

RELAÇÕES DE RECORRÊNCIA 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

O resultado do ajuste de modelo estocástico de precipitação foi utilizado para calcular as distribuições de probabilidades do número de dias chuvosos e do comprimento de períodos secos e úmidos, num determinado período. Um modelo de suposições simplistas foi utilizado para calcular a distribuição de probabilidade da umidade do solo. Foram utilizados dados diários de precipitação, de 48 estações, fornecido pelo DNAEE. O regime de precipitação mostrou larga variação espacial. Os resultados mostraram que na área à sudeste seguida pela nordeste, onde o desmatamento tem sido mais intenso, a diferença entre as estações secas e chuvosas foi mais marcante.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho foi estudar o regime de precipitação da Amazônia, comparando sua variação espacial com a cobertura vegetal. Os dados foram analisados utilizando modelagem estocástica, que permitiu uma utilização mais eficiente das informações. Metodologia semelhante pode ser de grande utilidade para aplicação em outros fins, como no planejamento agrícola e na avaliação do nível de risco. Neste enfoque, é de grande importância o conhecimento, por exemplo, do início e fim da estação chuvosa e sua distribuição no decorrer do ano, como também da probabilidade de ocorrência de períodos secos e chuvosos durante o ano.

Tais respostas podem ser buscadas a partir da metodologia aplicada neste trabalho.

DADOS UTILIZADOS

Foram selecionadas 48 estações, com registro superior a 15 anos de dados, para determinação das relações de recorrência. Foram utilizados os modelos de ocorrência e quantidade precipitada ajustados para estas estações por Paiva e Clarke (1997), propostos por Stern e Coe (1982, 1984). O modelo de ocorrência utiliza cadeias de Markov de dois estados e primeira ordem e o de quantidade precipitada usa distribuição gama, com parâmetros variáveis no ano. As probabilidades são relacionadas a funções harmônicas do tempo através de modelos lineares generalizados. Aos resultados foi aplicada interpolação kriging e traçadas isolinhas. A Figura 1 apresenta a localização das estações pluviométricas.

DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DO NÚMERO DE DIAS CHUVOSOS

Foi calculada a distribuição de probabilidade do número de dias chuvosos, em períodos de 10 dias, durante todo o ano, sendo utilizado o procedimento descrito por Stern e Coe (1984). Utilizando a média do período, foram traçadas isolinhas para diversos períodos do ano.

O modelo considera cadeia de Markov bivariada ($Y(t)$, $J(t)$), de primeira ordem e de dois estados. A conversão da cadeia bivariada em univariada é dada por:

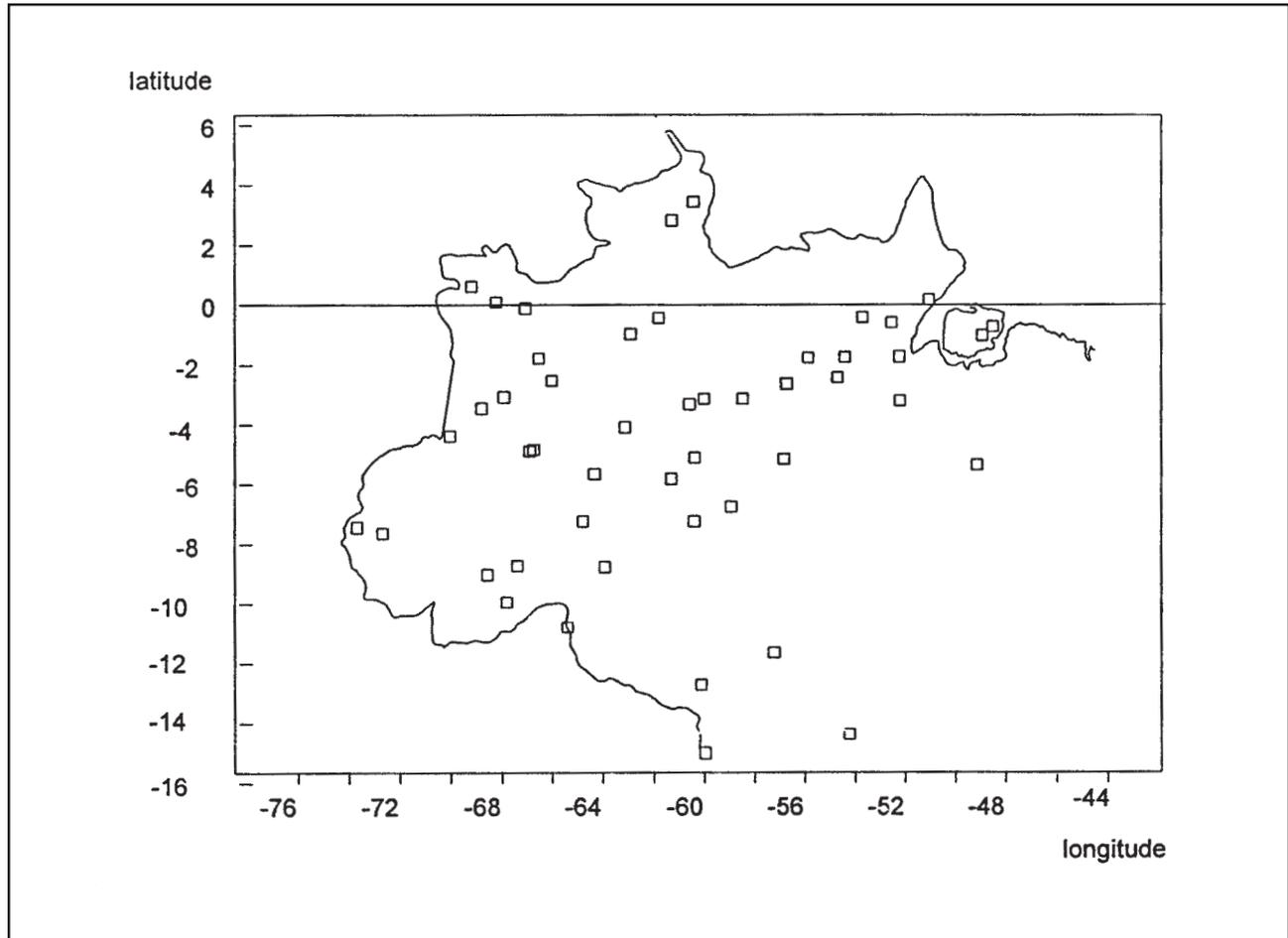


Figura 1. Localização das estações pluviométricas.

$$P[J(t) = j, Y(t) = n] = \sum_k \sum_l s_{ijkn} \cdot P[J(t-1) = i, Y(t-1) = k] \quad (1)$$

$$q_{i0kk}(t) = 1 \quad q_{i1k(k+1)}(t) = 1$$

onde $S_{ijkn} = P[J(t) = j, Y(t) = n \mid J(t-1) = i, Y(t-1) = k]$; $S_{i0kn}(t) = (1 - p_i(t)) \cdot q_{i0kn}(t)$; $s_{i1kn}(t) = p_i(t) \cdot q_{i1kn}(t)$; $p_i(t) = P[J(t) = 1 \mid J(t-1) = i]$, fornecida por modelo ajustado em Paiva e Clarke (1997); $J(t)$: estado do dia t ; $i=0,1$ (seco, úmido); t : dia do ano (1...365); $Y(t)$: o número de estados depende da característica da chuva que está sendo examinada.

A distribuição do número total de dias de chuva num dado período pode ser obtido através da Equação (1). Assim, num período de m dias, de t_{0+1} a t_m , os estados de $Y(t)$ são $0, 1 \dots m$. A distribuição requerida é a distribuição de $Y(t_m)$. Neste caso, os termos não nulos de $q_{ijkn}(t)$, da Equação (1), são:

Este modelo utiliza como entrada o modelo de ocorrência de precipitação ajustado. Foi utilizado dia seco como condição inicial, $Y(t_0) = 0$ e a marginal $P(J(t_0) = i)$, $i = 0, 1$.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE PERÍODOS SECOS OU ÚMIDOS DE K OU MAIS DIAS

Foi utilizado o equacionamento de Stern e Coe (1984), que permite a determinação da probabilidade de um período seco/úmido de K ou mais dias num intervalo de m dias (t_0 a t_m), começando no dia t_0 . Ele utiliza o modelo ajustado de ocorrência de precipitação. A probabilidade de um período seco de K ou mais dias é dada por $P[Y(t_m) = K]$,

obtida pela Equação (1), sendo os termos não nulos de $q_{ijkl}(t)$ dados por:

$$\begin{aligned} q_{00k(k+1)}(t) &= 1 & k < K \\ q_{01k1}(t) &= 1 & k < K \\ q_{1j11}(t) &= 1 & j = 0, 1 \\ q_{ijkk}(t) &= 1 & i, j = 0, 1 \\ P[J(t_0) = 1, Y(t_0) = 1] &= 1 \end{aligned}$$

O índice 0 representa o estado seco e o índice 1 o estado úmido. Assim, para a determinação de *períodos úmidos*, estes índices nas relações acima são trocados.

Foram determinadas probabilidades de 3 a 10 dias secos e úmidos, num período de 15 dias. O período foi variável durante o ano, permitindo identificar tais probabilidades com as estações do ano. Os resultados foram mapeados, utilizando interpolação kriging, permitindo avaliar sua variação espacial.

BALANÇO HÍDRICO

Tendo como base o modelo de precipitação ajustado (Paiva e Clarke, 1997), foi construído modelo de balanço hídrico, conforme apresentado por Stern e Coe (1984). Este modelo tem como entrada a precipitação $X(t)$ e evaporação (e) , do tempo atual, e o armazenamento de água $(W(t-1))$ no perfil de solo do dia anterior e como saída o armazenamento de água $(W(t))$ no solo no tempo atual. A equação geral do balanço hídrico, no dia t , é dada por:

$$W(t) = W(t-1) + X(t) - e \quad (2)$$

onde $X(t)=0$ quando $J(t)=0$, ou seja, dia seco; $0 \leq W(t) \leq KK$; KK : limite superior de umidade do solo, correspondente à capacidade de campo, considerado constante e igual a 100 mm; e : evaporação ou perda d'água, considerado constante e igual a 3 mm.

É utilizada a Equação (1), da mesma forma que na distribuição de probabilidade do número de dias chuvosos e na probabilidade de ocorrência de períodos secos e úmidos. Neste caso, os $KK+1$ estados de $Y(t)$ representam incrementos discretos em $W(t)$, com $Y(t)=0$ correspondendo à perfil vazio e

$Y(t)=KK$ à perfil cheio. A evaporação é considerada em termos de e unidades, no caso milímetros, que são as unidades empregadas para o número de estados de $Y(t)$. Os valores não nulos de q_{ijkl} , da Equação (1), são dados por:

$$\begin{aligned} q_{i0k(k-e)} &= 1 & i=0, 1 & & k-e > 0 \\ q_{i0k0} &= 1 & & & k-e \leq 0 \\ q_{i1k(k+q-e)} &= G_{i(q+1)} - G_{iq} & i=0, 1 & & KK > k+q-e > 0 \\ q_{i1k0} &= 1 - G_{i(e-k)} & & & \\ q_{i1kk} &= G_{i(KK-k-e)} & & & \\ G_{iy} &= P [Y(t) \geq y - \frac{1}{2} \mid J(t-1) = i] \end{aligned} \quad (3)$$

O resultado envolve o cálculo da função de distribuição conjunta de $Y(t)$ e $J(t)$, $F(t, y, j) = P[Y(t) \leq y, J(t) = j]$ como:

$$\begin{aligned} F(t, y, j) &= \sum_i F(t-1, y + e, i) \cdot (1 - p_i(t)) \quad j = 0 \\ F(t, y, j) &= \int_0^y \sum_i F(t-1, y + e - w, i) \cdot p_i(t) \cdot g_i(w, t) \cdot dw \\ & \quad j = 0, 1 \end{aligned} \quad (4)$$

onde $g_i(w, t)$ é a densidade da quantidade de chuva no dia t dado que $J(t)=1$ e $J(t-1)=i$.

O termo de perda d'água foi considerado constante no tempo e espaço e igual a 3 mm dia⁻¹, durante todo o ano, valor médio aproximado para a região. A utilização de valores não inteiros para este parâmetro, por exemplo, décimos de milímetro, aumenta muito o esforço computacional, uma vez que a dimensão das matrizes (4 linhas x $(KK+1)$ colunas) depende das unidades adotadas, e adotar valores não inteiros implica em aumentar muito o tamanho das matrizes. Por exemplo, para considerar décimos de milímetros, teríamos uma matriz de $(KK+1)=1001$ estados, considerando a capacidade de campo de 100,0 mm e evaporação em e unidades de décimo de milímetro. Para uma primeira abordagem, foi adotado a "capacidade de campo" de 100 mm de água para o perfil de solo cheio de água, correspondendo a 100+1 estados, e as condições iniciais adotadas foram de solo saturado e dia chuvoso. O número de estados $KK+1=101$, foi sugerido por Stern e

Coe (1984) para permitir precisão nos resultados e devido às limitações de computação. No entanto, o modelo pode ser rodado com qualquer capacidade de campo e evaporação, com unidade de milímetro ou menores. Para possibilitar o ajuste das condições iniciais, foi necessário rodá-lo alguns meses a mais, de forma que os valores de início e final do período anual convergissem.

Os resultados apresentados são do armazenamento médio de água do perfil de solo para cada dia, mas o modelo também produz a distribuição de probabilidade da água armazenada (cuja média está aqui apresentada). Foram traçadas isolinhas em diversos dias no decorrer do ano.

RESULTADOS

Distribuição de probabilidade do número de dias chuvosos

A Figura 2 apresenta isolinhas do número médio de dias chuvosos. Observa-se à sudeste da região os menores valores e a noroeste os maiores valores. As Figuras 3 a 6

apresentam isolinhas do número médio de dias chuvosos num período de 10 dias, tendo início em 1^o/01, 1^o/04, 30/06 e 28/09. Consta-se a defasagem dos períodos de estação seca/chuvosa na região, observando-se seca em janeiro ao norte da região, sendo reduzida em março. Em junho a área ao sul da região apresenta período seco e em setembro a área à leste. A área à oeste apresenta número de dias chuvosos mais ou menos constante entre 5 e 6 dias.

A Figura 7 apresenta o comportamento de 5 estações pluviométricas, representando áreas de comportamento diferenciado à noroeste, centro, norte, sul e leste (470001, 561000, 8360000, 1454000, 48000, respectivamente), relativo ao número de dias chuvosos e início/término da estação chuvosa/seca. Observa-se que as áreas à noroeste, centro e sul apresentam estação seca e chuvosa no mesmo período, porém com diferentes intensidades, aumentando de noroeste, para o centro e sul. A área ao norte apresenta as estações em períodos contrários e a área à leste apresenta-se defasada entre a área ao norte e as áreas à noroeste, centro e sul. As áreas ao norte e leste apresentam também, da mesma forma que a área ao sul, grande distinção entre estação seca e chuvosa.

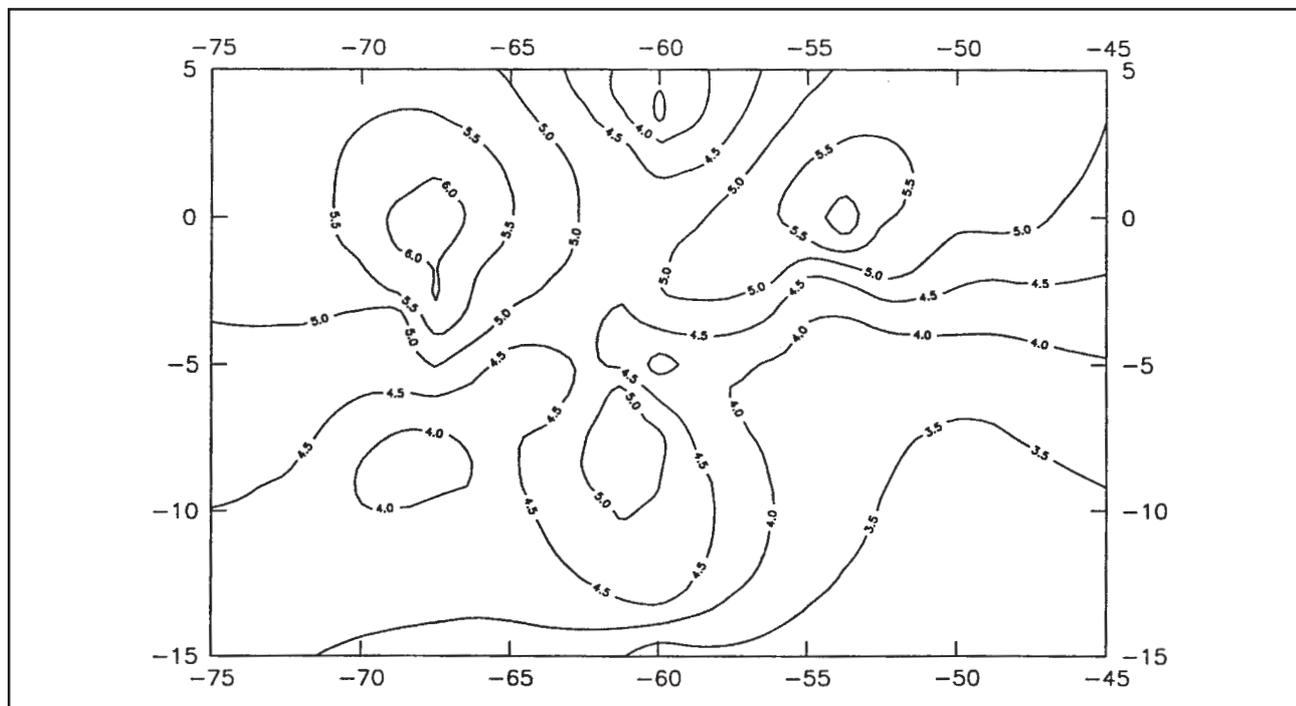


Figura 2. Número médio de dias chuvosos no ano, num período de 10 dias.

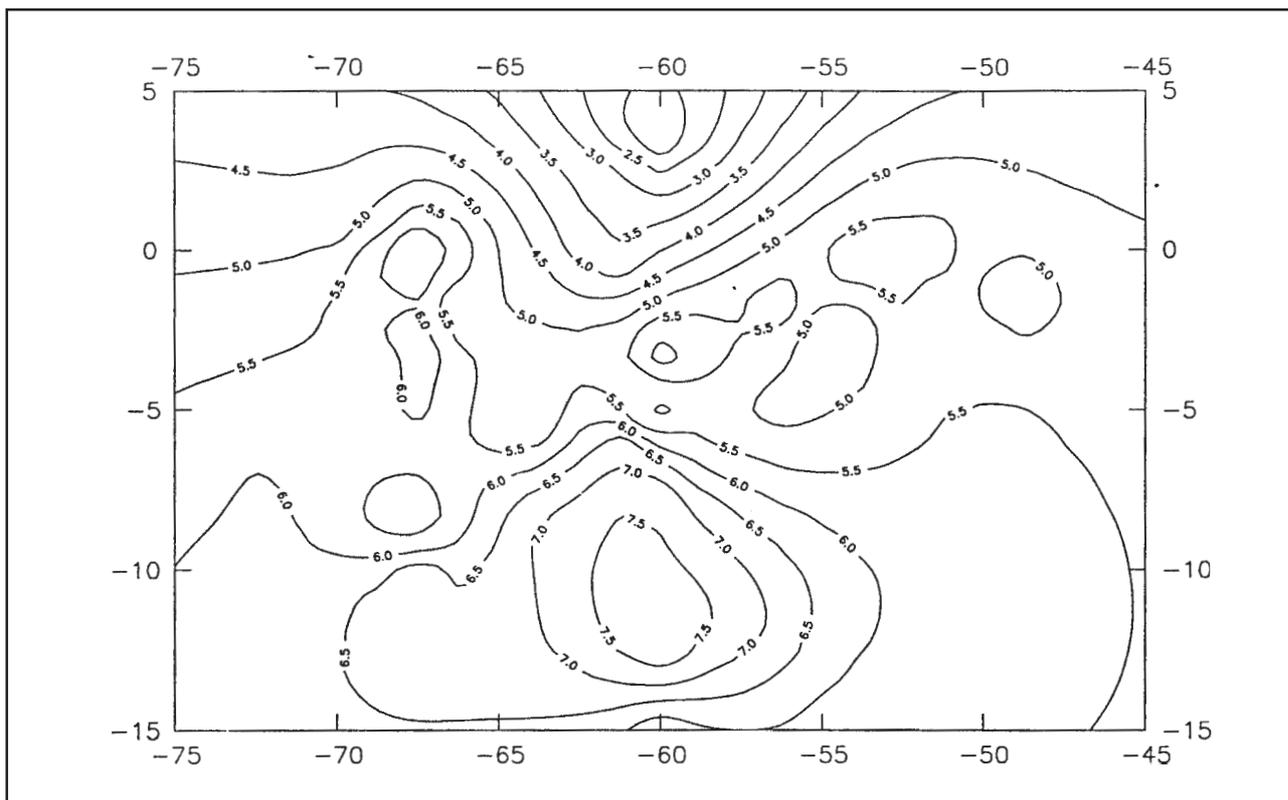


Figura 3. Número de dias chuvosos, num período de 10 dias, iniciando em 1º/01.

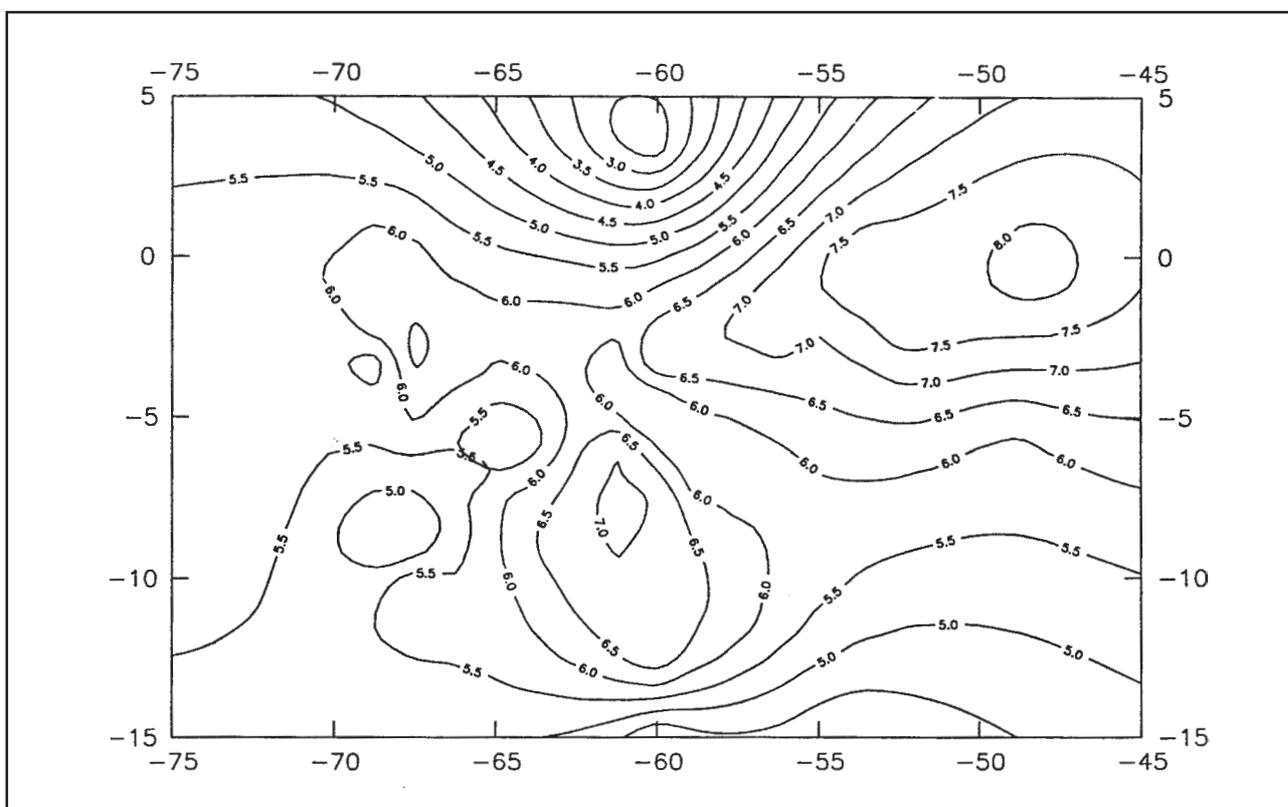


Figura 4. Número de dias chuvosos, num período de 10 dias, iniciando em 1º /04.

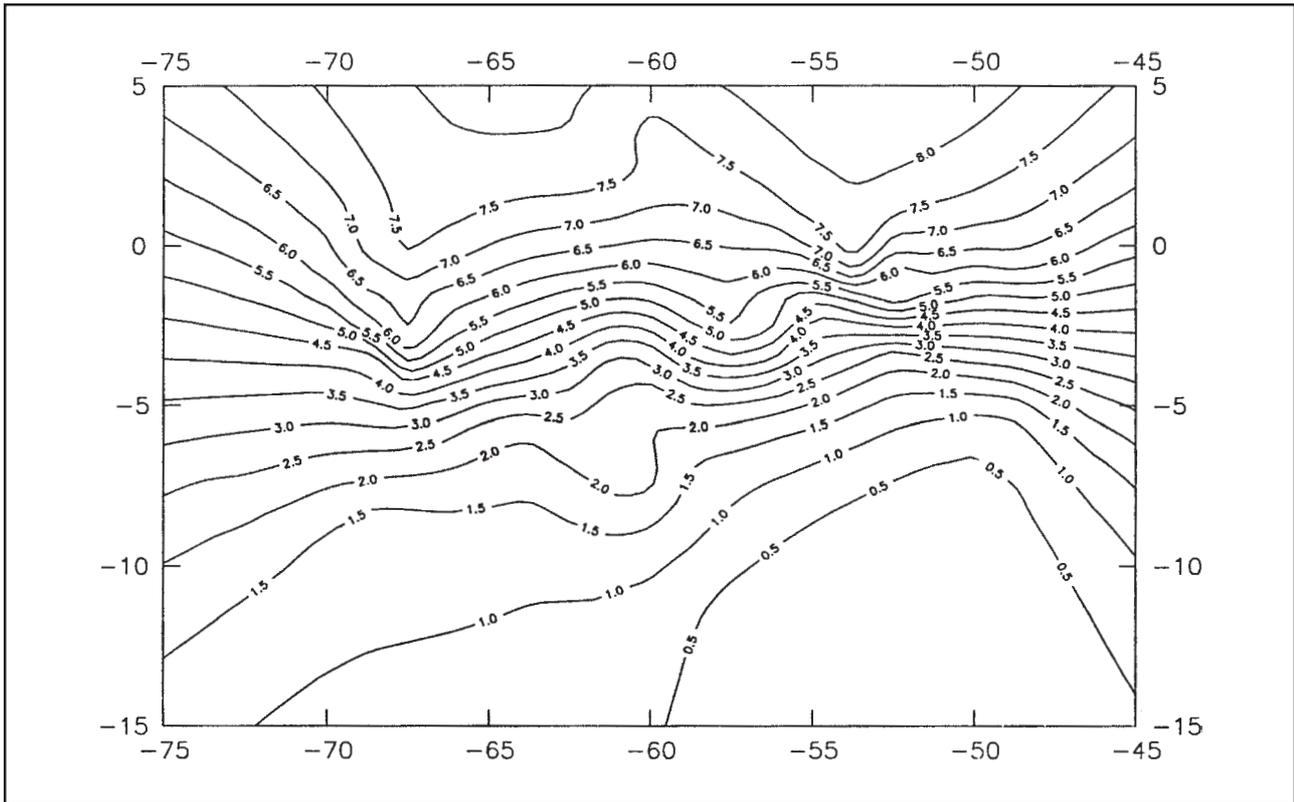


Figura 5. Número de dias chuvosos, num período de 10 dias, iniciando em 30/06.

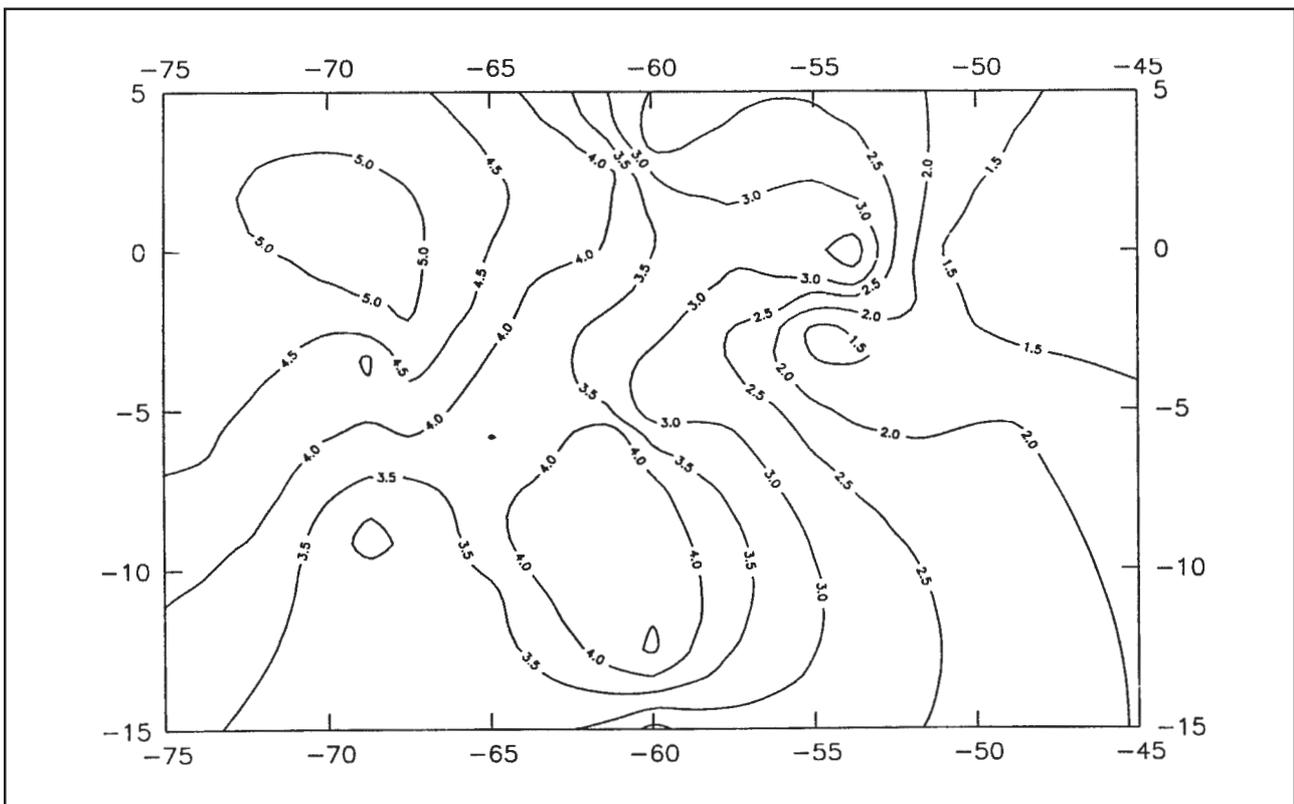


Figura 6. Número de dias chuvosos, num período de 10 dias, iniciando em 28/09.

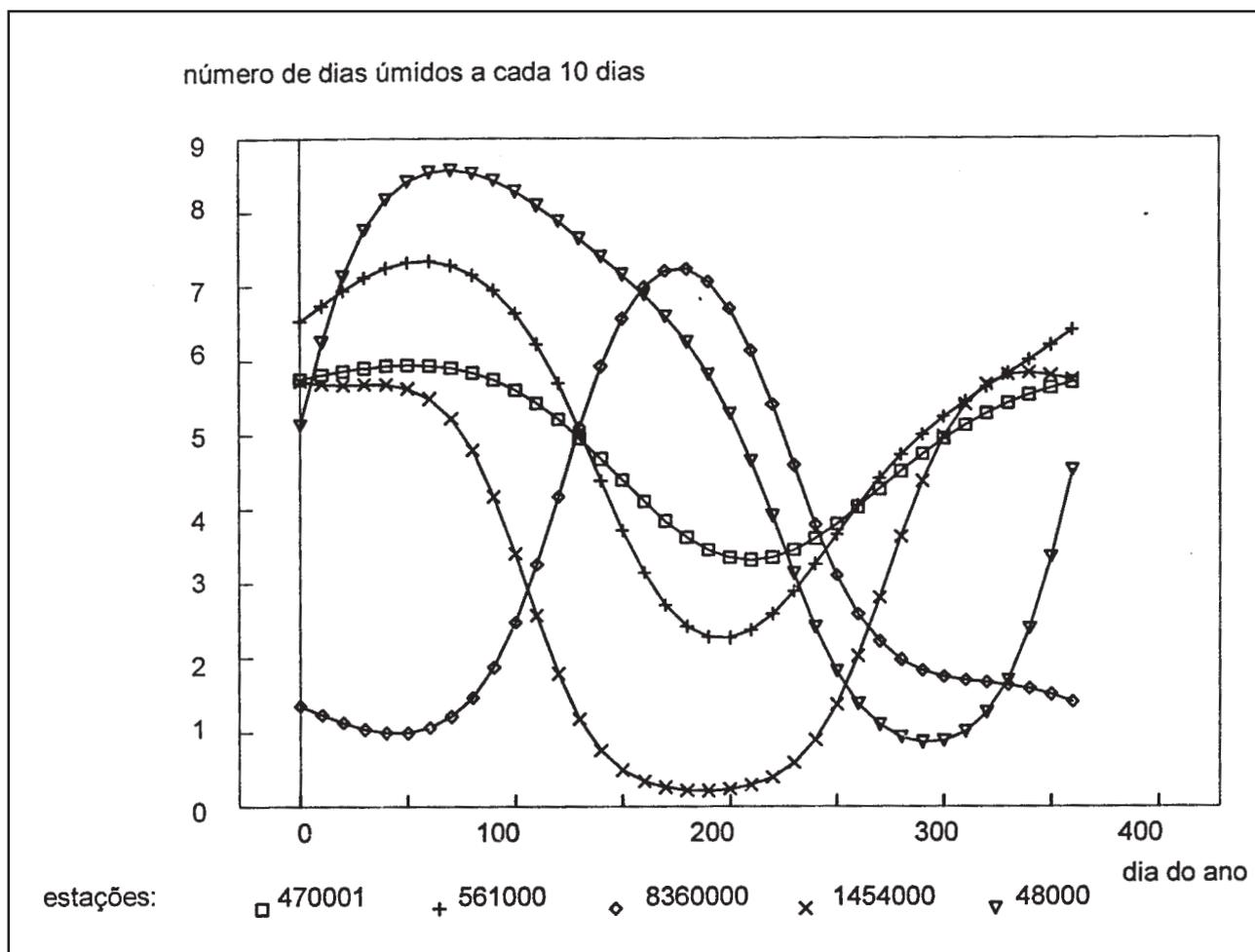


Figura 7. Número de dias chuvosos durante o ano, a cada 10 dias, para estações representativas das áreas noroeste (470001), centro (561000), norte (8630000), sul (1454000) e leste (48000).

Probabilidade de ocorrência de períodos secos e úmidos de K ou mais dias

As Figuras 8 e 9 apresentam isolinhas da probabilidade média de ocorrer, dentro dos 24 intervalos de 15 dias do ano, períodos de 3 ou mais dias secos e de 3 ou mais dias úmidos, respectivamente. As isolinhas apresentam configuração semelhante para 3 dias secos e para 3 dias úmidos. Os valores apresentam-se mais ou menos uniformes sobre toda a região, observando-se área mais seca à sudeste, verificada tanto nos períodos secos como nos períodos úmidos. No entanto, com o aumento do comprimento considerado esta situação se modifica. Para enfatizar esta diferença são apresentadas nas Figuras 10 e

11 isolinhas semelhantes às das Figuras 8 e 9, porém para comprimento de 10 dias. Observa-se região mais seca à sudeste. À nordeste as probabilidades de ocorrer 10 ou mais dias secos ou chuvosos são semelhantes, indicando estações secas e chuvosas com iguais intensidades. Observa-se, ainda, que às áreas à noroeste e centro da região em estudo apresentam as menores probabilidades de ocorrer longos períodos secos e chuvosos, apresentando uma maior constância durante o ano da probabilidade de ocorrência de precipitação.

Para apresentar o comportamento diferenciado das probabilidades de ocorrência de períodos secos durante o ano são mostradas as Figuras 12 a 15. Estas figuras apresentam as isolinhas de probabilidade para 10 ou mais dias secos com início em 1° de

janeiro, 1° de abril, 30 de junho e 28 de setembro. Observa-se período mais seco na área ao norte, em janeiro e abril. No final de junho observa-se maiores probabilidades na região à sudeste. Neste período, as linhas na direção oeste-leste, indicam a migração da Zona de Convergência Intertropical. No final de setembro a área à leste apresenta maior probabilidade de ocorrer períodos secos. As figuras mostram que existe uma tendência de aumento de probabilidades de períodos secos na direção noroeste-centro-sul. À sudeste ocorrem as maiores probabilidades de ocorrer períodos secos, ocorrendo o contrário à noroeste e centro.

Da mesma forma que apresentado na seção anterior, a Figura 16 apresenta a

probabilidade de ocorrência de 5 dias secos no decorrer do ano, num intervalo de 15 dias, para 5 estações pluviométricas representativas das áreas à noroeste (470001), ao centro (561000), ao norte (8360000), ao sul (1454000) e à leste (48000) da região em estudo. Observa-se a diferença de época e intensidade das estações seca e chuvosa, nas 5 estações pluviométricas. Observa-se, ainda, uma maior intensidade da estação seca na estação ao sul e na estação ao norte. À leste, embora apresente também grande diferença entre estação seca e chuvosa, o comprimento do período da estação seca é inferior às estações ao norte e ao sul.

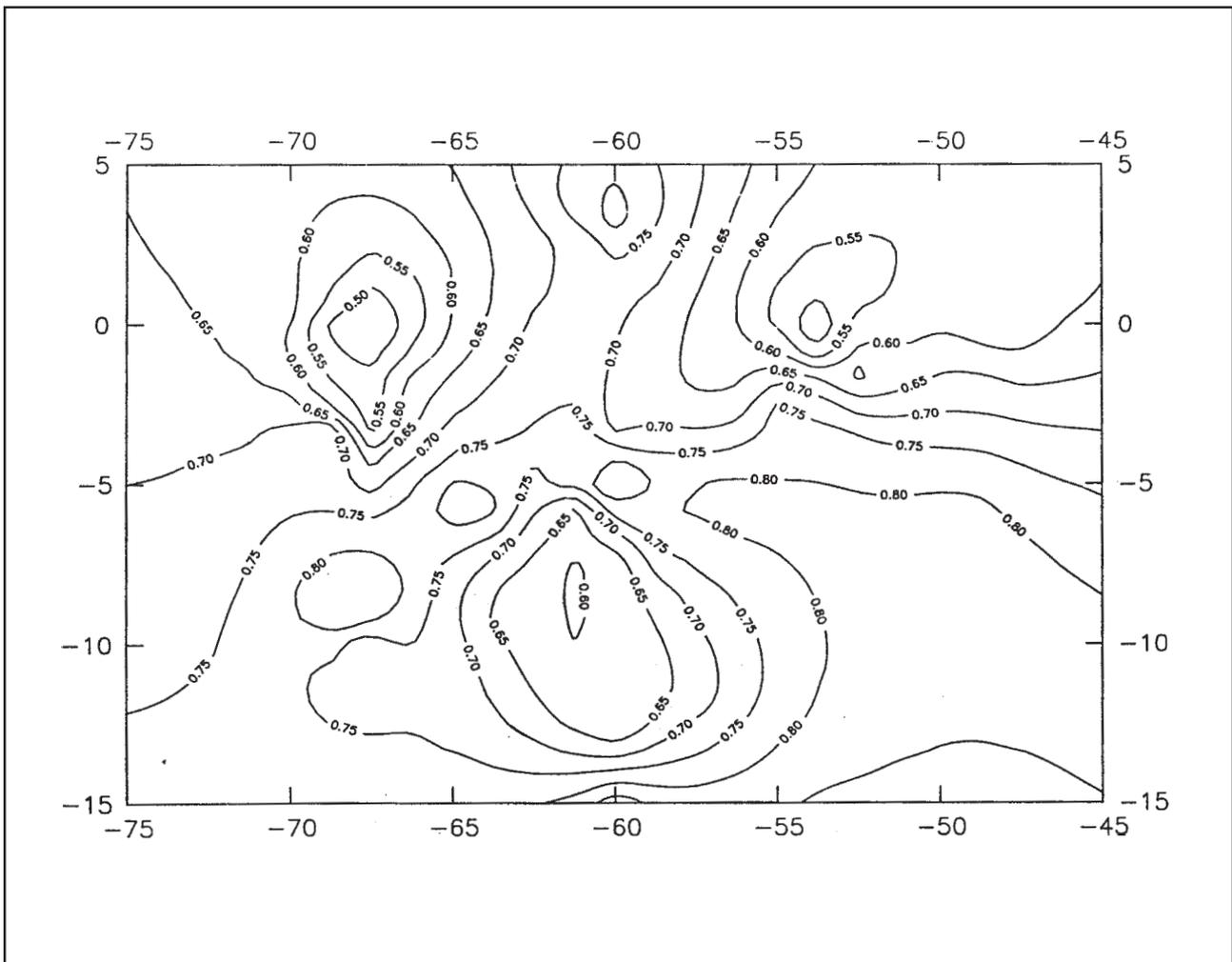


Figura 8. Probabilidade média anual de ocorrer 3 dias secos ou mais, em intervalos de 15 dias.

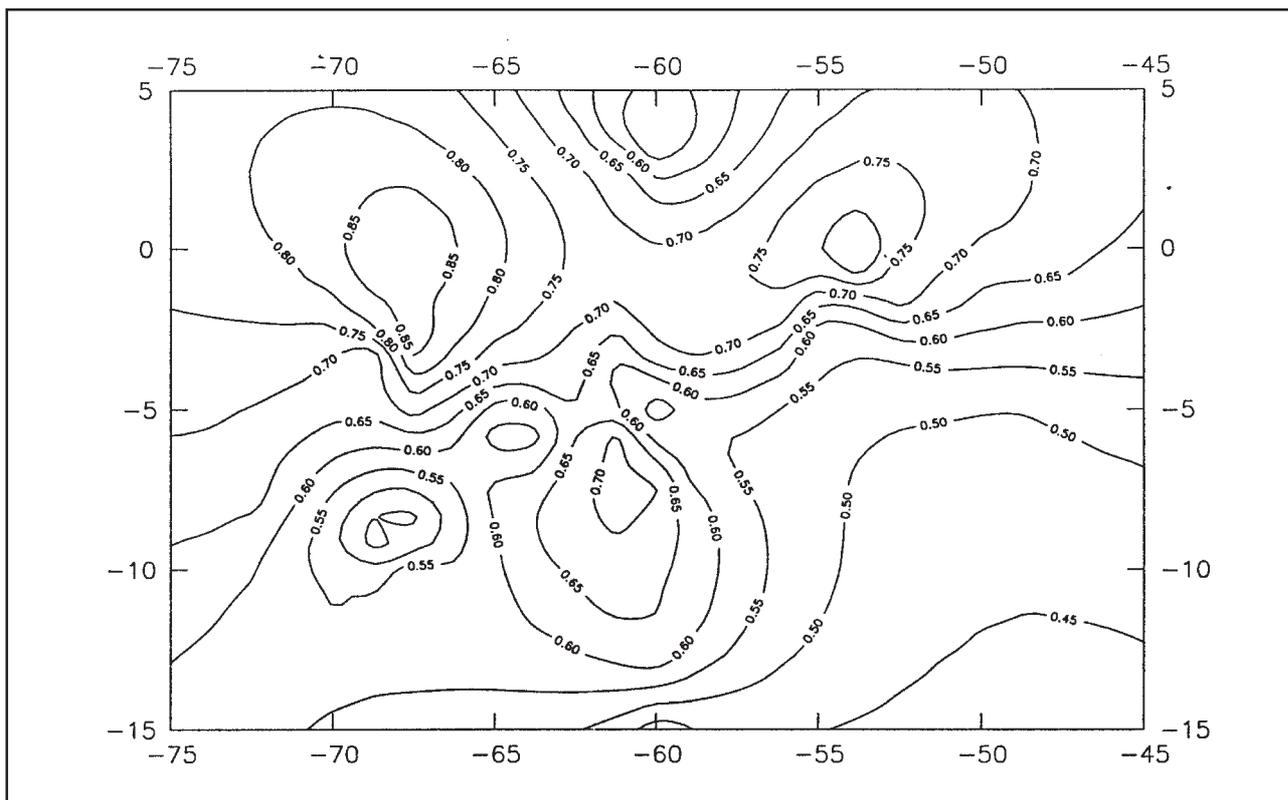


Figura 9. Probabilidade média anual de ocorrer 3 dias úmidos, em intervalos de 15 dias.

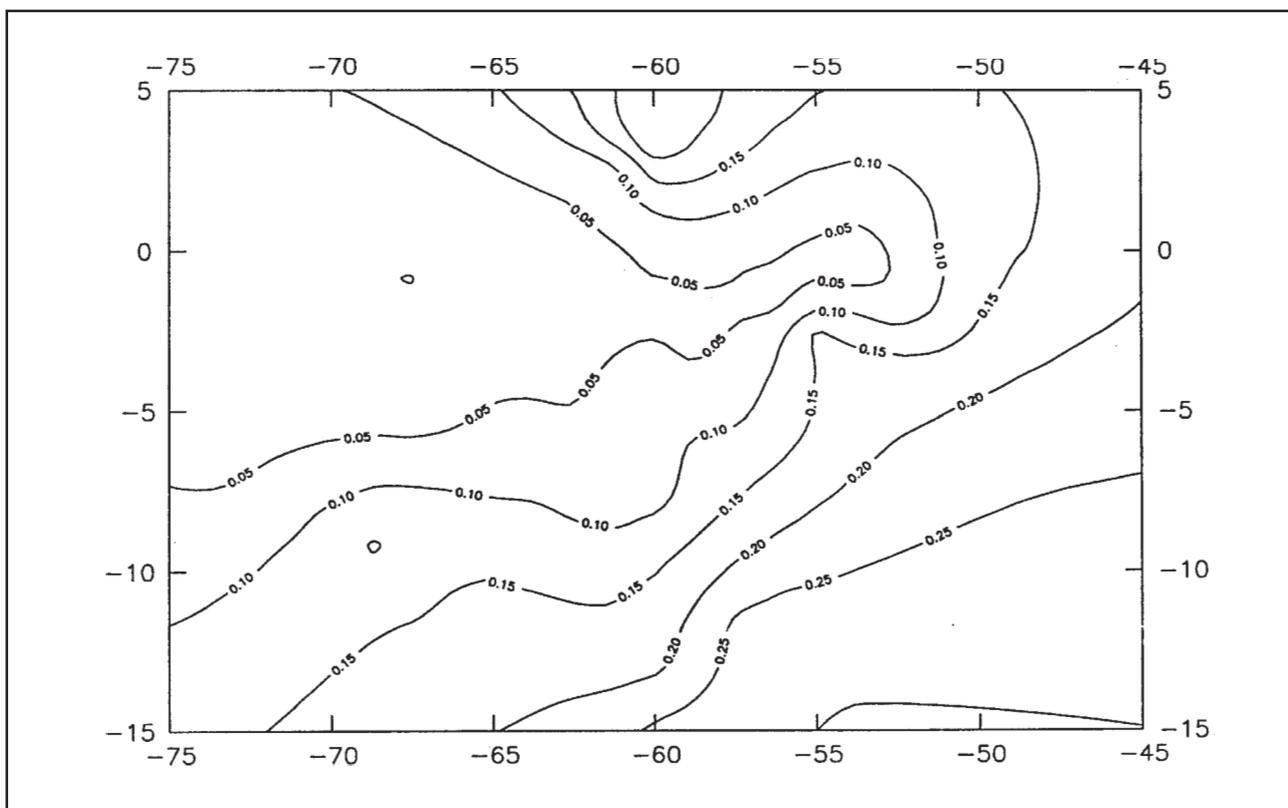


Figura 10. Probabilidade média anual de ocorrer 10 dias secos, em intervalos de 15 dias.

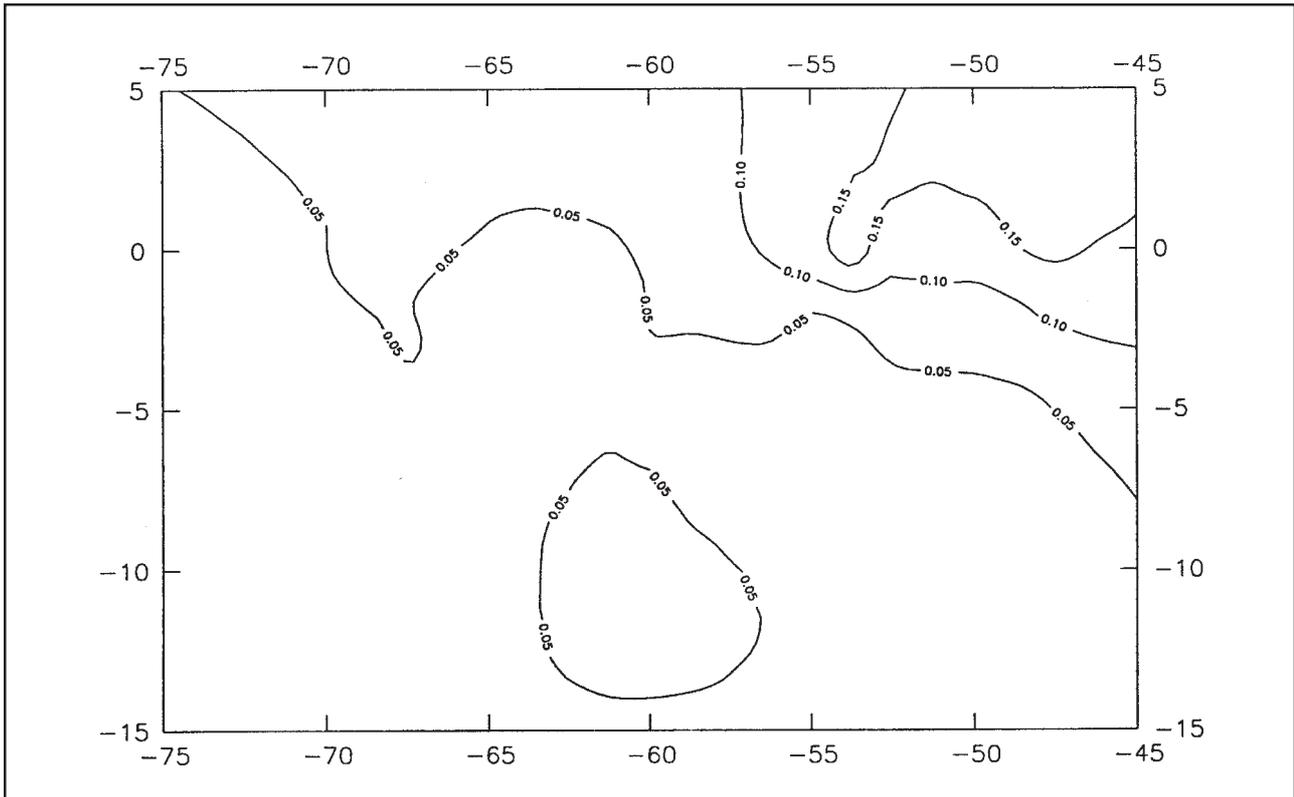


Figura 11. Probabilidade média anual de ocorrer 10 dias úmidos, em intervalos de 15 dias.

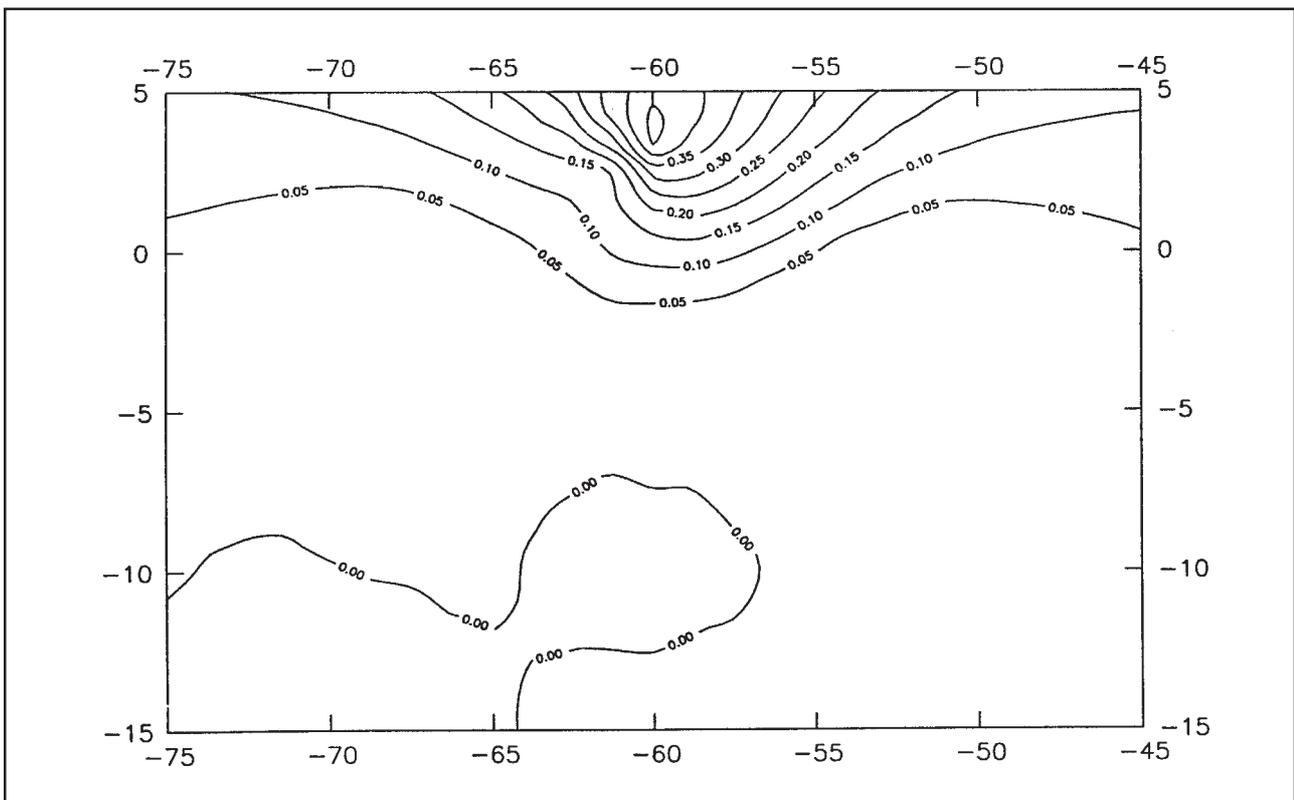


Figura 12. Probabilidade de ocorrer 10 dias secos, num intervalo de 15 dias, iniciando em 1/01.

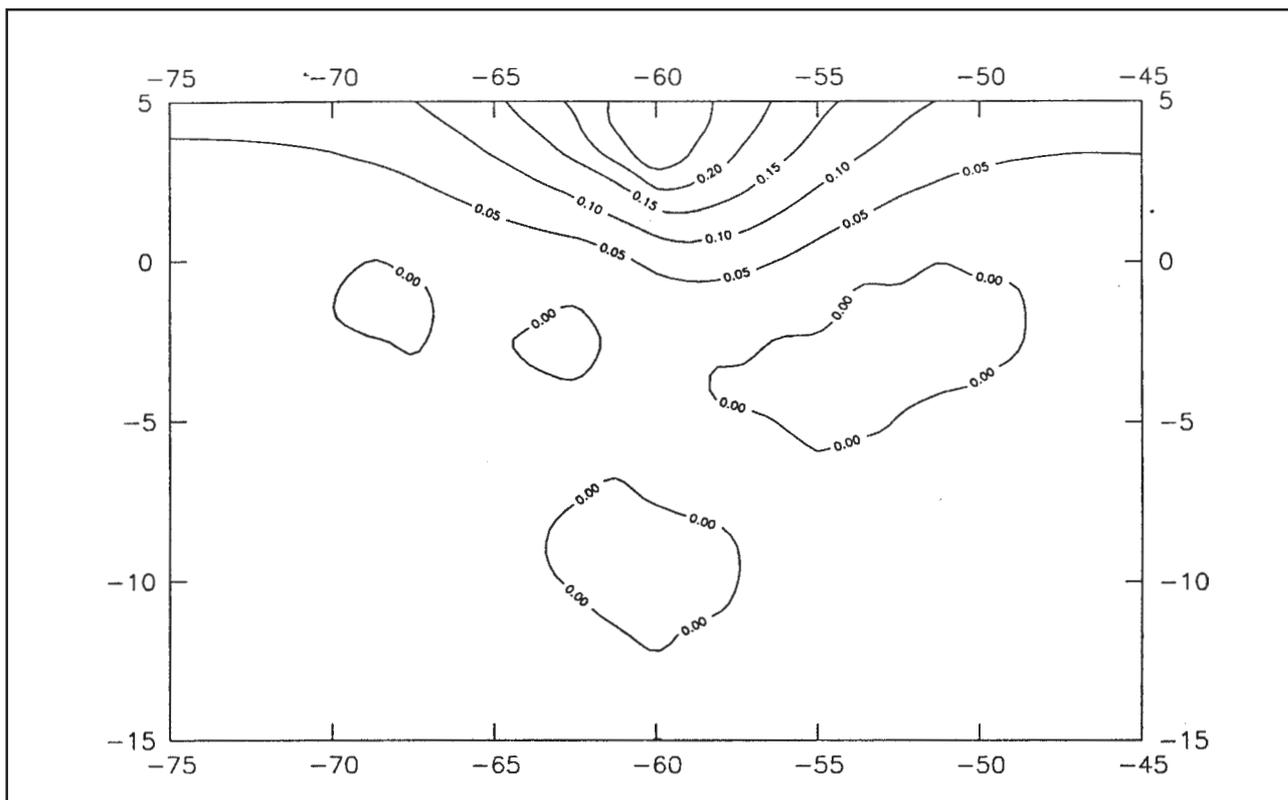


Figura 13. Probabilidade de ocorrer 10 dias secos, num intervalo de 15 dias, iniciando em 1/04.

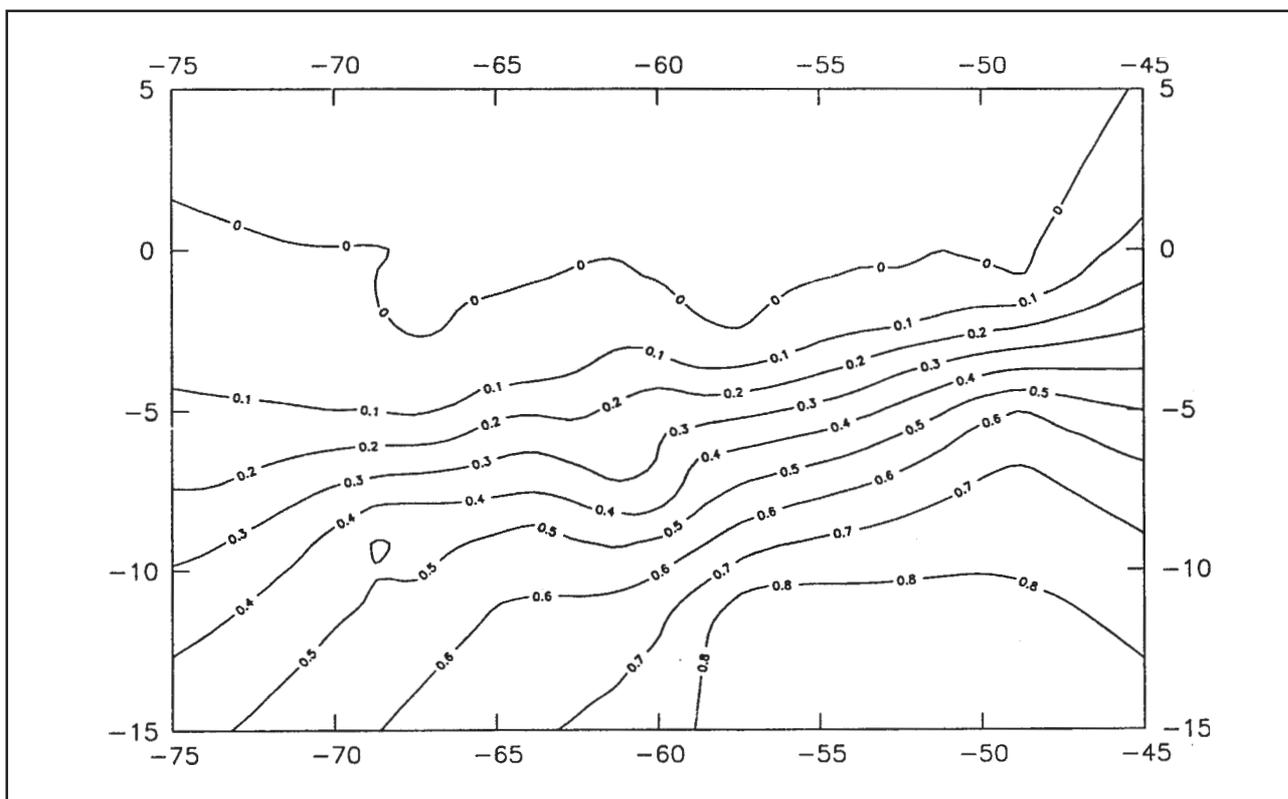


Figura 14. Probabilidade de ocorrer 10 dias secos, num intervalo de 15 dias, iniciando em 30/06.

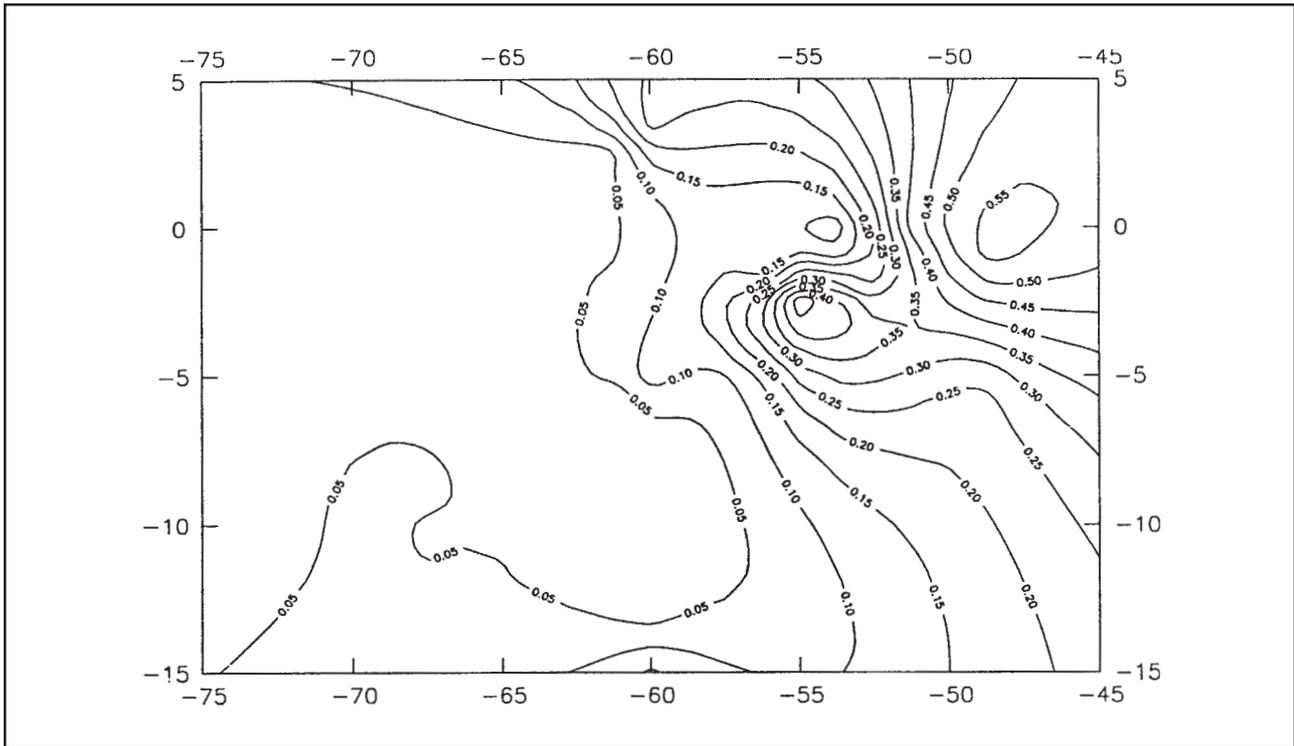


Figura 15. Probabilidade de ocorrer de 10 dias secos, num intervalo de 15 dias, iniciando em 28/09.

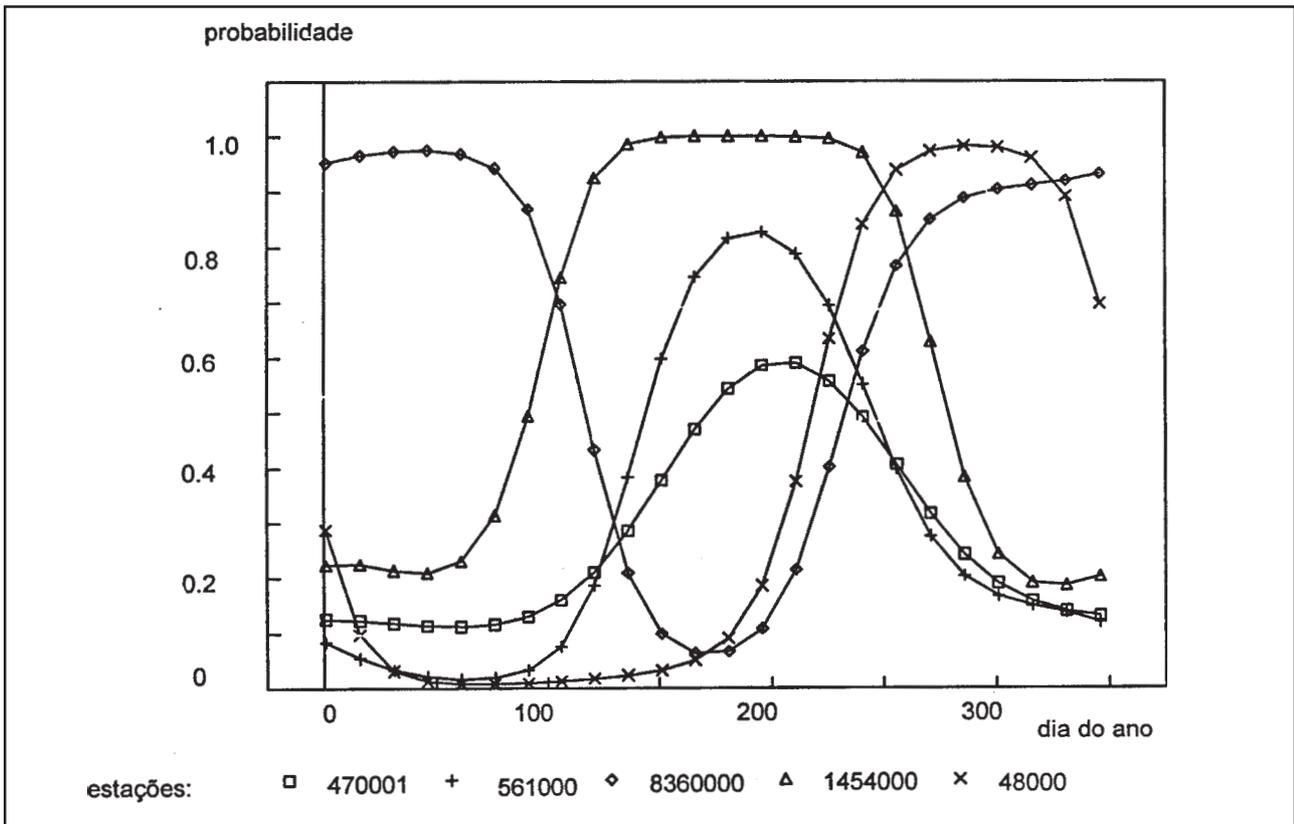


Figura 16. Probabilidade de ocorrer 5 dias secos, num intervalo de 15 dias, para estações representativas das áreas noroeste (470001), centro (561000), norte (8630000), sul (1454000) e leste (48000).

Balanço hídrico

As Figuras 17 a 20 apresentam isolinhas do armazenamento médio de água no solo (mm), nos dias 1º/01, 1º/04, 30/06 e 28/09. Estes resultados, considerando a quantidade de água precipitada e o seu armazenamento na região, são compatíveis com a análise considerando a ocorrência de precipitação, nos dois itens precedentes. Ocorre um deslocamento da área úmida nas direções, noroeste para sul, sul para leste e leste para norte. Neste movimento, as áreas noroeste e centro permanecem com mínima variação e as áreas sul e sudeste com a máxima variação. O valor mínimo do armazenamento médio de água no solo calculado no ano é apresentado pelas isolinhas da Figura 21. Observa-se linhas que cortam a região na direção sudoeste-nordeste, com valores máximos na área noroeste e valores mínimos na área sudeste. O dia em que ocorreu o mínimo é apresentado pelas isolinhas da Figura 22. Neste caso as linhas cortam a região na direção oeste-leste, indicando a influência da migração da Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT), nas estações climáticas da Amazônia. Na área ao sul o armazenamento mínimo ocorre em julho, no centro (de oeste à leste) em outubro e na área central ao norte em março.

A diferença de intensidade das estações seca e chuvosa e seus comprimentos podem ser observados no gráfico da Figura 23. Este gráfico apresenta o armazenamento de água no solo (mm), durante todo o ano, para cinco estações pluviométricas representativas das áreas noroeste (470001), central (561000), norte (8360000), sul (1454000) e leste (48000). Observa-se menor influência do dia do ano no armazenamento de água no solo na área noroeste, aumentando de intensidade e comprimento de armazenamento mínimo para o centro e sul. Na área à leste, embora sejam atingidos valores bastante pequenos de armazenamento de água no solo, o período de mínimo é bem inferior ao obtido na estação ao sul. Na estação localizada ao norte observa-se comportamento semelhante à estação ao sul, com uma defasagem de 6 meses.

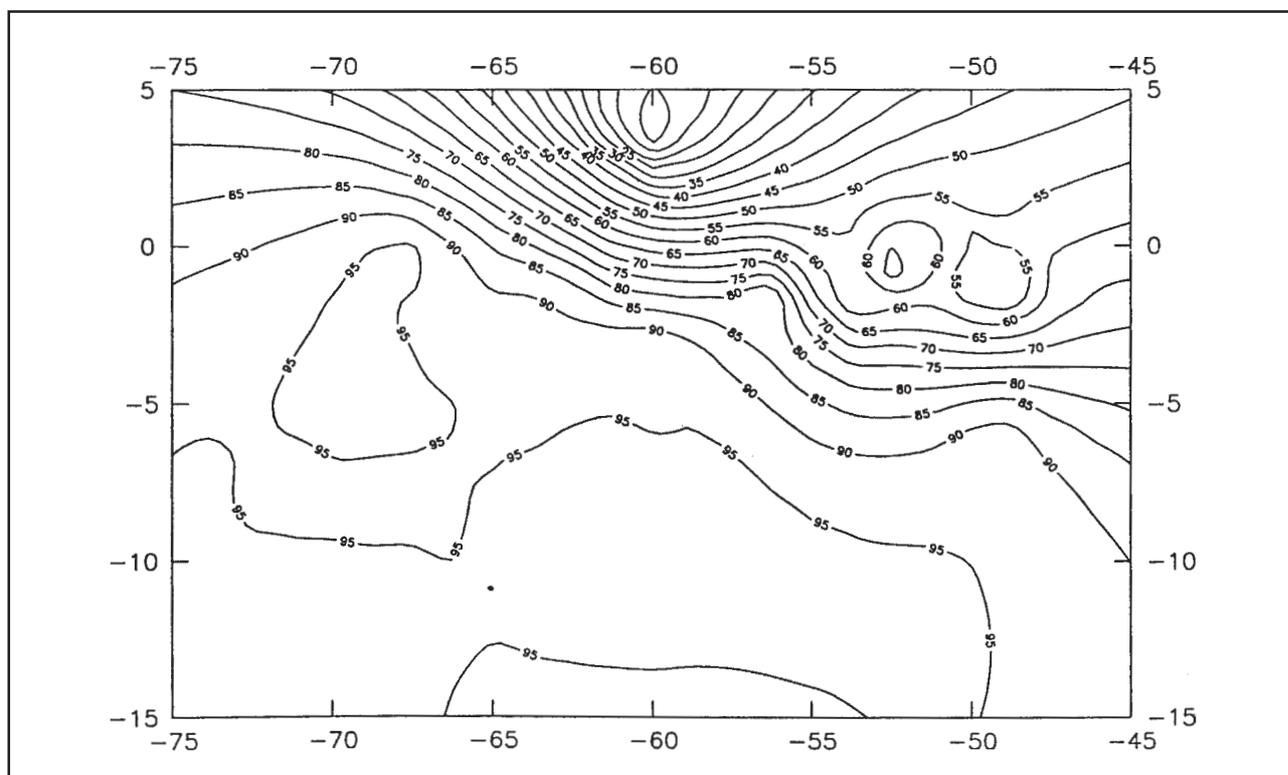


Figura 17. Armazenamento médio de água no solo (mm), em 1º/01.

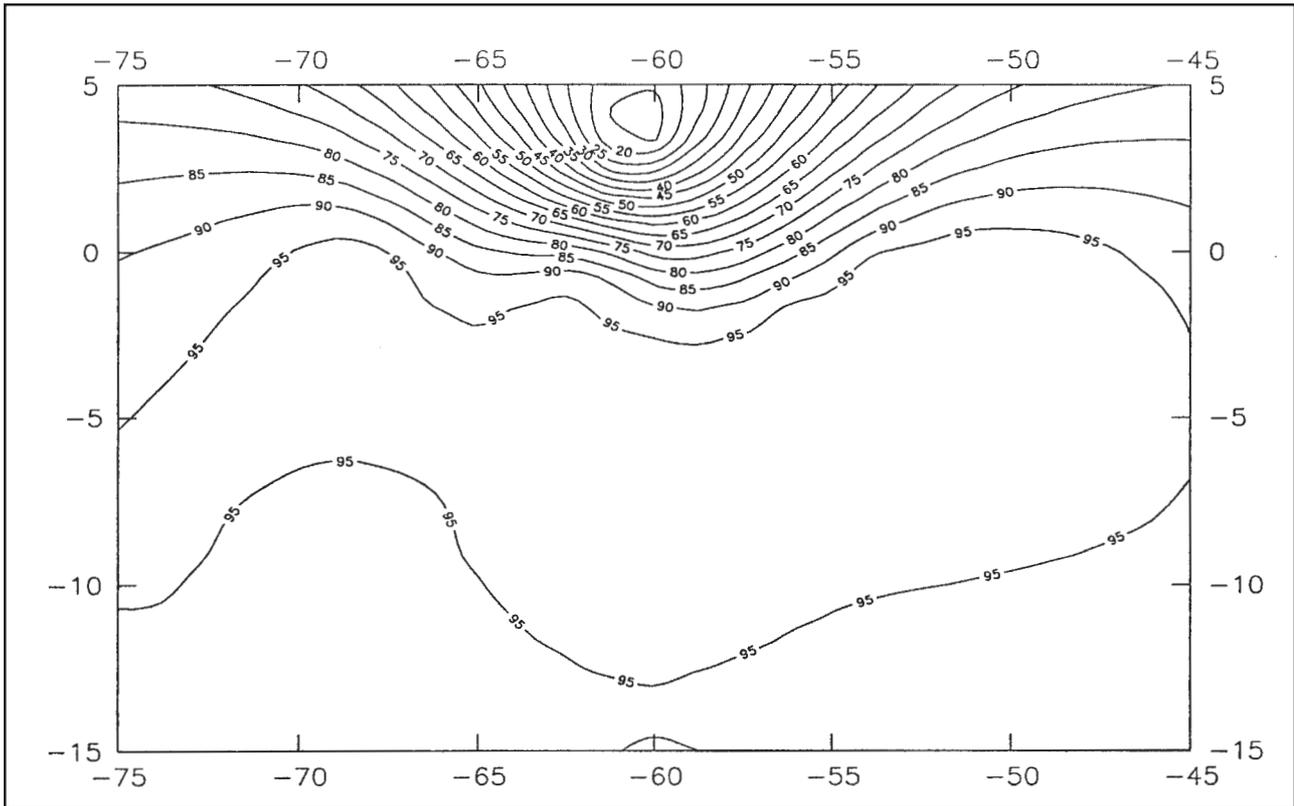


Figura 18. Armazenamento médio de água no solo (mm), em 1º/04.

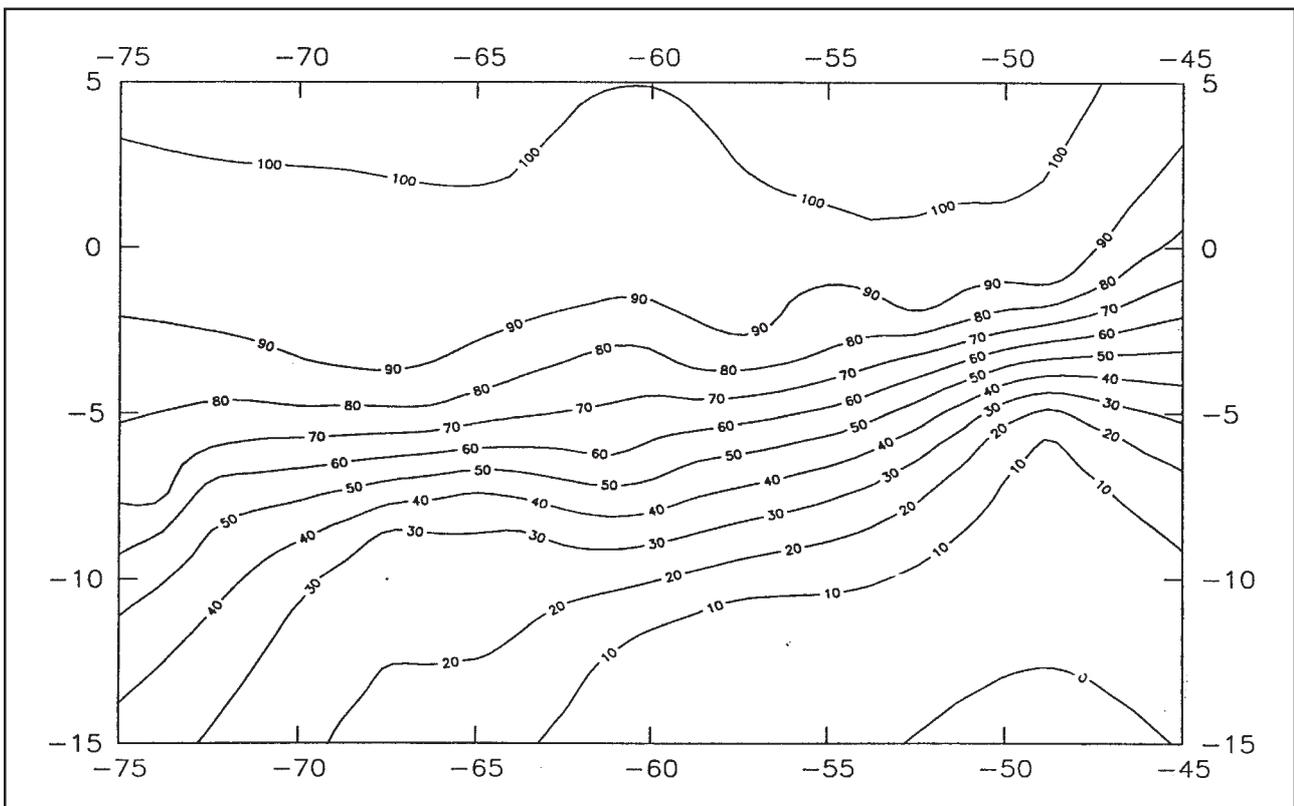


Figura 19. Armazenamento médio de água no solo (mm), em 30/06.

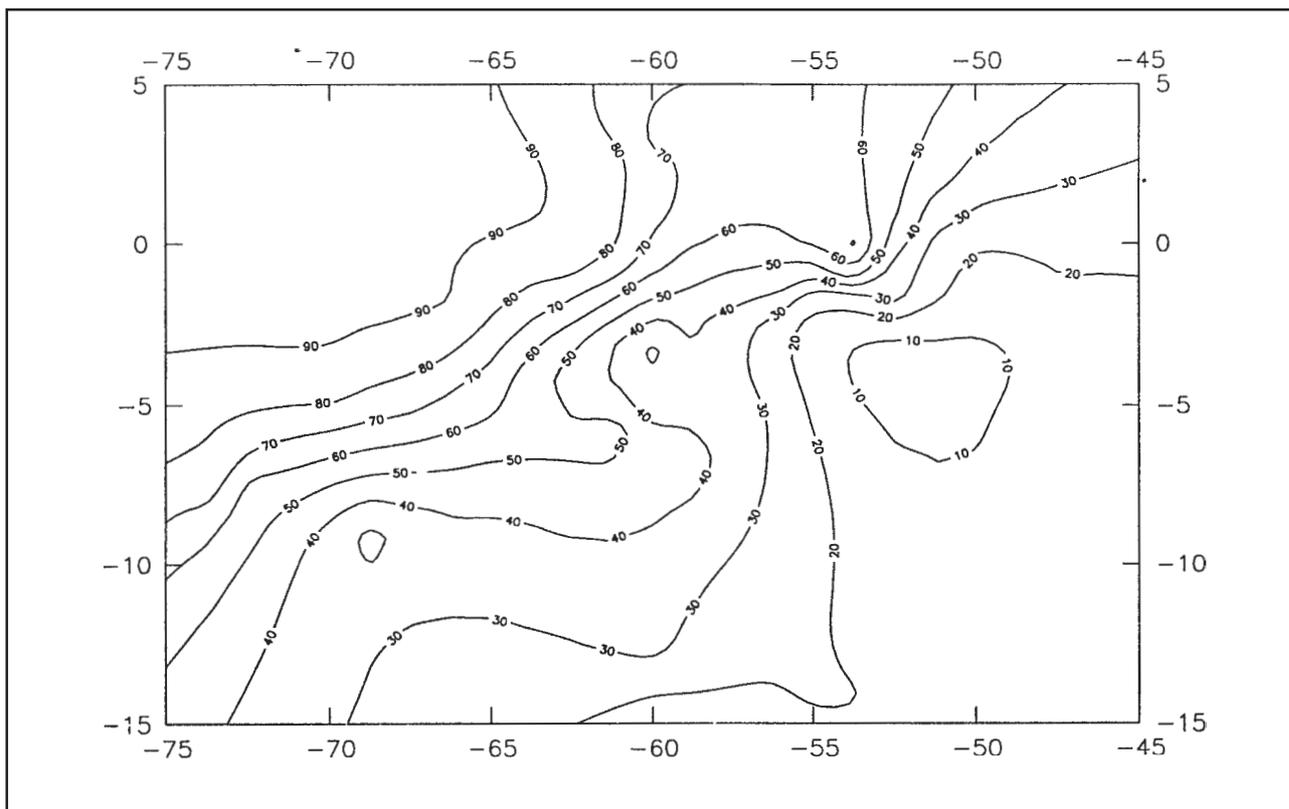


Figura 20. Armazenamento médio de água no solo (mm), em 28/09.

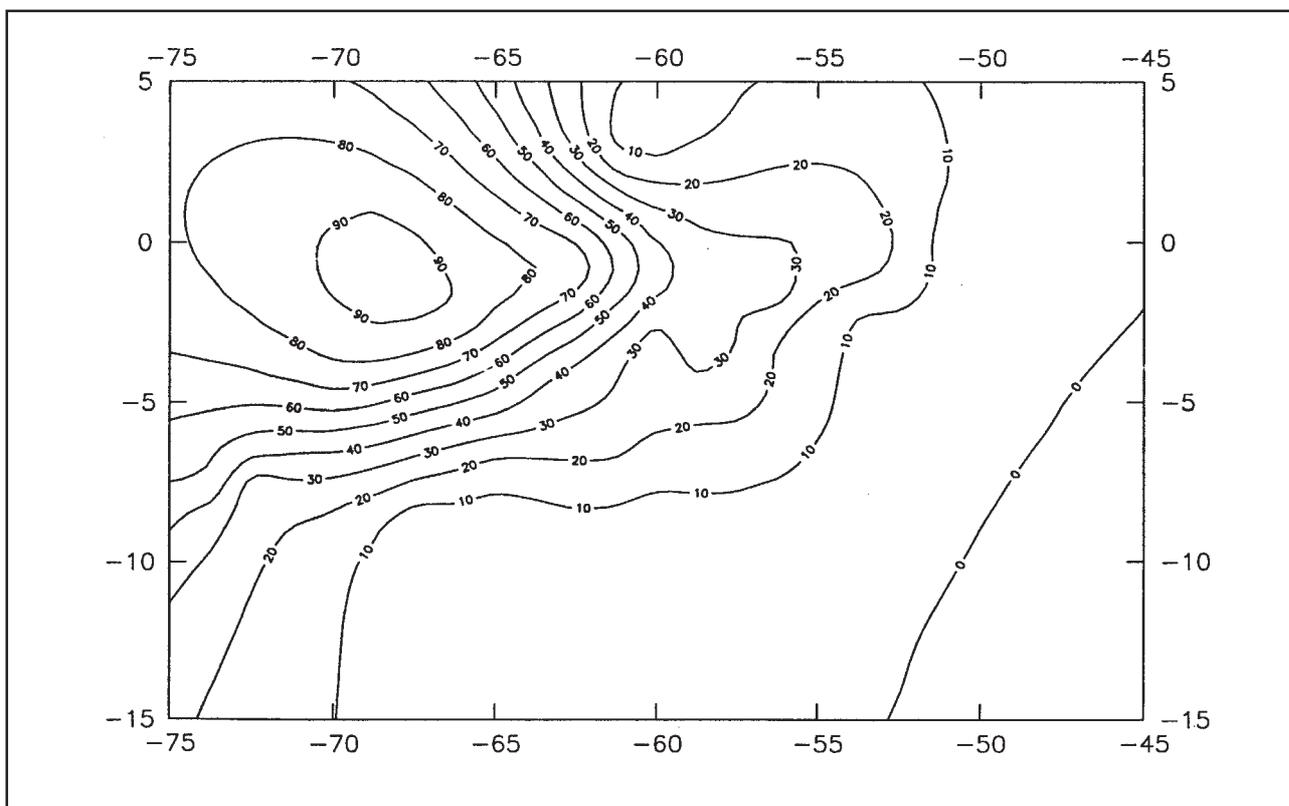


Figura 21. Valor mínimo, do armazenamento médio de água no solo (mm), no ano.

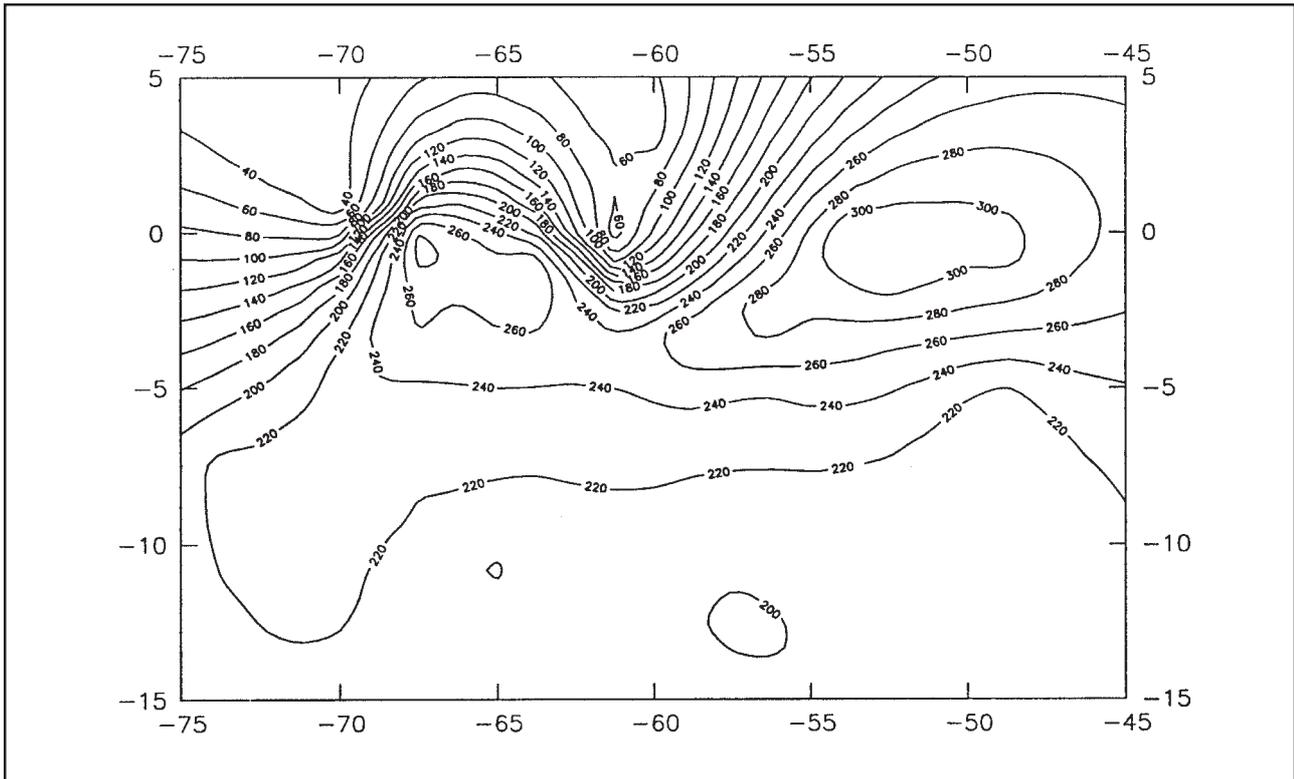


Figura 22. Dia do ano do valor mínimo, do armazenamento médio de água no solo.

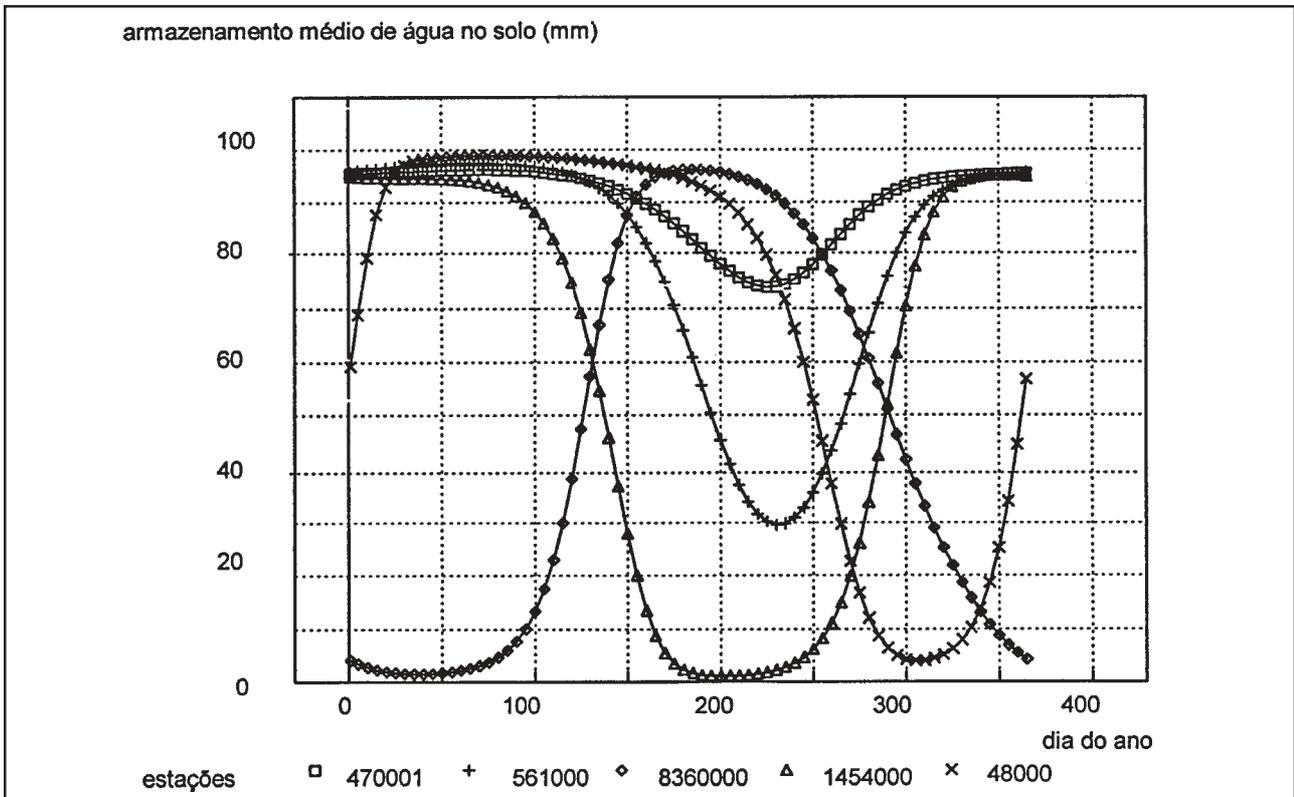


Figura 23. Armazenamento médio de água no solo (mm), para cada dia do ano, para estações representativas das áreas noroeste (470001), centro (561000), norte (8630000), sul (1454000) e leste (48000).

CONCLUSÕES

As relações de recorrência permitiram identificar as estações: seca e chuvosa e suas épocas do ano variáveis na região. É possível constatar um aumento da distribuição entre as estações do ano de Oeste para Leste e a influência da Zona Convergência Intertropical (ZCIT) na defasagem das épocas de chuva entre áreas ao Norte e ao Sul da Amazônia.

O número médio de dias chuvosos foi bastante variável no decorrer do ano e nos diferentes locais da Amazônia. Em termos de média anual, à Noroeste observa-se os maiores valores e à Sudeste os menores. A observação de tais valores no decorrer do ano permite identificar os períodos chuvosos diferenciados ao Norte, totalmente defasados do Oeste, Centro e Sul e parcialmente defasados à Leste. Conclui-se, ainda, que à Oeste, o número de dias chuvosos apresenta pouca variação no ano.

A probabilidade média de ocorrer períodos secos/úmidos, em intervalos de 15 dias variáveis no ano, apresentou grande variação na região e nas diversas épocas do ano, para os diversos comprimentos dos períodos. A área mais seca localiza-se à Sudeste. À Nordeste as estações climáticas apresentam intensidades semelhantes. A área à Noroeste apresentou maior constância durante o ano e as menores probabilidades de ocorrer longos períodos secos e chuvosos. Estas probabilidades cresceram na direção Noroeste- Centro-Sul.

O modelo de balanço hídrico foi desenvolvido na região, usando suposições simplistas. No entanto, as respostas encontradas permitem confirmar e ampliar as constatações anteriores. É desejável que este modelo seja aplicado com valores de armazenamento de água no solo e perdas mais adequados e variáveis espacialmente e temporalmente na região. O armazenamento mínimo de água no solo ao Sul ocorre em julho, no Centro (de Leste à Oeste) em outubro e ao Norte em março, sendo que à Noroeste e Centro ocorrem as menores variações no decorrer do ano e ao Sul e Leste às máximas variações. A área mais seca localiza-se à Sudeste.

REFERÊNCIAS

- 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 doutoramento. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 297p.
- PAIVA, E.M.C.D.; CLARKE, R.T. 1997. Modelagem estocástica da precipitação na Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.
- 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. *Applied Statistics, Series C*, v.31, n.3, p.330-335.

AGRADECIMENTOS

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

Recurrence Relations of Precipitation in Amazonia

ABSTRACT

Stochastic models of precipitation were fitted, and these were used to calculate, at any Amazon site, the probability of the number of wet days, in any period, and the probability of continuous dry and wet spells of given length. A model was also used to calculate the probability distribution of soil moisture on any date, given some very simplistic assumptions. Daily records from 48 raingauges, supplied by DNAEE, were used. The rainfall regime showed large spatial variation. In the Southeast, followed by the Northeast, where deforestation has been most extensive, rainfall intensity was greater, wet and dry spells alternated more frequently, and the dry and wet seasons were much more marked.