

MODELAGEM ESTOCÁSTICA DA PRECIPITAÇÃO NA AMAZÔNIA

Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva

HDS – CT – UFSM - Camobi
97119-900 Santa Maria, RS – Fone (055) 220 8483 – FAX (055) 226 2166
eloiza@safira.ct.ufsm.br

Robin Thomas Clarke

IPH – UFRGS – Av. Bento Gonçalves, 9500 – Caixa Postal 15029
91501-970 – Porto Alegre, RS – Fone (051) 316 6621 – FAX (051) 336 0457
clarke@if1.if.ufrgs.br

RESUMO

Foram ajustados modelos estocásticos de precipitação na Amazônia, utilizando registros diários de 402 estações pluviométricas, operadas pelo DNAEE. A ocorrência de chuva foi modelada através de cadeias de Markov não estacionárias, e para a quantidade de chuva adotou-se a distribuição gama, com parâmetros variando com o dia do ano. As probabilidades foram relacionadas a funções harmônicas do tempo através de Modelos Lineares Generalizados. Os coeficientes do modelo foram mapeados utilizando interpolação Kriging. Para a verificação do modelo, foram utilizadas 5 estações, as quais não foram usadas no ajuste das isolinhas. Os resultados demonstraram a característica convectiva da chuva e a influência da flutuação sazonal da ZCIT, no regime de precipitação da Amazônia.

INTRODUÇÃO

Os modelos estocásticos de precipitação apresentam uma importante contribuição nos projetos de recursos hídricos, possibilitando a exploração dos registros disponíveis, geralmente curtos e insuficientes. Existem aplicações importantes de modelos estocásticos no cálculo de relações de recorrência aplicadas ao planejamento agrícola e na avaliação do nível de risco. A utilização de tais modelos na geração de séries sintéticas permite criar situações críticas não observadas, que poderiam fazer parte de um registro mais longo. Além disso, os parâmetros ajustados podem ser úteis na

avaliação do regime de chuva do local, uma vez que eles podem representar um passo intermediário na determinação de características climáticas da região.

Apesar da importância e aplicabilidade destes modelos, seu ajuste é bastante trabalhoso e as séries de registros históricos são muitas vezes insuficientes. Para atenuar tais dificuldades foram traçadas isolinhas dos coeficientes ajustados na região Amazônica, permitindo uma estimativa dos coeficientes de ajuste e sua aplicação ao local de interesse. Além da obtenção dos coeficientes de ajuste, as isolinhas salientaram os diferentes regimes de precipitação da região.

DADOS UTILIZADOS

Foram utilizados registros históricos diários de 402 estações pluviométricas do DNAEE, na região Amazônica. Estas estações possuem registro superior a 5 anos, com uma média de 10,4 anos de dados. Foram selecionadas 48 estações, com registro superior a 15 anos de dados, para traçar as isolinhas dos coeficientes de ajuste. A Figura 1 apresenta a localização das estações pluviométricas, destacando-se as 48 estações com registro superior a 15 anos e as 5 estações utilizadas para verificação do ajuste.

O MODELO AJUSTADO

O modelo de precipitação ajustado foi proposto por Stern e Coe (1982, 1984). Este modelo é dividido em duas partes: ocorrência de precipitação e quantidade precipitada.

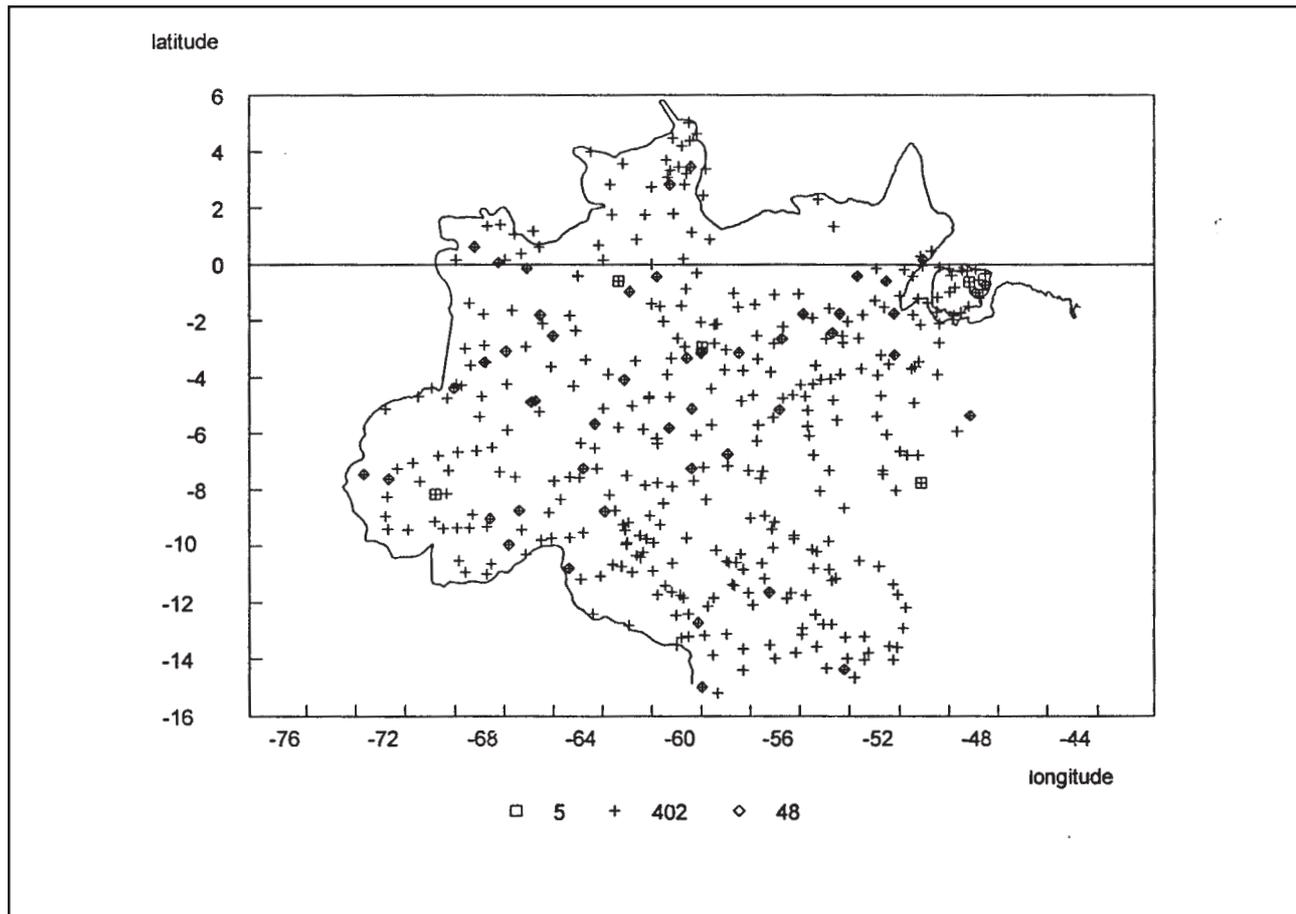


Figura 1. Localização das estações pluviométricas (402), destacando-se as as estações utilizadas no traçado de isolinhas (48) e as estações utilizadas para verificação do ajuste (5).

Modelo de ocorrência de precipitação

O modelo de ocorrência utiliza cadeias de Markov de primeira ordem com estados (seco e chuvoso), sendo as probabilidades de transição fornecidas por:

$$p_i = p_{i1} = p[J(t) = 1 | J(t-1) = i] \quad (1)$$

e avaliadas por:

$$r_i(t) = \frac{n_{i1}(t)}{n_{i0}(t) + n_{i1}(t)} \quad (2)$$

onde t: dia do ano (1...365); i = 0,1 (seco, chuvoso); J(t): estado do dia t; n_{ij}(t): número de dias observados com J(t)=j, J(t-1)=i.

As probabilidades são ajustadas a uma função logística, sendo a variação no tempo

considerada através de série de Fourier, conforme as seguintes equações:

$$p_i(t) = \frac{\exp(g_i(t))}{1 + \exp(g_i(t))} \quad (3)$$

$$g_i(t) = a_{i0} + \sum_{k=1}^2 [a_{ik} \cdot \cos(k.A) + b_{ik} \cdot \text{sen}(k.A)] \quad (4)$$

onde A = 2.π.t / 365; a_{i0}, a_{ik}, b_{ik} são coeficientes de ajuste.

Esta forma simplificada diminui o esforço computacional e reduz o número de parâmetros envolvidos. Como o regime de precipitação neste local é dominado por processos convectivos, as cadeias de Markov de primeira ordem fornecem bons resultados.

Os parâmetros de ajuste do modelo foram mapeados utilizando interpolação kriging, utilizando relações na forma:

$$\ln \frac{p_{0i}(t)}{1 - p_{0i}(t)} = a_{i0} + a_{i1} \cdot \cos(A) + b_{i1} \cdot \sin(A) \tag{5}$$

$$\ln \frac{p_{0i}(t)}{1 - p_{0i}(t)} = a_{i0} + D_i \cdot \cos[A + E_i]$$

onde:

$$D_i = \sqrt{a_{i1}^2 + b_{i1}^2}$$

$$E_i = \tan^{-1}(-b_{i1}/a_{i1})$$

Tais relações permitem obter uma análise no domínio da frequência, com período de um ano. O termo a_{i0} representa a constante do modelo, D_i a amplitude e E_i o ângulo de fase. Neste procedimento não são considerados os coeficientes a_{i2} e b_{i2} , uma vez que eles apresentam um peso pequeno no processo.

Modelo de quantidade precipitada

A quantidade precipitada é modelada pela distribuição gama, conforme equações abaixo, e a dependência do tempo é obtida por série de Fourier, da forma da Equação (4).

$$f(x) = \left(\frac{\kappa}{\mu(t)} \right)^\kappa \cdot x^{\kappa-1} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{\kappa \cdot x}{\mu(t)}\right)}{\Gamma(\kappa)} \tag{6}$$

onde $\mu(t)$: precipitação média do dia t , representada por: $\log(\mu(t)) = g(t)$; κ : parâmetro de forma; $\Gamma(\kappa)$: função gama.

O parâmetro de forma κ , para cada estação, foi considerado inicialmente constante durante o ano, conforme equações abaixo, resolvidas iterativamente.

$$\ln(\kappa) - \psi(\kappa) = \frac{D^2}{2 \cdot \left(\sum_t n(t) - T \right)} \tag{7}$$

$$D^2 = 2 \cdot \sum_t n(t) \cdot (\ln \bar{x}(t) - \ln x(t)) \tag{8}$$

$$\overline{\ln x(t)} = \frac{\sum_t \ln x_m(t)}{\sum_t n(t)} \tag{9}$$

onde $\psi(\kappa)$: função digamma, $\psi(\kappa) = d(\ln \Gamma(\kappa))/d\kappa$, resolvida pelo algoritmo de Bernardo (1976), descrito em Moore (1982); $n(t)$: número de ocorrências de precipitação diária no dia t ; T : número de dias do período de ajuste; $\bar{x}(t)$: precipitação média do dia t ; $x_m(t)$: precipitação diária, nos anos $m=1 \dots n(t)$.

Foi realizada comparação deste parâmetro com sua estimativa aproximada, fornecida pela equação:

$$\kappa = \frac{\sum_t n(t) - T}{D^2} \tag{10}$$

A distribuição cumulativa foi avaliada pela integral gama incompleta, equação abaixo, e avaliada pelos algoritmos descritos por Moore (1982).

$$F(x) = I(x, \kappa) = \int_0^x f(x) dx = \frac{\Gamma\left(\kappa, \frac{\kappa \cdot x}{\mu(t)}\right)}{\Gamma(\kappa)} \tag{11}$$

onde:

$$\Gamma(x, \kappa) = \int_0^x e^{-u} \cdot u^{\kappa-1} \cdot du$$

Foi considerada a dependência da quantidade precipitada com o estado do dia anterior, através do ajuste do modelo à três séries de dados: 1ª) série do total precipitado, 2ª) série do total precipitado quando não choveu no dia anterior e 3ª) série do total precipitado quando choveu no dia anterior.

Aplicação dos modelos ajustados

Com a finalidade de verificar o comportamento do modelo estocástico de precipitação, foram selecionadas cinco estações pluviométricas, que não foram utilizadas no traçado das isolinhas de coeficientes de ajuste, distribuídas na região de estudo e com período de registro próximo a 15 anos (ver Figura 1). A precipitação diária foi simulada considerando três conjuntos diferentes de coeficientes de ajuste:

1. Parâmetros do modelo obtidos pelo ajuste dos dados da estação pluviométrica analisada, considerando os termos do primeiro e segundo harmônico da série de Fourier. Nos parâmetros de quantidade precipitada foi considerada a dependência do estado do dia anterior, através da consideração do ajuste dos parâmetros às séries 2 e 3, dos totais precipitados quando não choveu no dia anterior e quando choveu no dia anterior, respectivamente;
2. Parâmetros do modelo obtidos pelo ajuste dos dados da estação pluviométrica analisada, considerando somente os termos do primeiro harmônico da série de Fourier. Nos parâmetros de quantidade precipitada não foi considerada a dependência do estado do dia anterior.
3. Parâmetros do modelo obtidos por interpolação das isolinhas dos coeficientes D_i e E_i , Equação (5), para ocorrência e quantidade precipitada, e parâmetro de forma κ . No traçado das isolinhas foram utilizadas 48 estações, com mais de 15 anos de registro, diferentes das estações utilizadas na verificação do modelo (ver Figura 1). Vale ressaltar, que nestes coeficientes de ajuste foi considerado somente os termos do primeiro harmônico da série de Fourier e nos parâmetros de quantidade precipitada não foi considerado a dependência do estado do dia anterior, que são considerações semelhantes às do item 2.

O período de simulação foi igual ao do registro histórico. Foram calculadas 9 séries e comparados os valores mensais medidos com os valores obtidos pela aplicação da simulação através das três formas de obtenção dos parâmetros.

O procedimento de geração inicia pela determinação das probabilidades de ocorrência de precipitação, dos totais precipitados sendo o dia anterior chuvoso (como definido no início do artigo) e dos totais precipitados sendo o dia anterior seco, em cada dia do ano, através das equações ajustadas. A seguir, são gerados dois números aleatórios, entre 0 e 1. A probabilidade de ocorrência de precipitação estimada é comparada ao primeiro número aleatório. Caso este seja inferior, não chove neste dia, passa-se então para o dia seguinte. Caso contrário, chove e procede-se ao cálculo da altura precipitada, considerando a ocorrência de chuva no dia anterior. A altura de precipitação gerada é obtida na distribuição de probabilidade acumulada teórica, utilizando-se o segundo número aleatório como valor da probabilidade. Para a geração dos números aleatórios foi utilizada uma rotina de cálculo, descrita em Clarke (1973).

RESULTADOS OBTIDOS

Modelo de ocorrência de precipitação

Os valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros do modelo de ocorrência de precipitação, considerando as 402 estações estão listados na Tabela 1. Pode-se constatar que os coeficientes do primeiro harmônico da série de Fourier: a_{01} , b_{01} , a_{11} e b_{11} são bastante superiores aos termos do segundo harmônico (a_{02} , b_{02} , a_{12} , b_{12}), o que se ajusta muito bem à existência de duas estações no ano, seca/chuvosa. A comparação dos parâmetros médios do ajuste considerando a ocorrência de chuva no dia anterior (a_{01} , b_{01} , a_{02} , b_{02}) e a não ocorrência de chuva no dia anterior (a_{11} , b_{11} , a_{12} , b_{12}) permite constatar que eles apresentam valores semelhantes. Este resultado indica a predominância de chuva convectiva na

Amazônia, uma vez que neste caso a probabilidade de ocorrência de precipitação tem pouca relação com o que ocorreu no dia anterior.

Tabela 1. Valores médios dos parâmetros de ajuste do modelo de ocorrência de precipitação, considerando 402 estações pluviométricas, com registro maior do que 6 anos.

Coeficiente	média	máximo	mínimo
a_{00}	-0,8180	0,5649	-3,7090
a_{01}	0,6178	2,5350	-1,5000
b_{01}	0,5061	1,7833	-0,6780
a_{02}	-0,1810	0,7070	-0,9720
b_{02}	-0,0700	0,6370	-0,5890
a_{10}	0,0315	1,4367	-1,3640
a_{11}	0,4162	2,3040	-1,1880
b_{11}	0,5296	1,7050	-0,3190
a_{12}	0,0054	0,6360	-0,6890
b_{12}	0,0001	0,6550	-0,4640

As Figuras 2 a 7 apresentam as isolinhas, dos parâmetros a_{00} , a_{10} , D_0 , D_1 , E_0 e E_1 . Estes gráficos são muito importantes, porque através deles, pode-se obter, por interpolação, estimativas dos parâmetros a_{00} , a_{10} , D_0 , D_1 , E_0 e E_1 em qualquer ponto da região, conseguindo, através da Equação (5), os valores dos

parâmetros a_{00} , a_{01} , b_{01} , a_{10} , a_{11} , b_{11} do modelo de ocorrência de chuva com um harmônico. No traçado das isolinhas foram consideradas somente as 48 estações com registro superior a 15 anos, devido a qualidade da interpolação obtida, uma vez que registros mais longos apresentam maior confiança na representatividade dos parâmetros ajustados. Observa-se um comportamento semelhante dos parâmetros correspondentes das séries cujo dia anterior é chuvoso e cujo dia anterior é seco. Os termos a_{00} e a_{10} , que representam a constante na análise de freqüência, apresentam seus menores valores na região sudeste da área em estudo. A amplitude (D_0 e D_1) apresenta um crescimento no sentido noroeste a sudeste, representando uma diferenciação mais marcante entre estação seca e chuvosa à sudeste do que à noroeste. Vale ressaltar, que grande parte da região sudeste da Amazônia, é coberta com cerrado e apresenta as maiores taxas de desmatamento. Com relação ao ângulo de fase (E_0 e E_1), observa-se linhas no sentido leste-oeste, indicando um comportamento diferenciado entre locais ao norte (valores mais positivos) e ao sul (valores mais negativos), que corresponde à migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

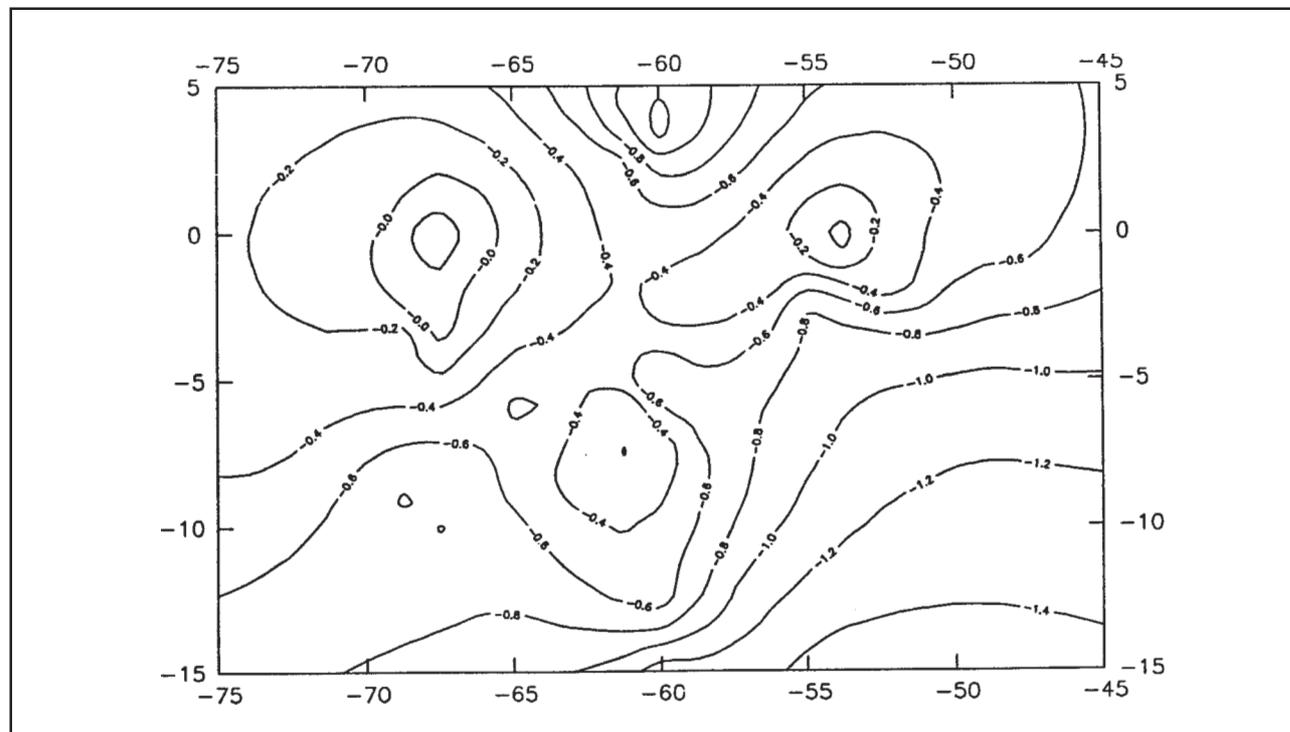


Figura 2. Isolinhas dos parâmetros a_{00} , do modelo de ocorrência de precipitação.

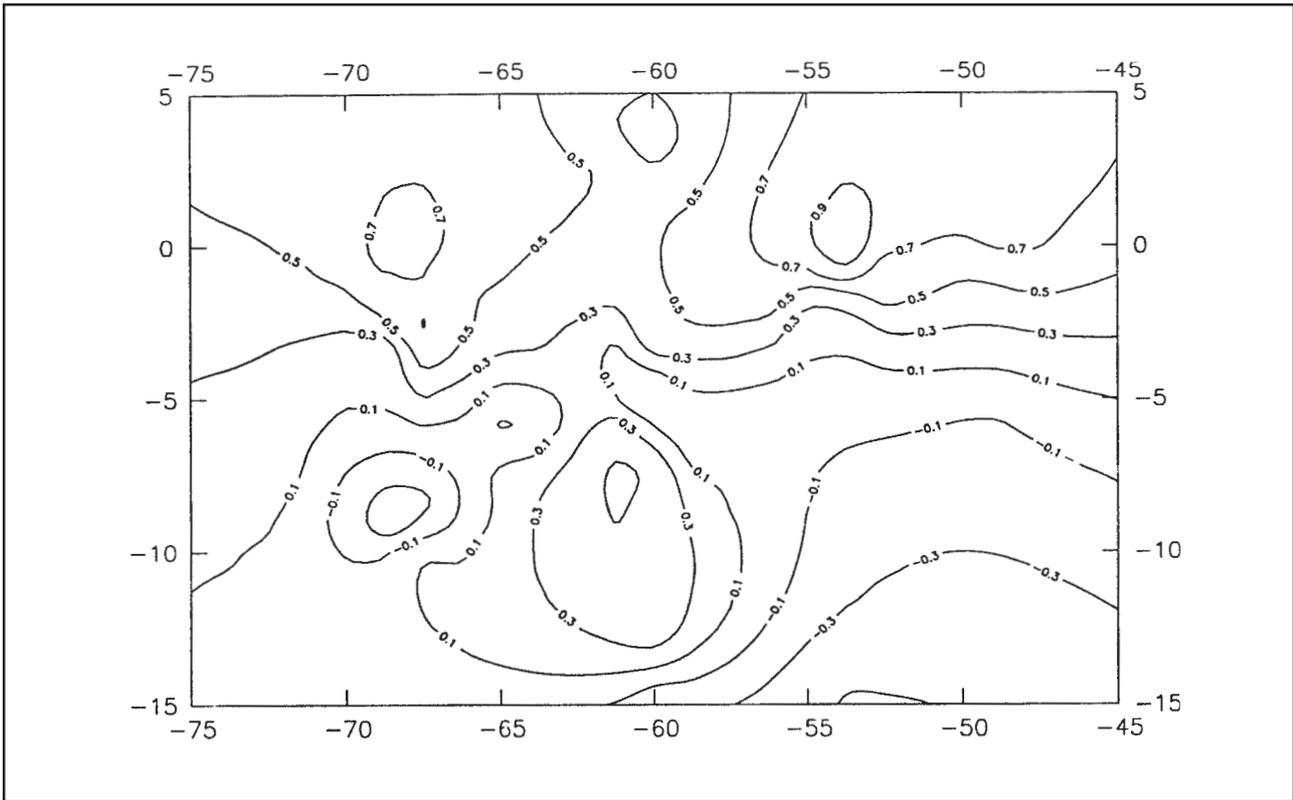


Figura 3. Isolinhas dos parâmetros a_{10} , do modelo de ocorrência de precipitação.

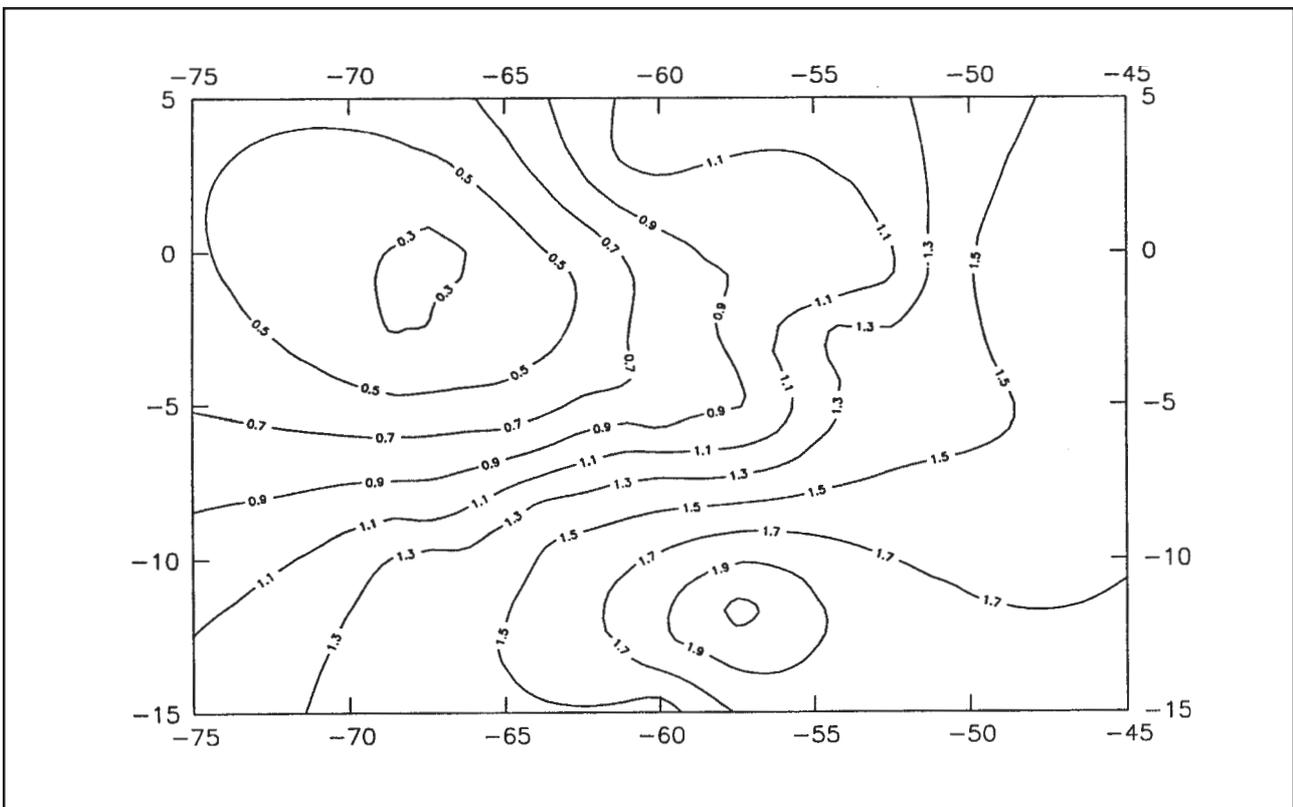


Figura 4. Isolinhas dos parâmetros D_0 , do modelo de ocorrência de precipitação.

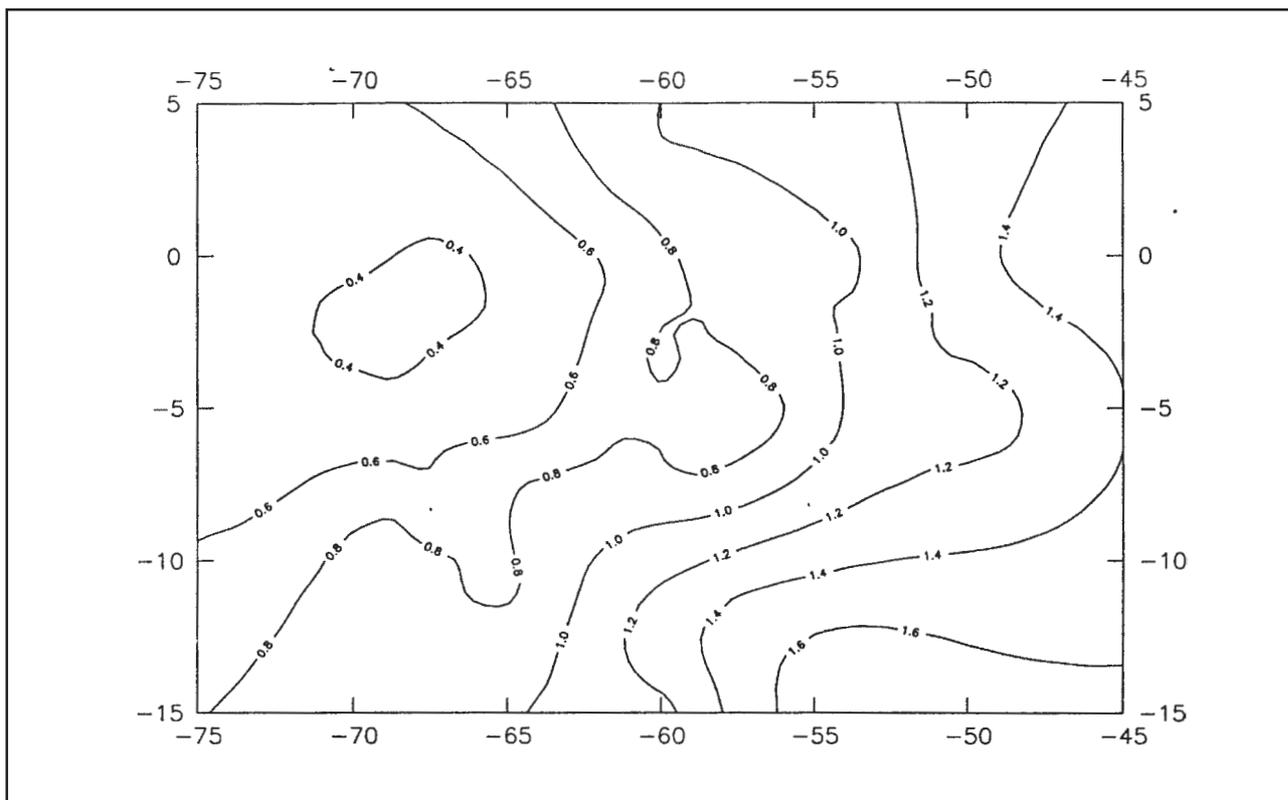


Figura 5. Isolinhas dos parâmetros D_1 , do modelo de ocorrência de precipitação.

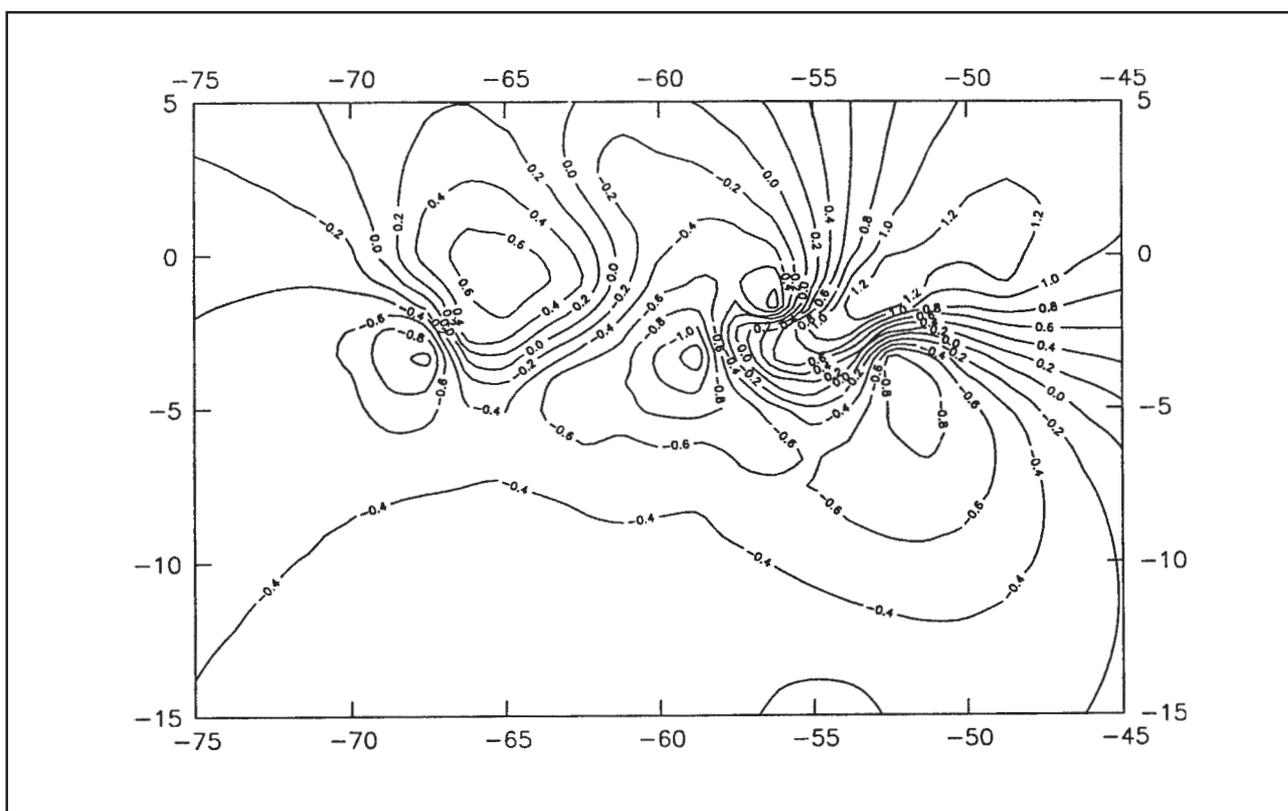


Figura 6. Isolinhas dos parâmetros E_0 , do modelo de ocorrência de precipitação.

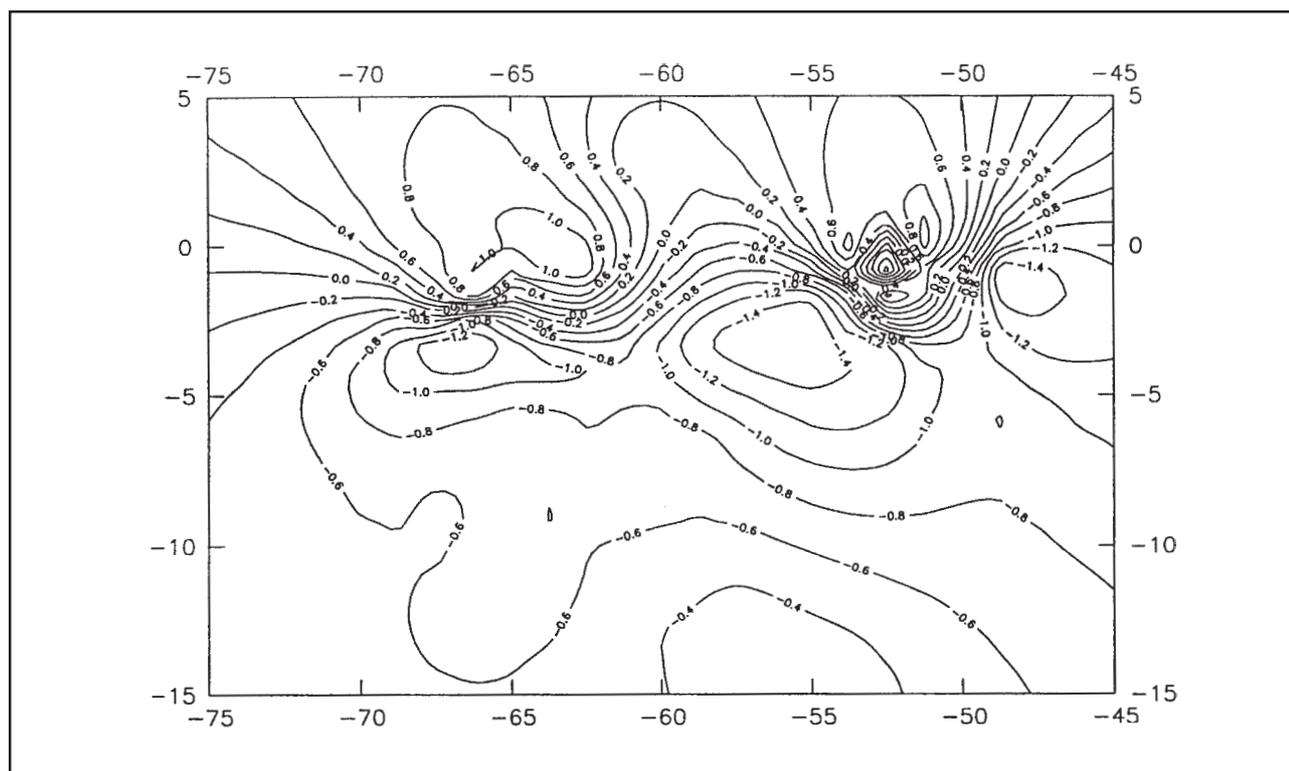


Figura 7. Isolinhas dos parâmetros E_1 , do modelo de ocorrência de precipitação.

Modelo de quantidade precipitada

A Tabela 2 apresenta os valores médios dos parâmetros do modelo de quantidade precipitada para as 402 estações. Observa-se que, em termos médios, os parâmetros de ajuste da variação cíclica, a_0 , a_1 , b_1 , a_2 e b_2 , são bastante semelhantes nas três séries. Estes resultados confirmam a constatação obtida no modelo de ocorrência de precipitação, da característica convectiva da precipitação neste local. A redução significativa dos termos do segundo ciclo em relação ao primeiro, indicam a predominância de uma estação seca e uma chuvosa. Com respeito ao parâmetro de forma κ , observa-se pequena variação entre as três séries, tornando-se mais acentuada na sua avaliação aproximada, $\kappa_{\text{aproximado}}$. A comparação dos valores do cálculo aproximado e cálculo iterativo, permite constatar sua diferença, que torna-se mais marcante nas séries 2 e 3. Estes resultados devem-se principalmente à redução do número de dados, prejudicando sua avaliação. Quando o número de dados é pequeno o cálculo iterativo não converge e o

cálculo aproximado produz resultados nem sempre adequados. Isto se deve ao aumento do erro relativo referente às pequenas quantidades de chuva registradas, que confirmam a constatação de Stern e Coe (1982, 1984). Por exemplo, na série 1, correspondente aos totais de precipitação tenha ou não ocorrido chuva no dia anterior, 3 valores não convergiram no cálculo de κ . Estes valores correspondem às estações com registro curto, entre 4,5 a 5 anos, porém não foi possível indicar este comprimento como limite para avaliação deste parâmetro, uma vez que grande número de estações, mais de 50, apresentaram comprimento de registro nesta faixa e convergiram no cálculo iterativo de κ .

As Figuras 8 a 11 apresentam as isolinhas dos parâmetros a , D e E , da análise dos termos a_0 , a_1 e b_1 no domínio da frequência e do parâmetro de forma da distribuição gama κ , calculado pelo método iterativo, considerando as 48 estações com registro superior a 15 anos. Estes gráficos são muito importantes, porque pode-se obter, por interpolação, estimativas dos parâmetros a , D

e E em qualquer ponto da região, obtendo-se, através da Equação (5), os valores dos parâmetros a_0 , a_1 e b_1 do modelo de quantidade precipitada com um harmônico. Verifica-se comportamento semelhante ao obtido no modelo de ocorrência de precipitação. O termo constante, a_0 , apresenta-se praticamente uniforme para toda a região. O termo de amplitude, D, apresenta um crescimento de oeste para leste, indicando uma maior distinção da quantidade precipitada entre estação seca e chuvosa. O ângulo de fase E apresenta comportamento diferenciado

no sentido norte-sul, correspondendo à migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical. Valores negativos localizam-se ao sul e leste. O parâmetro de forma κ apresenta linhas com valores mais elevados na área central. Esta área apresenta menor diferença entre estação seca e chuvosa em relação às demais e pequeno índice de desmatamento. Deixa-se de apresentar as figuras do parâmetro κ obtidas pelo método iterativo e as relativas às séries 2 e 3, uma vez que elas apresentam aspecto bastante semelhante.

Tabela 2. Parâmetros médios do modelo de quantidade precipitada.

		a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	$\kappa_{\text{aproximado}}$	$\kappa_{\text{iterativo}}$
SÉRIE 1: dia anterior seco/úmido	média	2,570	0,191	0,121	-0,070	-0,043	0,731	0,868
	máximo	3,206	0,804	0,760	0,157	0,265	2,131	2,275
	mínimo	1,657	-0,514	-0,350	-0,319	-0,384	-2,788	0,000
SÉRIE 2: dia anterior seco	média	2,573	0,203	0,114	-0,077	-0,046	0,109	0,569
	máximo	3,233	1,057	0,806	0,255	0,414	1,522	1,664
	mínimo	1,558	-0,636	-0,504	-0,443	-0,503	-28,691	0,000
SÉRIE 3: dia anterior úmido	média	2,548	0,196	0,132	-0,067	-0,044	0,303	0,642
	máximo	3,312	1,462	0,823	0,438	0,299	2,227	2,371
	mínimo	1,752	-0,926	-0,596	-0,574	-0,514	-21,678	0,000

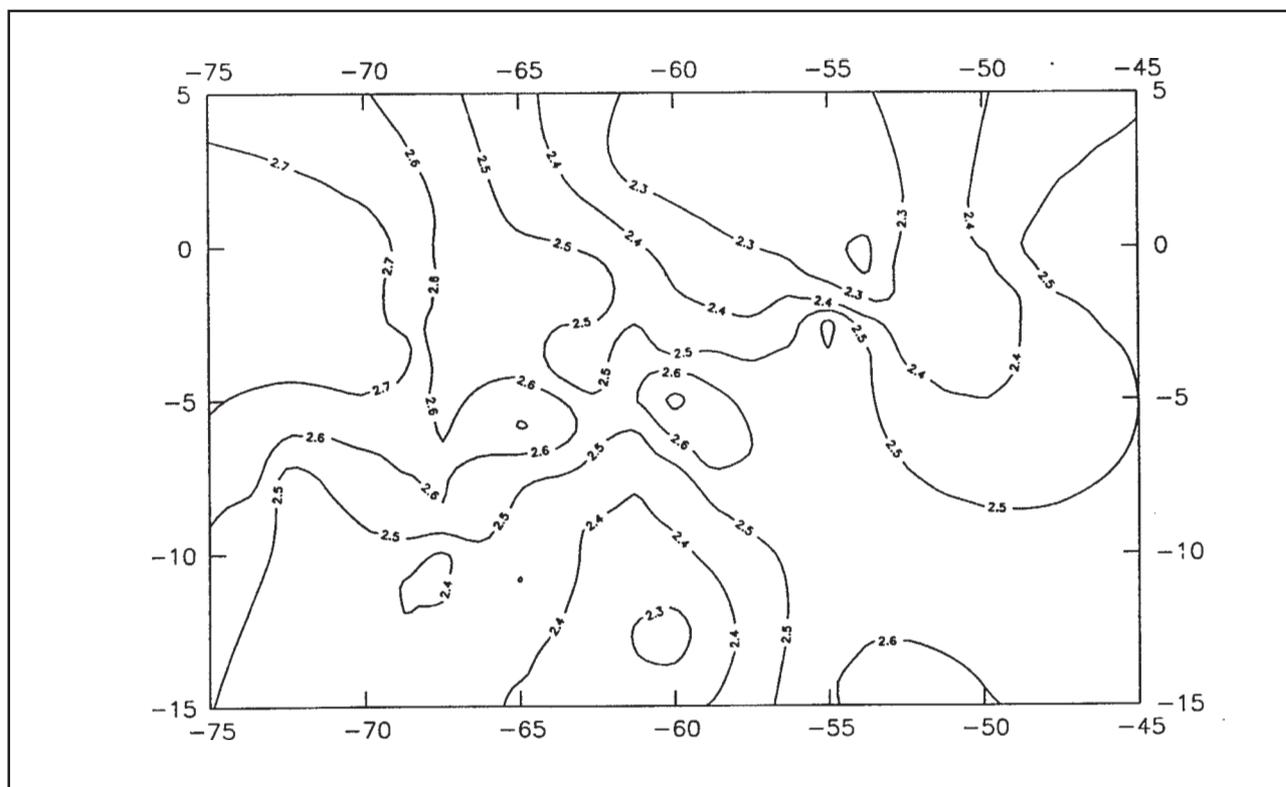


Figura 8. Isolinhas dos parâmetros a_0 , do modelo de quantidade precipitada.

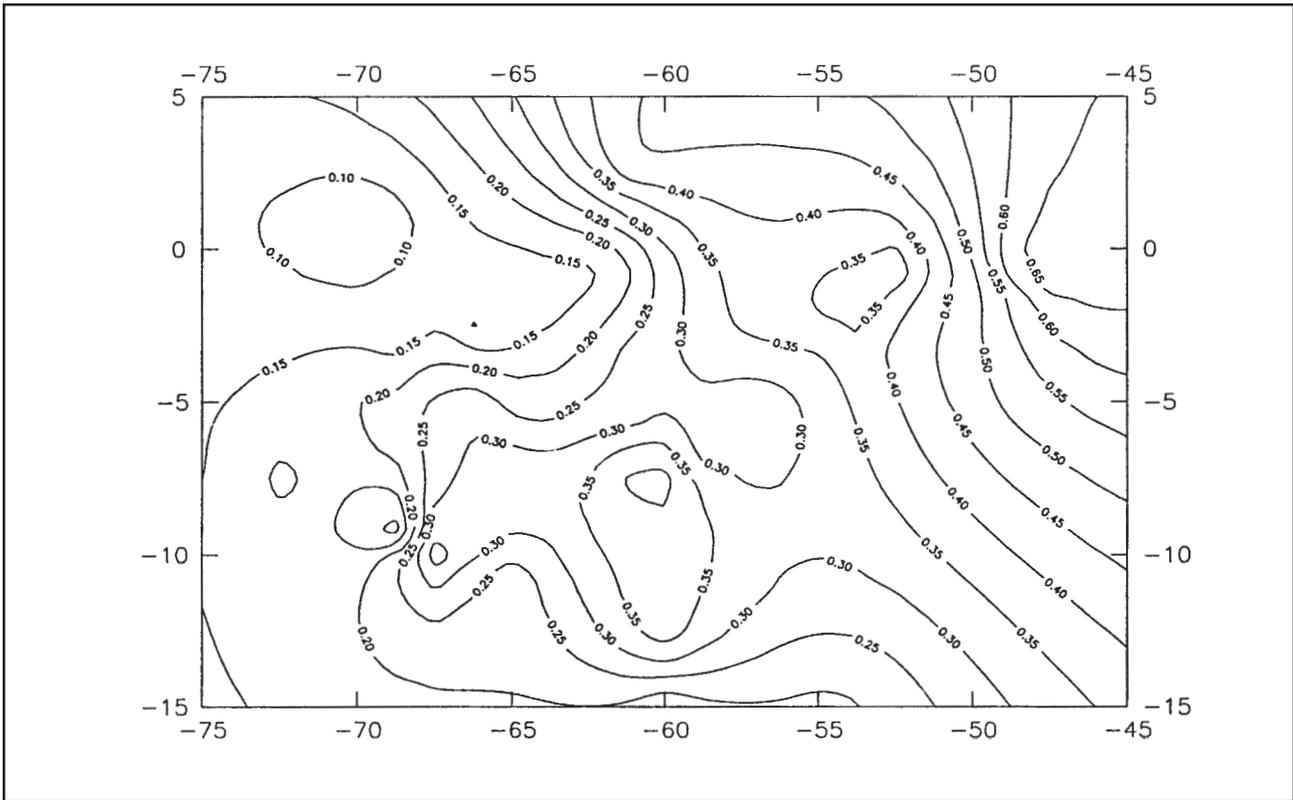


Figura 9. Isolinhas dos parâmetros D, do modelo de quantidade precipitada.

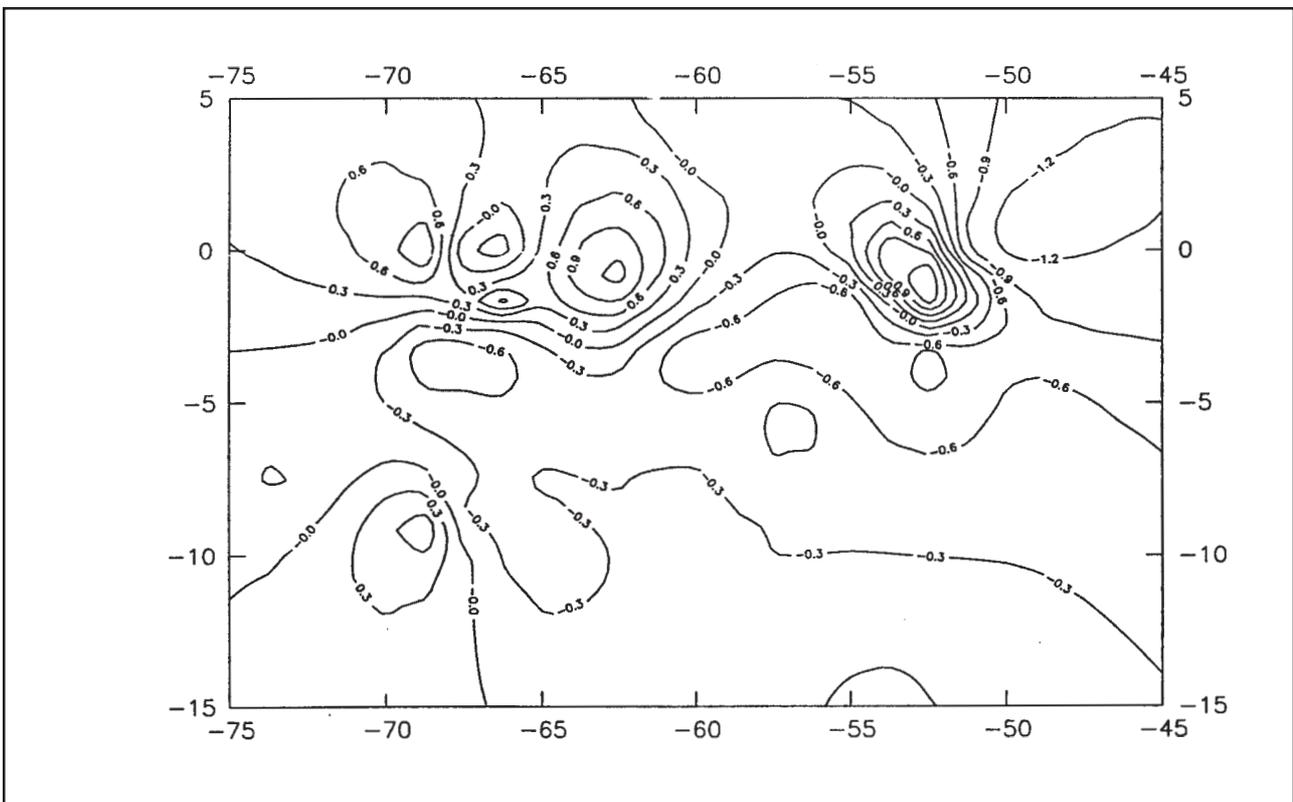


Figura 10. Isolinhas dos parâmetros E, do modelo de quantidade precipitada.

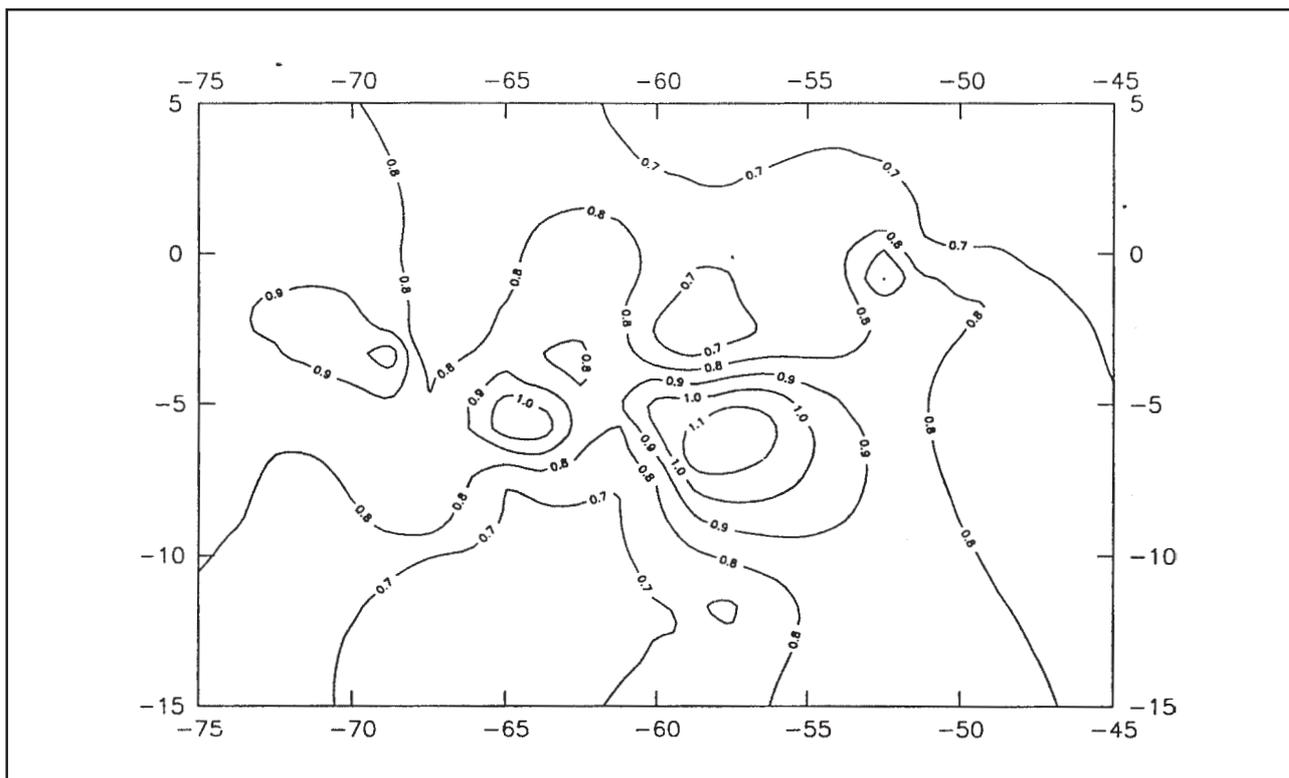


Figura 11. Isolinhas dos parâmetros $\kappa_{\text{iterativo}}$ do modelo de quantidade precipitada.

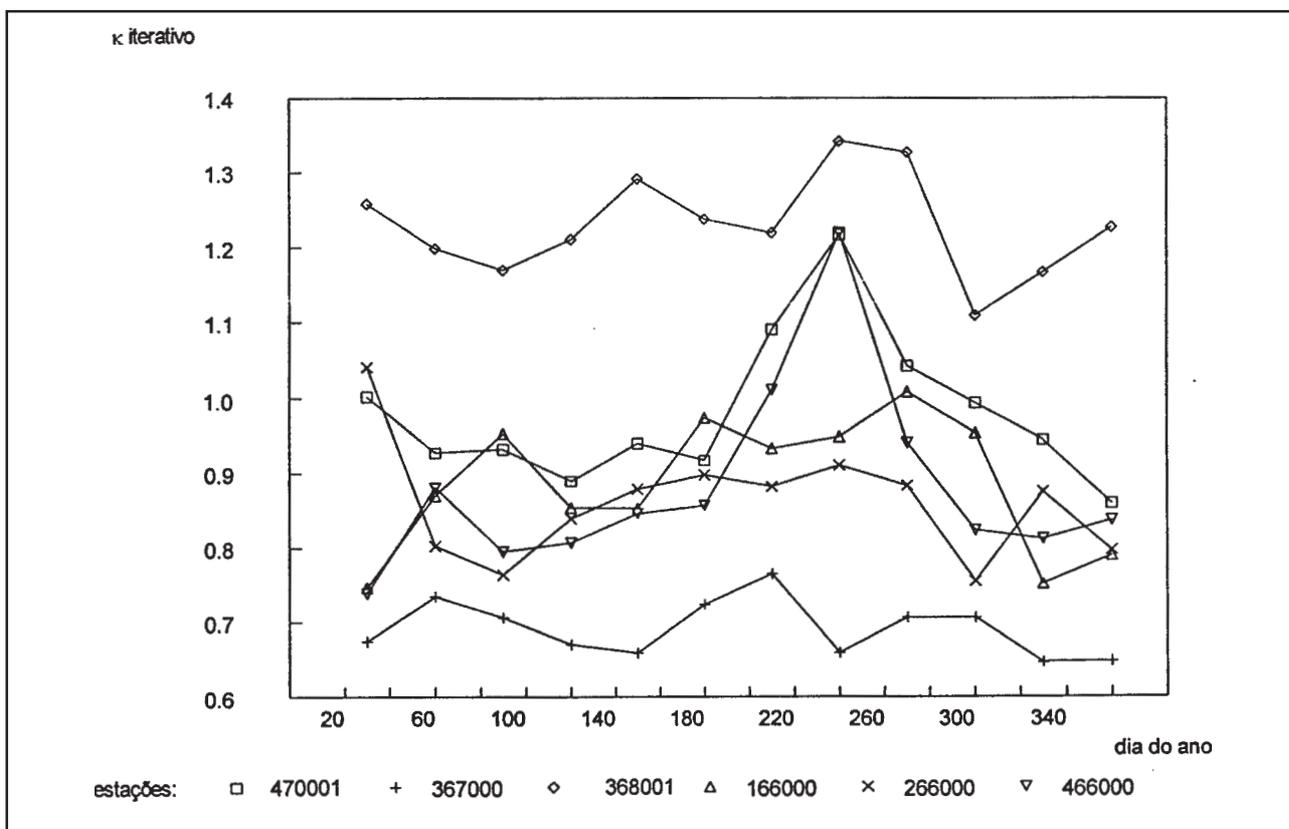


Figura 12. Valor de $\kappa_{\text{iterativo}}$ para intervalos de 30 dias, para a série 1, para as 6 estações acima.

O cálculo do parâmetro κ para valores diários forneceu resultados com grande oscilação e não apresentou uma variação contínua no tempo. O pequeno comprimento dos registros não permitiu um ajuste satisfatório. Com o aumento do intervalo temporal de discretização, por exemplo mensal, e conseqüentemente do comprimento dos registros, constatou-se uma tendência de variação com a época do ano, porém não suficientemente marcante a ponto de se fazer uso desta discretização com o período de registro utilizado. A Figura 12 apresenta um gráfico da variação deste coeficiente, para intervalos de 30 dias, para 6 estações selecionadas. Estas estações estão próximas, dentro de uma área $5^\circ \times 5^\circ$. Seria esperado um comportamento semelhante das 6 estações, o que não ocorreu, impedindo o uso da discretização mensal, do parâmetro κ . Portanto, os valores de κ utilizados nos cálculos precedentes foram considerados constantes no ano, para cada estação. Deixase de apresentar os gráficos correspondentes para às séries 2 e 3, por não se ter obtido bons resultados, em conseqüência da pequena extensão da série de dados disponível.

Simulação da quantidade de chuva à uma estação

A Figura 13 apresenta a comparação da média mensal de 29 anos de registro da estação 00259111 com a média mensal de 9 séries de 29 anos obtidas através do modelo de ocorrência e quantidade precipitada ajustado. Foi considerado o modelo ajustado completo, com os termos do primeiro e segundo harmônico da série de Fourier e nos parâmetros de quantidade precipitada foi considerada a dependência do estado do dia anterior, através da utilização dos parâmetros da série dos totais precipitados quando não choveu no dia anterior (série 2) e da série dos totais precipitados quando choveu no dia anterior (série 3). A diferença dos totais anuais foi de 0,4%, o que atesta a qualidade do modelo. Pequena diferença pode ser

observada na forma do pico da estação úmida.

A verificação do ajuste para cada fase do modelo: ocorrência, quantidade e simulação da série precipitada, foi realizada pela comparação dos valores observados com os simulados com parâmetros do modelo ajustado, e com os simulados com parâmetros do modelo obtidos por interpolação das isolinhas das Figuras 2 a 11. Foram utilizadas as estações 00259111 ($2^\circ 57'S-59^\circ 57'W$), 00870000 ($8^\circ 10'S-70^\circ 46'W$), 00063000 ($0^\circ 36'S-63^\circ 21'W$), 00049001 ($0^\circ 37'S-49^\circ 10'W$) e 00751000 ($7^\circ 46'S-51^\circ 8'W$), não utilizadas no traçado das isolinhas, com período de registro de 29; 11,6; 14,6; 13,2 e 12,3 anos, respectivamente. Neste caso, só podem ser considerados os termos do primeiro harmônico, da série de Fourier, uma vez que os parâmetros D e E foram obtidos com termos do primeiro harmônico, conforme Equação (5).

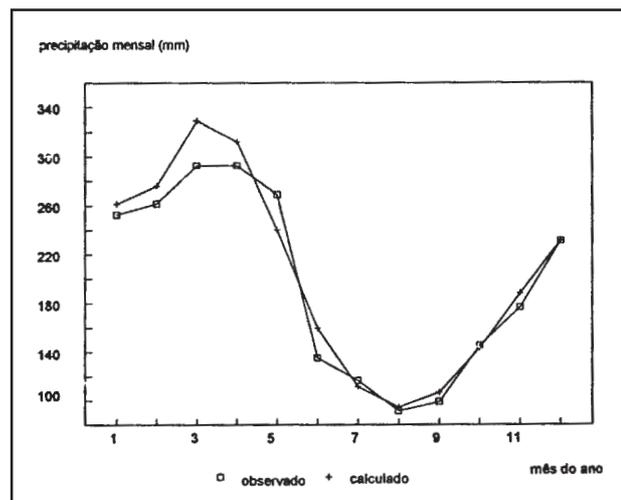


Figura 13. Precipitação média mensal (mm) de 29 anos observada e de 29 anos de registro das 9 séries simuladas, da estação 00259111.

A Tabela 3 apresenta os coeficientes do modelo de ocorrência de precipitação, valores interpolados obtidos das Figuras 2 a 7 e valores ajustados, para as estações utilizadas na verificação do ajuste. A Tabela 4 apresenta os coeficientes do modelo de quantidade precipitada, valores interpolados obtidos das Figuras 8 a 11 e valores ajustados, para as estações utilizadas na

Tabela 3. Coeficientes ajustados e interpolados do modelo de ocorrência de precipitação.

estação		a_0	a_{01}	b_{01}	a_1	a_{11}	b_{11}
00259111	interpolado	-0,40	0,36	0,56	0,35	0,43	0,67
00259111	ajustado	0,16	0,09	0,76	0,99	0,16	0,81
00049001	interpolado	-0,50	-0,55	1,41	0,71	1,29	0,55
00049001	ajustado	-0,63	-0,70	1,59	0,60	-0,01	1,37
00063000	interpolado	-0,30	-0,55	0,23	0,50	-0,32	0,50
00063000	ajustado	-0,59	-0,62	0,10	0,06	-0,28	0,41
00751000	interpolado	-1,15	1,17	0,99	-0,20	0,76	0,96
00751000	ajustado	-1,42	1,35	-0,06	0,08	0,73	0,31
00870000	interpolado	-0,60	0,88	0,43	-0,05	0,58	0,40
00870000	ajustado	-0,23	0,94	0,50	0,34	0,68	0,44

Tabela 4. Coeficientes ajustados e interpolados do modelo de quantidade precipitada.

estação		a_0	a_1	b_1	k_{iterativ}
00259111	interpolado	2,46	0,23	0,16	0,70
00259111	ajustado	2,28	0,28	0,18	0,63
00049001	interpolado	2,47	0,22	0,56	0,70
00049001	ajustado	2,57	0,17	0,25	0,82
00063000	interpolado	2,45	-0,11	0,17	0,80
00063000	ajustado	2,57	-0,01	0,16	0,81
00751000	interpolado	2,48	0,35	0,19	0,83
00751000	ajustado	2,45	0,36	0,15	0,91
00870000	interpolado	2,53	0,15	-0,02	0,80
00870000	ajustado	2,38	0,29	0,01	0,70

verificação do ajuste. Observa-se variação significativa nos parâmetros ajustados e interpolados, principalmente no modelo de ocorrência de precipitação, o que se deve principalmente à característica convectiva da precipitação na região.

As Figuras 14 a 18 apresentam a precipitação média mensal observada e simulada, considerando os parâmetros do modelo ajustados e interpolados. Observa-se um bom ajuste entre valores observados e simulados, o que demonstra a adequação do modelo. Além disto, pode ser constatada a possibilidade de utilização das isolinhas das Figuras 2 a 11, obtendo-se, de forma rápida, um modelo aproximado para simulação da precipitação diária, dependente da localização desejada na região Amazônica.

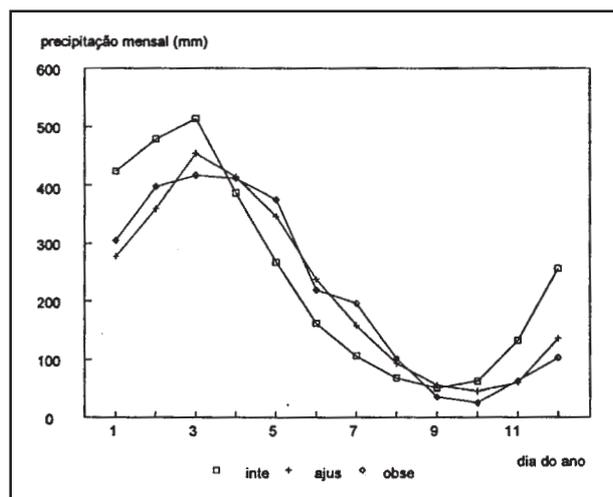


Figura 14. Precipitação média mensal (mm) observada, na estação 00049001, e obtida por simulação com parâmetros interpolados e ajustados.

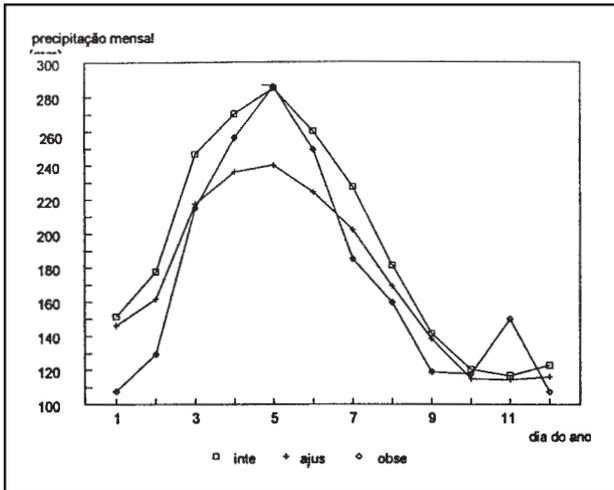


Figura 15. Precipitação média mensal (mm) observada, na estação 00063000, e obtida por simulação com parâmetros interpolados e ajustados.

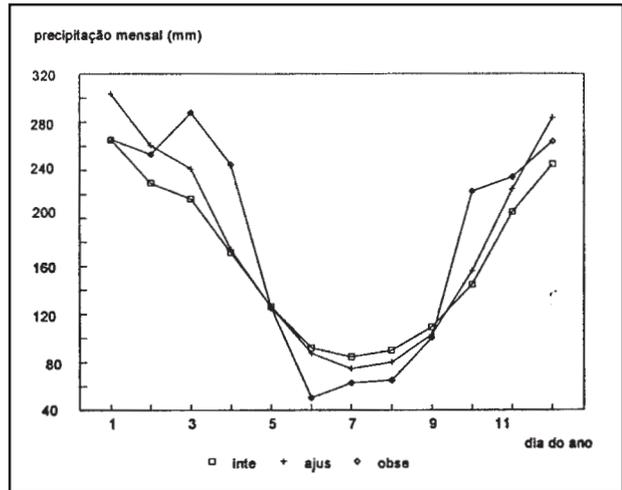


Figura 17. Precipitação média mensal (mm) observada, na estação 00870000, e obtida por simulação com parâmetros interpolados e ajustados.

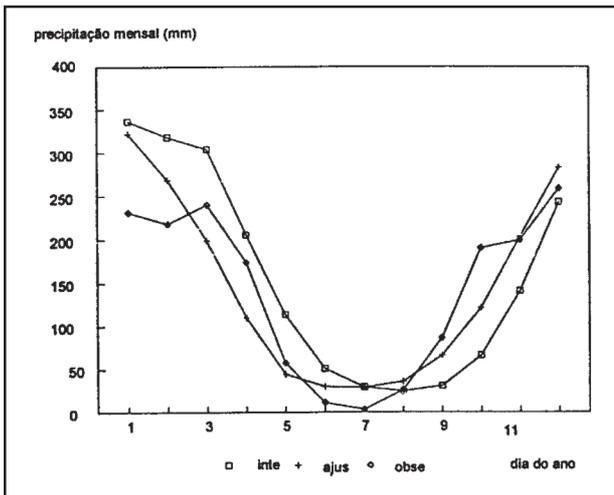


Figura 16. Precipitação média mensal (mm) observada, na estação 00751000, e obtida por simulação com parâmetros interpolados e ajustados.

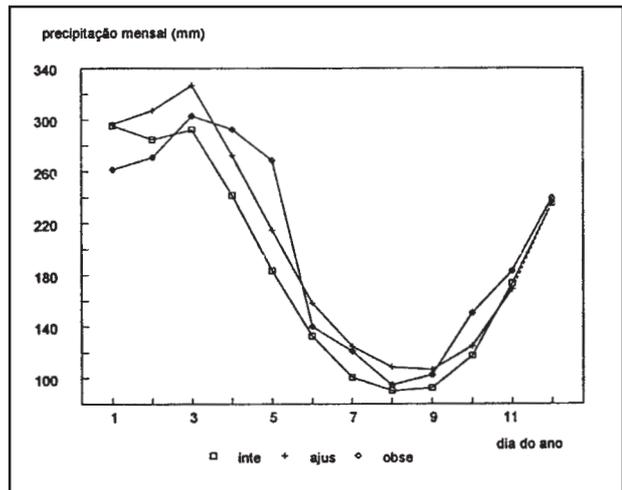


Figura 18. Precipitação média mensal (mm) observada, na estação 00259111, e obtida por simulação com parâmetros interpolados e ajustados.

CONCLUSÕES

Respostas importantes foram encontradas na modelagem estocástica. Seria interessante a ampliação desta análise para cadeias de Markov de ordem superior e maior número de estados. O ajuste dos parâmetros foi adequado para estações pluviométricas com período de registro superior a 1000 dias, com exceção do parâmetro de forma κ da distribuição gama. Além disto, a avaliação deste parâmetro por épocas do ano ficou prejudicada pelo comprimento dos registros.

Sugere-se que tal análise seja ampliada com estações com registro mais longos, para diversos locais da Amazônia, e seja feita análise de sensibilidade deste parâmetro no modelo.

Os resultados do ajuste do modelo estocástico de precipitação permitiu evidenciar a característica convectiva da precipitação da Amazônia. É possível constatar uma distinção entre os regimes de precipitação ao Norte e Sul, indicando a influência da Zona Convergência Intertropical (ZCIT) na chuva da Amazônia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), pelo fornecimento dos registros diários de precipitação da região Amazônica.

REFERÊNCIAS

- BERNARDO, J. M. 1976. Psi (Digamma) Function. In: Algorithm AS 103. *Applied Statistics, Series C*, v.25, n.3, p.315-317.
- CLARKE, R. T. 1973. *Mathematical models in hydrology*. Rome: FAO. 282p. (FAO Irrigation and Drainage Paper n.19)
- CLARKE, R. T. 1994. *Statistical Modelling in Hydrology*. Chichester: John Wiley & Sons. 412p.
- PAIVA, E. M. C. D. 1996. *Regime de precipitação na Amazônia e sua relação com o desmatamento e temperatura da superfície do mar*. Tese de doutorado. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 297p.
- STERN, R. D.; COE, R. 1982. The use of rainfall models in agricultural planning. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.26, p.25-50.
- STERN, R. D.; COE, R. 1984. A model fitting analysis of daily rainfall data. *Journal Royal Statistical Society*, 147, Part 1, p.1-34.
- MOORE, R. J. 1982. Algorithm AS 187. Derivatives of the Incomplete Gamma Integral. In: *Applied Statistics, Series C*, v.31, n.3, p.330-335.

Stochastic Models of Precipitation in Amazonia

ABSTRACT

Stochastic models of precipitation were fitted to data from Amazonia. Daily records from 402 raingauges supplied by DNAEE, were used. Nonstationary Markov chains were fitted to the occurrence of rain, and gamma distributions, with parameters varying with time of year, were fitted to rainfall amounts. Probabilities were related to harmonic functions of time by Generalized Linear Models. Model coefficients were mapped and can be interpolated by kriging. Data from 5 stations, not used in model fitting, were used for model verification. The result demonstrated the convective characteristic of rainfall and the influence of seasonal fluctuations in the ITCZ, on the precipitation regime of Amazon.