0.41
0.78	0.80	0.79	0.69	1.00	0.77	0.71
0.63	0.49	0.51	0.55	0.77	1.00	0.91
0.52	0.41	0.45	0.41	0.71	0.91	1.00

Tabela 5 - Matriz de Correlação das Séries de Vazões  
Máximas Anuais dos sete Postos Fluviométricos  
da Tabela 1

T	10		100		1000	
	SS	CS	SS	CS	SS	CS
10	0.12	0.14	0.20	0.24	0.35	0.45
20	0.09	0.10	0.16	0.19	0.35	0.42
30	0.07	0.08	0.15	0.17	0.33	0.37
40	0.07	0.07	0.13	0.15	0.30	0.33

Tabela 6 - Erro Médio Absoluto. Dependência (SS- sem sub  
divisão, CS- com subdivisão)

T	10		100		1000	
	SS	CS	SS	CS	SS	CS
10	0.24	0.30	0.31	0.38	0.39	0.42
20	0.19	0.24	0.25	0.33	0.30	0.35
30	0.14	0.18	0.23	0.31	0.28	0.34
40	0.11	0.14	0.21	0.28	0.28	0.33

Tabela 7 - Probabilidade de Sub-Dimensionamento > 10%  
Dependência (SS- sem subdivisão, CS- com subdivisão)

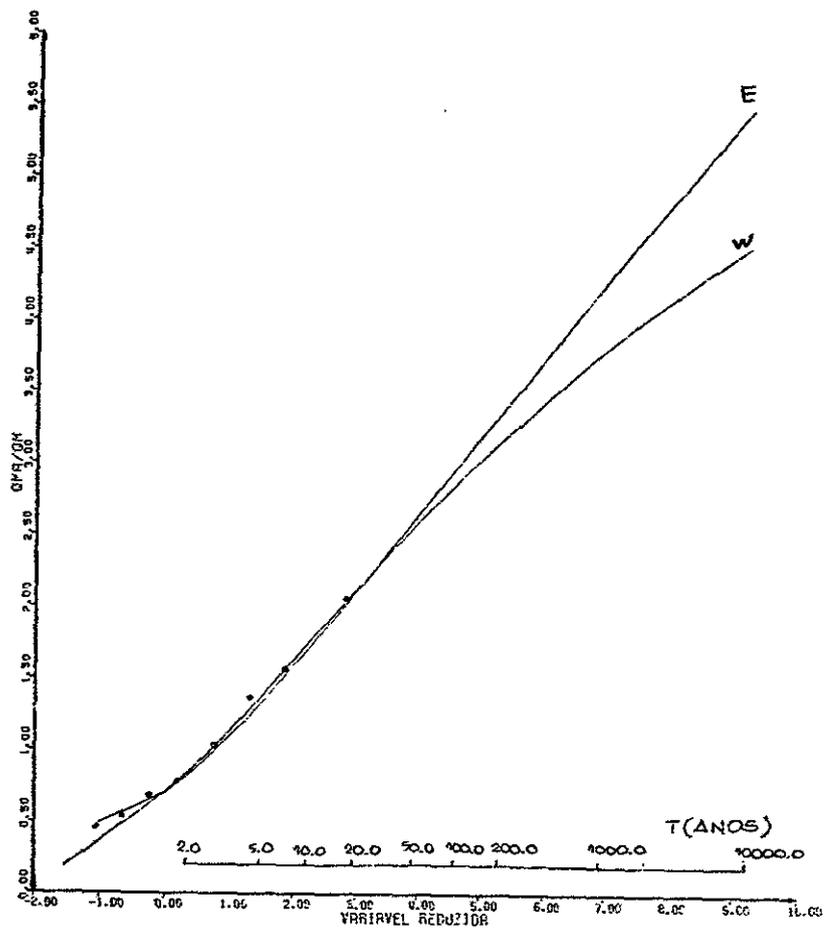


Figura 1 - Distribuição Wakeby (W) e Exponencial (E)  
Ajustadas para o Alto-Tocantins

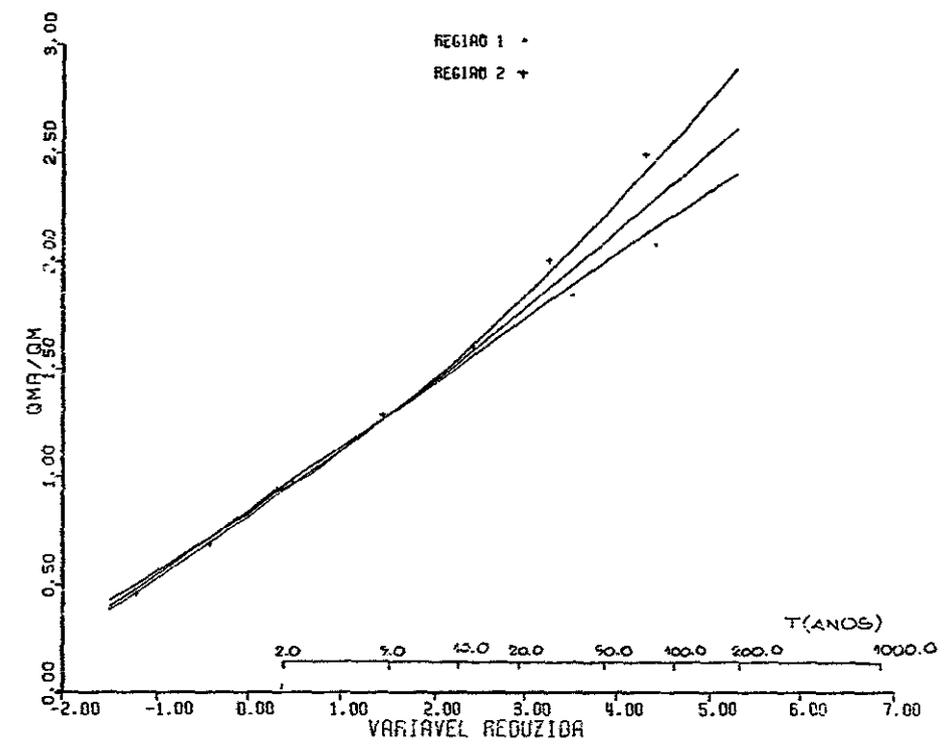


Figura 2 - Curvas Regionais para a Bacia do Rio Iguaçu