



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Aplicação do Modelo Estocástico Cadeia de Markov a Dados Diários de Precipitação dos Estados da Bahia e Sergipe

Winicius dos Santos Araújo<sup>1</sup>, Francisco de A. Saviano Souza<sup>2</sup>, José Ivaldo Barbosa de Brito<sup>3</sup>,  
Lourivaldo Mota Lima<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Doutorando em Meteorologia; Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA; Universidade Federal de Campina Grande - UFCG; E-mail: [winicius@dca.ufcg.edu.br](mailto:winicius@dca.ufcg.edu.br);

<sup>2,3</sup>Professores Drs., Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA; Universidade Federal de Campina Grande - UFCG;

<sup>4</sup>Professor Dr., Departamento de Física - DF/Universidade Estadual da Paraíba - UEPB.

Artigo recebido em 15/09/2012 e aceito em 15/10/2012

### RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi fornecer uma distribuição espacial e computar as probabilidades incondicionais e condicionais de primeira ordem das precipitações dos Estados da Bahia e Sergipe. Para tanto, foram utilizados dados diários pluviais referentes a um período de 47 anos (1960-2006) de 75 postos e/ou estações meteorológicas fornecidos pela antiga rede de postos da SUDENE através do DCA. Os resultados mostram que a zona oeste da área pesquisada é a mais favorecida com a precipitação na estação verão, ocorrendo o oposto disto na estação inverno; o leste é o mais beneficiado no inverno, o sul na primavera, e o norte no outono. Foi obtido que a probabilidade incondicional,  $P(C)$ , na região costeira, é influenciada pela alta disponibilidade de umidade do Atlântico e pela geração de sistemas que provocam precipitação devido ao contraste de temperatura da superfície oceano-continente, particularmente durante os meses de outono e primavera. No verão o efeito oceânico não é percebido devido à alta disponibilidade de umidade sobre a área pesquisada e a alta persistência observada da precipitação diária está associada com os núcleos de máximas precipitações que se destacam na estação verão, enquanto que no inverno a baixa persistência foi predominante.

Palavras - chave: distribuição espacial, cadeia de markov, precipitação diária.

## Application of Stochastic Markov Chain Model to Data Daily Rainfall of the States of Bahia and Sergipe

### ABSTRACT

The objective of this research was to provide a spatial distribution and compute the probabilities conditional and unconditional first order of precipitation of the States of Bahia and Sergipe. It had been used daily rainfall data relating to a period of 47 years (1960-2006) of 75 stations and/or meteorological stations provided by the former station network SUDENE by DCA. The results show that the area west of the area searched is more favored with rainfall in the summer season, the opposite occurring in this winter season, the east is the most improved in the winter, spring in the south, and north in the autumn. It was obtained that the unconditional probability,  $P(C)$ , the coastal region, is influenced by the high availability of moisture from the Atlantic and the generation of systems that cause precipitation due to the contrast of surface temperature of ocean-continent, particularly during the autumn months and Spring. In summer the ocean effect is not perceived due to the high availability of moisture over the area surveyed and observed high persistence of daily rainfall is associated with the nuclei of maximum precipitation that stand out in the summer season, while in winter the low persistence prevailed.

Keywords: spatial distribution, markov chain, daily precipitation.

### 1. Introdução

O principal instrumento na análise probabilística das transições entre dias secos e chuvosos é a Cadeia de Markov (Gordon,

1965), amplamente utilizada no estudo da ocorrência da precipitação pluvial diária, tanto no exterior quanto no Brasil.

Em um trabalho pioneiro, Gabriel e Neumann (1962) utilizaram cadeias homogêneas de Markov para descrever a alta

\* E-mail para correspondência: [winicius@dca.ufcg.edu.br](mailto:winicius@dca.ufcg.edu.br) (Araújo, W. S.).

persistência de dias secos consecutivos em Tel Aviv, Israel. Outro trabalho pioneiro foi o de Stern e Coe (1982), que definiram um modelo de simulação para a precipitação pluvial diária no qual a ocorrência de dias chuvosos é gerada por uma Cadeia de Markov e a quantidade de chuva é gerada por uma distribuição gama. Este modelo foi aperfeiçoado utilizando-se séries de Fourier para representar as probabilidades de transição (Stern e Coe, 1984).

A partir desses trabalhos se multiplicaram as aplicações de Cadeia de Markov na análise estatística da ocorrência de dias secos e úmidos. Entre as inúmeras pesquisas recentes, pode-se citar: Muhammad e Nabi (1991), que analisaram a ocorrência de chuva em quatro localidades no Paquistão; Assis (1991), que modelou a ocorrência de dias secos e úmidos em Piracicaba, São Paulo, e Pelotas, Rio Grande do Sul; Back (1997), que se baseou nos modelos de Stern e Coe (1982, 1984), para ajustar a precipitação pluvial no posto de Urussanga, Santa Catarina; Punyawardena e Kulasiri (1997), que compararam modelos de Cadeias de Markov de primeira e de segunda ordens para a descrição da ocorrência semanal de chuva na zona seca de Sri Lanka; De Groen e Savenije (2000), que utilizaram cadeia de Markov para simular a ocorrência de chuva, em um modelo de transpiração mensal, com dados de três localidades no Zimbábue; Andrade Júnior et al. (2001), que simularam a precipitação pluvial diária para as cidades de

Parnaíba e Teresina, Piauí, para gerar sequências de dias secos e úmidos.

O objetivo desta pesquisa foi obter a distribuição espacial das contribuições percentuais de chuvas mensais dos postos pluviométricos na área de estudo a partir de dados diários; analisar os totais das médias mensais de dias chuvosos e identificação das áreas ou culturas mais ou menos favorecidas pelo regime pluviométrico existente; realizar um estudo probabilístico mensal da ocorrência de dia com chuva dado que o anterior foi chuvoso ou seco, baseado na aplicação do modelo estocástico cadeia de Markov; quantificar e espacializar a persistência de dia chuvoso ser seguido por chuvoso em período sazonal com base nos resultados da probabilidade condicional e incondicional.

## 2. Material e Métodos

### 2.1 Caracterização da área de estudo

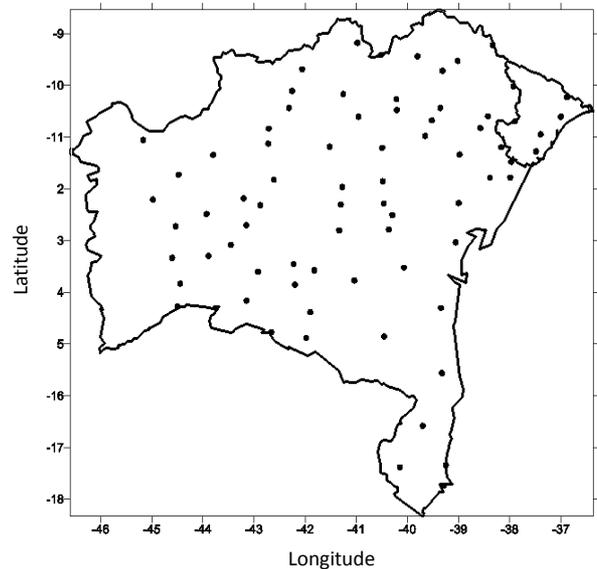
A área em estudo abrange os Estados da Bahia (561.497 km<sup>2</sup>) e Sergipe (22.050 km<sup>2</sup>), totalizando aproximadamente 40% do Nordeste Brasileiro, ocupando grande parcela do semiárido brasileiro, ou 7% do território nacional e compõe. Esta região está localizada entre as longitudes 46,59°W e 36,37°W, e pelas latitudes 18,32°S e 8,54°S (Figura 1).

Foram utilizados dados diários de precipitação fornecidos pelo DCA/UFCG (Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande), provenientes da SUDENE (Superintendência

de Desenvolvimento do Nordeste) para os Estados da Bahia e Sergipe. Entretanto, eles se revelaram insuficientes e falhos em sua grande maioria, sendo necessária uma complementação destes dados com dados da ANA (Agência Nacional das Águas), DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Depois de um trabalho detalhado de verificação da homogeneidade e qualidade dos dados, foram escolhidos 75 postos de diferentes municípios, cujos dados cobrem um período de 47 anos (1960 a 2006), apresentando boa qualidade, boa distribuição espacial e representando praticamente todas as mesorregiões da área em estudo.

Na Tabela 1 estão indicados os postos pluviométricos e/ou as estações meteorológicas e suas respectivas

coordenadas geográficas que são utilizadas neste trabalho. Estas estações estão espacialmente distribuídas na área de estudo conforme Figura 1.



**Figura 1.** Distribuição espacial dos postos pluviométricos na área geográfica em estudo.

**Tabela 1.** Localização dos 75 postos pluviométricos da área em estudo para o período de dados concomitantes de 1960 a 2006.

MUNÍCIPIO	Lat.	Lon.	Alt.	MUNÍCIPIO	Lat.	Lon.	Alt.
Andaraí - BA	-12,80	-41,33	386	Japaratuba - SE	-10,60	-36,95	79
Araci - BA	-11,33	-38,95	212	Jequié - BA	-13,52	-40,05	150
Baianópolis - BA	-12,72	-44,56	659	Juazeiro - BA	-9,40	-40,50	371
Barra - BA	-11,34	-43,82	402	Lençóis - BA	-12,30	-41,30	439
Barreiras - BA	-12,20	-45,01	439	Livram. do Brumado - BA	-13,85	-42,20	700
Bom J. da Lapa - BA	-13,08	-43,47	440	Malhada de Pedra - BA	-14,38	-41,90	470
Brejolândia - BA	-12,48	-43,95	531	Mascote - BA	-15,56	-39,30	50
Campo Formoso - BA	-10,60	-40,95	545	Medeiros Neto - BA	-17,38	-40,13	180
Cansanção - BA	-10,67	-39,50	359	Monte Santo - BA	-10,43	-39,33	500
Caravelas - BA	-17,74	-39,26	3	Mundo Novo - BA	-11,85	-40,47	480
Carinhanha - BA	-14,30	-43,77	473	Nazaré - BA	-13,03	-39,03	35
Casa Nova - BA	-9,17	-40,97	380	Oliv. dos Brejinhos - BA	-12,31	-42,89	490
Chorrochó - BA	-9,52	-38,99	380	Palmas de M. Alto - BA	-14,16	-43,16	600
Cícero Dantas - BA	-10,59	-38,39	420	Paramirim - BA	-13,45	-42,23	593
Cocos - BA	-14,27	-44,52	546	Paratinga - BA	-12,70	-43,16	420

continuação							
Condeúba - BA	-14,88	-41,98	695	Paripiranga - BA	-10,69	-37,86	430
Cont. do Sincora - BA	-13,77	-41,03	286	Paulo Afonso - BA	-9,21	-38,30	253
Coribe - BA	-13,83	-44,47	658	Pedro Alexandre - BA	-10,01	-37,89	320
Correntina - BA	-13,33	-44,63	550	Pilão Arcado - BA	-10,10	-42,26	470
Cotegipe - BA	-11,72	-44,50	460	Prado - BA	-17,34	-39,22	6
Curaçá - BA	-9,43	-39,78	400	Própria - SE	-10,22	-36,83	17
Esplanada - BA	-11,78	-37,95	181	Queimadas - BA	-10,97	-39,63	280
Estância - SE	-11,27	-37,44	53	Remanso - BA	-9,68	-42,06	400
Feira de Santana - BA	-12,27	-38,97	257	Riacho de Santana - BA	-13,60	-42,93	627
Form. do R. P. - BA	-11,05	-45,20	491	Ribeira do Pombal - BA	-10,82	-38,54	228
Gentio do Ouro - BA	-11,12	-42,73	490	Rio de Contas - BA	-13,57	-41,82	1002
Guaratinga - BA	-16,58	-39,68	324	Rio Real - BA	-11,47	-37,93	220
Iaçú - BA	-12,78	-40,35	249	Rui Barbosa - BA	-12,28	-40,45	395
Ibitiara - BA	-10,43	-42,32	460	Santana - BA	-13,29	-43,91	450
Ibotirama - BA	-12,18	-43,22	450	Senhor do Bonfim - BA	-10,47	-40,19	558
Inhambupe - BA	-11,78	-38,35	180	Sento Sé - BA	-10,16	-41,25	380
Ipupiara - BA	-11,82	-42,62	732	Uauá - BA	-9,71	-39,29	439
Irecê - BA	-11,18	-41,52	700	Ubaitaba - BA	-14,30	-39,32	50
Itaberaba - BA	-12,50	-40,28	250	Urandi - BA	-14,77	-42,67	637
Itapicuru - BA	-11,19	-38,13	153	Utinga - BA	-11,96	-41,27	967
Itapor. d'ajuda - SE	-10,94	-37,35	19	Vitória da Conquista - BA	-14,85	-40,44	950
Jacobina - BA	-11,20	-40,48	485	Xique-xique - BA	-10,83	-42,72	403
Jaguarari - BA	-10,26	-40,20	660				

Fonte: INMET (1991) e SEI/BA (1999).

Distribuição Espacial - Tendo por objetivo a identificação, e conseqüentemente a obtenção de uma boa visualização das subáreas mais e/ou menos beneficiadas pelo regime pluviométrico de chuvas sobre a área de estudo, e tendo em vista principalmente o interesse econômico disso para a região, sobretudo em relação às culturas de subsistência, foi efetuada a espacialização das contribuições percentuais de chuvas correspondentes a cada mês do período adequado de disponibilidade de dados de precipitação diária, qual seja, 47 anos, de 1960 a 2006.

Foram obtidas as médias diárias em mm para cada mês de cada ano nos 75 municípios abrangidos da área de estudo, em seguida foram calculadas as médias mensais de todo o período, e por fim computadas as cotas percentuais de cada um dos meses.

Probabilidade incondicional de precipitação - A precipitação não é um processo contínuo e suas características probabilísticas são fortemente dependentes das escalas de tempo e espaço (Lettenmaier, 1995). Muitos parâmetros da precipitação diária tornam-se importantes quando se trata de fins agrícolas e hidrológicos. Entre esses

encontram-se a probabilidade incondicional de dias chuvosos ou probabilidade climática das precipitações (Wilks, 1995), podendo caracterizar as regiões pela quantidade de dias em que ocorrem precipitação durante o intervalo de tempo considerado, que pode ser um ano, uma estação ou um mês.

Para esta pesquisa, a probabilidade de ocorrência de dias chuvosos para cada mês ao longo do período de 1960 a 2006, foi calculada por meio de um programa computacional desenvolvido em linguagem Fortran pelo DCA/UFCG, seguindo a metodologia de Katz (1983). A ocorrência (dia chuvoso) ou não ocorrência de precipitação (dia seco) para um dia  $t$ , do mês  $m$ , do ano  $n$  tomando o limiar de  $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , é representada pela função abaixo:

$$J(t, m, n) = \begin{cases} 1 & \text{se } x(t, m, n) \geq 1\text{mm} \\ 0 & \text{se } x(t, m, n) < 1\text{mm} \end{cases} \quad (1)$$

O número total de ocorrências de dias chuvosos durante os  $N$  anos (47 neste caso), são utilizados para calcular a probabilidade incondicional de um determinado dia do mês ser chuvoso,  $P(C)$ , do seguinte modo:

$$P(C) = \frac{1}{N \cdot t_{\text{máx}}} \sum_{n=1}^N J(t, m, n) \quad (2)$$

em que  $t = 1, 2, \dots, 31$ ,  $m = 1, 2, \dots, 12$  e  $t_{\text{máx}}$  é número máximo de dias do respectivo mês.

O complemento do resultado da equação acima se refere à probabilidade incondicional de não precipitação,  $P(S)$ . A média sazonal de probabilidade incondicional também foi calculada a partir da eq. 2, de

acordo com o número total de dias de cada estação do ano.

Probabilidade condicional de precipitação - Em termos de Cadeia de Markov, a estimativa de sequências de dia chuvoso dado que o anterior foi seco,  $P(C/S)$ , e dia chuvoso dado que o anterior foi chuvoso,  $P(C/C)$ , são dois tipos de transição de probabilidade que servem como parâmetros para descrever a persistência em termos de ocorrência ou não ocorrência de precipitação em algum dia, tomando um determinado valor limiar (neste caso  $1,0 \text{ mm}$ ). Desse modo se fornece uma descrição estatística da precipitação, podendo ajudar a explicar possíveis mecanismos físicos associados com a precipitação diária.

As probabilidades condicionais que representam a ocorrência de um dia chuvoso dado que o anterior foi seco,  $P(C/S)$ , e um dia chuvoso dado que o anterior foi chuvoso,  $P(C/C)$ , são determinadas segundo Katz (1983) como segue:

$$P(C/S)(t, m, n) = \begin{cases} 1 & \text{se } J(t+1, m, n) = 1 \\ 0 & \text{se } J(t+1, m, n) = 0 \end{cases} \\ \text{e } J(t, m, n) = 0 \\ \text{ou } J(t, m, n) = 1 \quad (3)$$

e

$$P(C/C)(t, m, n) = \begin{cases} 1 & \text{se } J(t+1, m, n) = 1 \text{ e} \\ 0 & \text{se } J(t+1, m, n) = 0 \text{ ou} \end{cases} \\ J(t, m, n) = 1 \\ J(t, m, n) = 0 \quad (4)$$

As probabilidades condicionais médias de um dia seco seguido por um dia chuvoso e de um dia chuvoso seguido por um dia

chuvoso são determinadas por:

$$P(C/S)(t) = \frac{1}{N.t_{máx}} \sum_{n=1}^N P(C/S)(t, m, n) \quad (5)$$

e

$$P(C/C)(t) = \frac{1}{N.t_{máx}} \sum_{n=1}^N P(C/C)(t, m, n) \quad (6)$$

em que  $t = 1, 2, \dots, 31$ ,  $m = 1, 2, \dots, 12$  e  $t_{máx}$  é número máximo de dias do respectivo mês.

Também, a média sazonal de probabilidade condicional foi calculada a partir das equações 5 e 6, de acordo com o número total de dias de cada estação do ano.

### 3. Resultados e Discussão

Distribuição Espacial da Precipitação para os Estados da Bahia e Sergipe - Foi confeccionada a Figura 2, que mostra as isolinhas das frações de contribuição de chuva diária dos 12 meses. Conforme a Figura 2, a concentração de chuvas para a estação verão na área de estudo se intensifica a partir de janeiro na zona oeste baiana, favorecendo uma antiga área de pecuária extensiva e pequena produção agrícola de alimentos que se fortaleceram na caatinga e no cerrado passando por alterações significativas na década de 1980 com a introdução do plantio e colheita mecanizados e a crescente produção de grãos, visando sua comercialização e industrialização. Já em fevereiro, as chuvas se concentram mais ao extremo setentrional.

Para a estação outono (março, abril, maio) (Figura 2), as chuvas se concentram a partir de março na zona do vale do São

Francisco, que é baseada na atividade pastoril extensiva e tem como identidade regional o rio São Francisco, onde se desenvolvem os principais projetos de irrigação. Nos terrenos recobertos de caatingas, utilizam-se técnicas de irrigação para lavouras de tomate, cebola e frutas, e ainda se desenvolve a atividade pesqueira no lago Sobradinho.

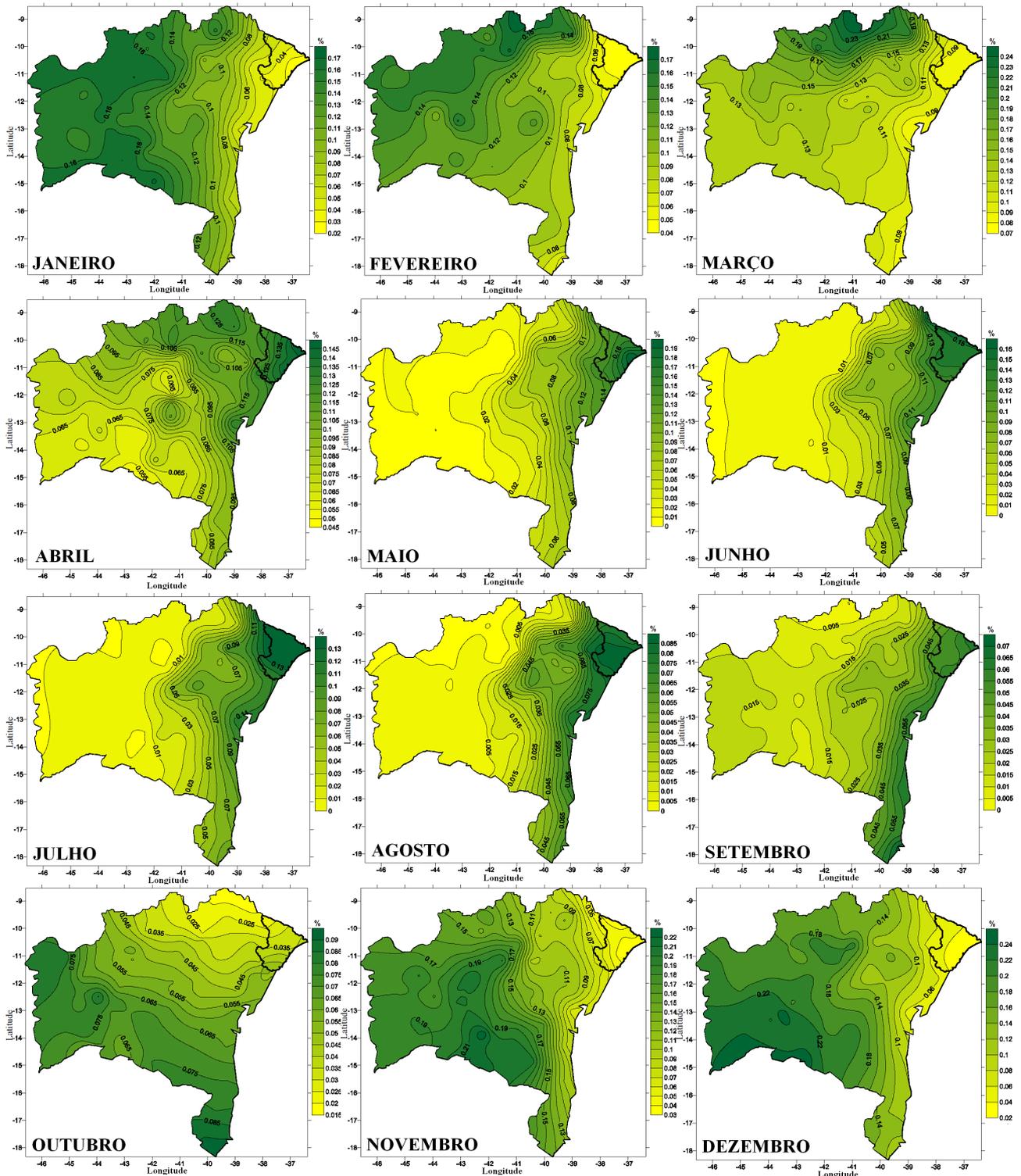
Para os meses de abril e maio (Figura 2), na zona do centro-norte baiano e todo o estado de Sergipe, nesses trechos, que antecedem o bloco elevado central, onde a presença de cerrados e do agreste, observa-se uma gradual diminuição da pluviosidade, até se alcançar o sertão seco do baixo-médio São Francisco, região que domina a caatinga, ocorre a concentração de chuvas que favorece as funções da atividade pastoril, agricultura de subsistência e algumas culturas comerciais como algodão, mamona, sisal e cebola.

Na estação inverno (junho, julho, agosto) (Figura 2), no oeste baiano praticamente não chove, as chuvas se concentram na faixa costeira; quente, úmida e relativamente estreita em relação à área de estudo. Por essa razão, são potencialmente beneficiados os trechos do norte que tem como atividade importante a lavoura comercial do coco e o extrativismo vegetal, e terrenos próximos ao litoral na altura da zona de Ilhéus e Itabuna, principais áreas produtoras de cacau.

Especialmente o mês de outubro (Figura 2), o extremo sul da Bahia representa a mesorregião mais favorecida pela

concentração de chuvas. Constituída por restingas, tabuleiros e menor adensamento populacional em comparação com as demais

áreas do litoral, apresenta pequeno desenvolvimento da economia, denotada pelo turismo, pesca e pecuária.



**Figura 2.** Distribuição espacial da fração anual de contribuição mensal de chuvas durante 1960 a 2006.

Concluindo o ciclo anual, em novembro as chuvas situam-se no oeste baiano.

Probabilidade markoviana incondicional sazonal de dias chuvosos - A média sazonal de probabilidade incondicional

de dias chuvosos,  $P(C)$ , para cada estação do ano, calculada a partir da equação 2, é apresentada na Figura 3. Nota-se que em todas as estações, os valores máximos de probabilidades são relativamente próximos, fato que indica a relação direta entre ocorrências de dias chuvosos e a quantidade de precipitação registrada, independente da estação do ano, conforme Figura 2.

Probabilidades máximas de dias chuvosos entre 0,29 e 0,35 são observadas nos meses de primavera (SON) sobre uma estreita faixa no sudeste da Bahia, estendendo-se com menor intensidade até  $-40^\circ$  W (Figura 3a). Verifica-se que no início do período mais chuvoso, novembro, o valor máximo de precipitação que incide na área de estudo está associado à penetração de frentes frias vindas do sul, e que alcançam latitudes mais baixas nos meses de novembro a fevereiro (Alves e Kayano, 1991).

Baixos valores de probabilidade são observados a partir do extremo norte da Bahia, estendendo-se para latitudes mais ao sul, se repetindo já próximos à divisa com o norte de Minas Gerais, esses baixos valores são intercalados por precipitações mais expressivas na faixa central da área de estudo (Figura 3a).

Durante os meses de verão (DJF) o número de dias chuvosos aumenta em todo o Brasil, devido à alta disponibilidade de umidade. Por outro lado, o efeito do Oceano Atlântico sobre a distribuição das probabilidades nessa estação aparentemente é

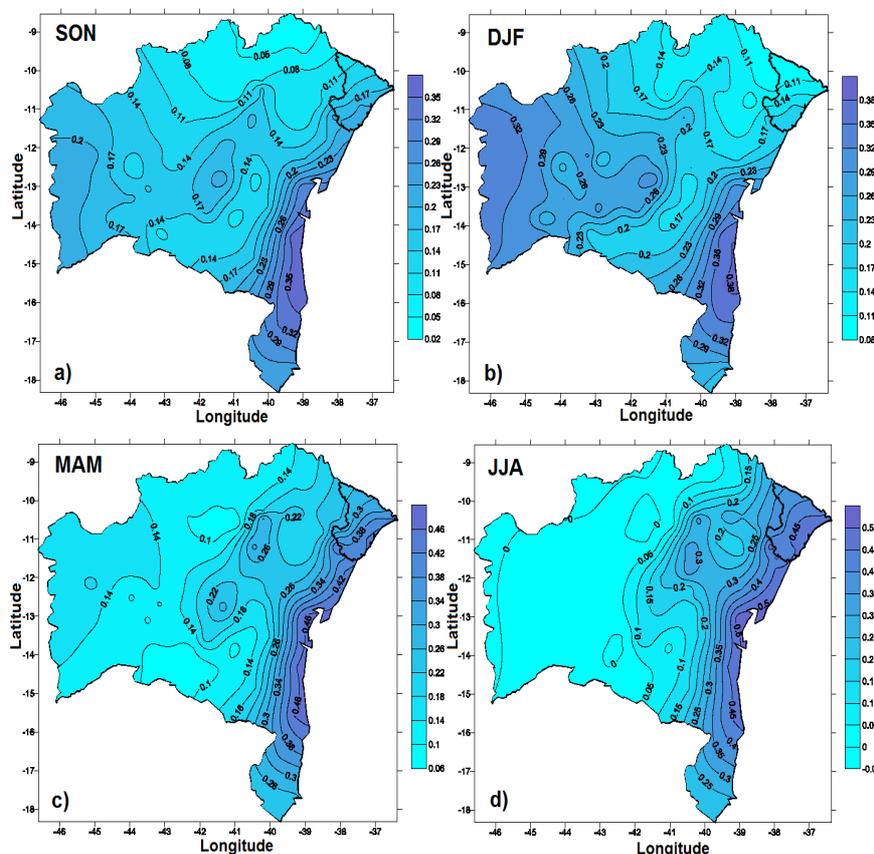
inibido (Rao et al., 1996). Na região oeste da área de estudo, aproximadamente na posição climatológica do máximo de precipitação de verão ( $-12^\circ$ S,  $-45^\circ$ W), registram-se os valores máximos de probabilidades (Figura 3b), sendo superados apenas pelos valores do extremo leste da região sul da Bahia. Os valores que vão decrescendo a partir de 0,3 e se estendem principalmente pela faixa nordeste da área de estudo, são remanescentes de máximos de precipitação na região amazônica associada com a ZCAS.

Um decréscimo no número de dias chuvosos é observado sobre todo o oeste baiano durante o outono (MAM) e um aumento sobre toda a área costeira (Figura 3c), estão coerentes com a redução das precipitações médias observadas que ocorrem sobre o Brasil central e particularmente na faixa que vai da Região Nordeste do Brasil, passando pelo interior da Região Sudeste até o norte da Região Sul. Ressalta-se que no outono ainda se nota o efeito oceânico sobre a região costeira da área de estudo. Pois, nesta região, o máximo de precipitação que se inicia no mês março, e se estende até julho, está ligado à maior atividade de circulação de brisa e aos ventos alísios que advectam umidade para o continente e à ação das frentes frias remanescentes que se propagam ao longo da costa (Kousky, 1979; Markhan e McInain, 1977; Alves e Kayano, 1991).

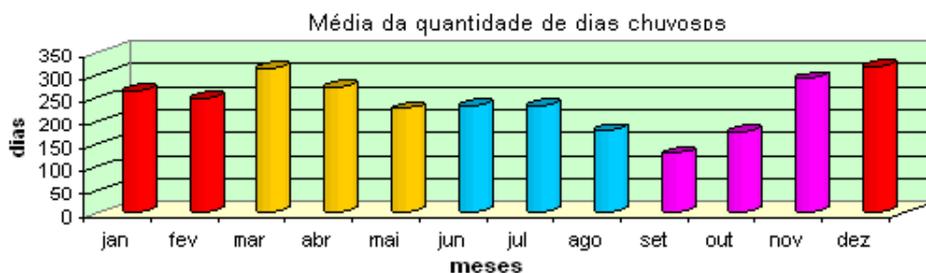
Durante os meses de inverno (JJA) observa-se um incremento dos valores de probabilidades sobre as áreas litorâneas da

porção nordeste e sudeste da área de estudo, sobretudo no estado de Sergipe (aproximadamente 0,5), provavelmente devido à maior disponibilidade de umidade transportada pelos distúrbios de leste. As probabilidades máximas de dias chuvosos continuam deslocando-se para o leste, conforme o comportamento da precipitação média dessa estação (JJA), compreendendo todo o leste da área de estudo, com valores em torno de 0,2 a 0,45 (Figura 3d). Sobre a

maior parte da área de estudo, predominantemente mais a oeste, as probabilidades são inferiores a 0,1 e as precipitações menores que 90 mm, exceto na mesorregião sul e mesorregiões costeiras do sudeste e nordeste, onde as probabilidades estão entre 0,3 e 0,4. Nas mesorregiões costeiras o efeito da brisa marítima torna-se importante durante esta estação de inverno (Kousky, 1980).



**Figura 3.** Distribuição espacial de probabilidade incondicional de dias chuvosos - P(C), primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).



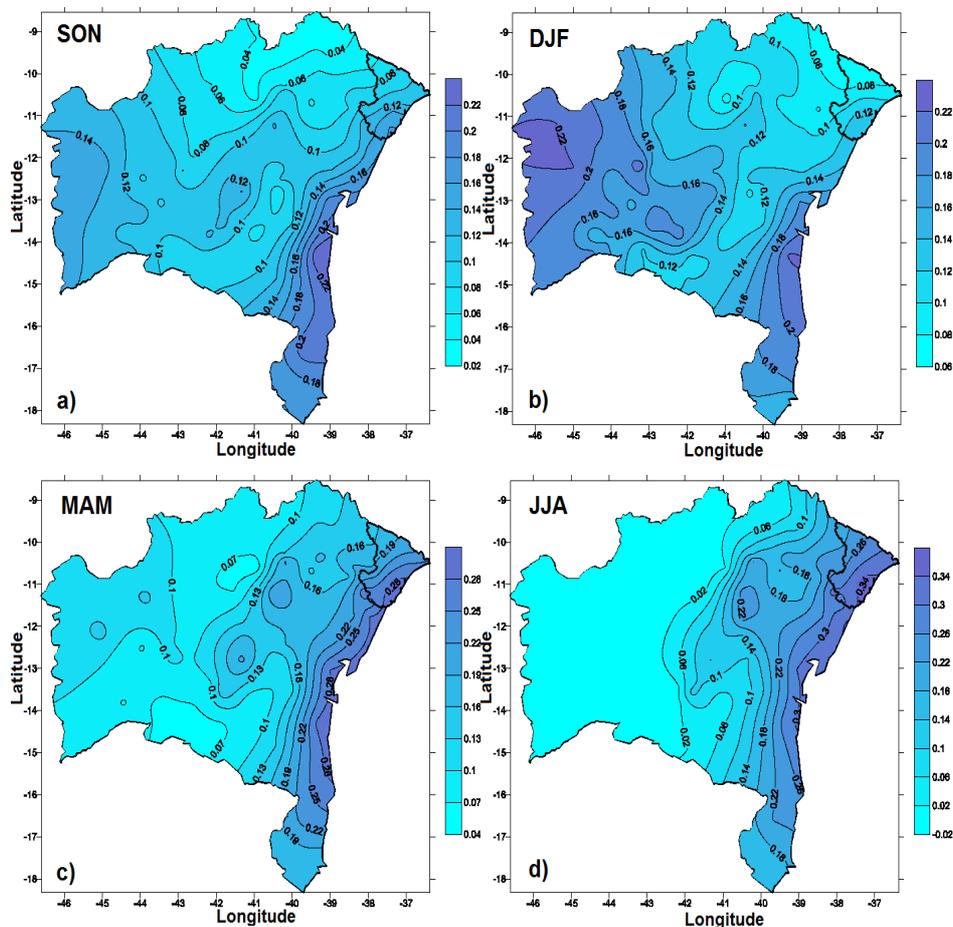
**Figura 4.** Totais médios de dias chuvosos da área de estudo entre 1960-2006.

Probabilidade markoviana condicional sazonal de dias chuvosos - Os padrões espaciais de probabilidade condicional média, de dia seco seguido de chuvoso, ou seja, de dia chuvoso dado que o anterior foi seco,  $P(C/S)$ , para cada uma das estações do ano, calculadas a partir da equação 5, mostram valores inferiores a 0,34 (Figura 5a-d). No início da estação chuvosa (SON), na área de estudo (Figura 5a), os valores de probabilidade acima de 0,1 cobrem toda a área, com exceção da parte mais ao norte conhecida territorialmente como Sertão do São Francisco, devido à proximidade do rio.

No verão (DJF) os valores máximos de probabilidade deslocam-se para o oeste da

área de estudo, mais expressivamente, o oeste Baiano e bacia do rio Corrente; e também para o sudeste, no litoral, baixo e extremo sul. Os valores mínimos aparecem sobre o extremo nordeste da área de estudo, praticamente metade do estado de Sergipe, e localidades baianas conhecidas como Itaparica, Semi-Árido Nordeste II e Sisal.

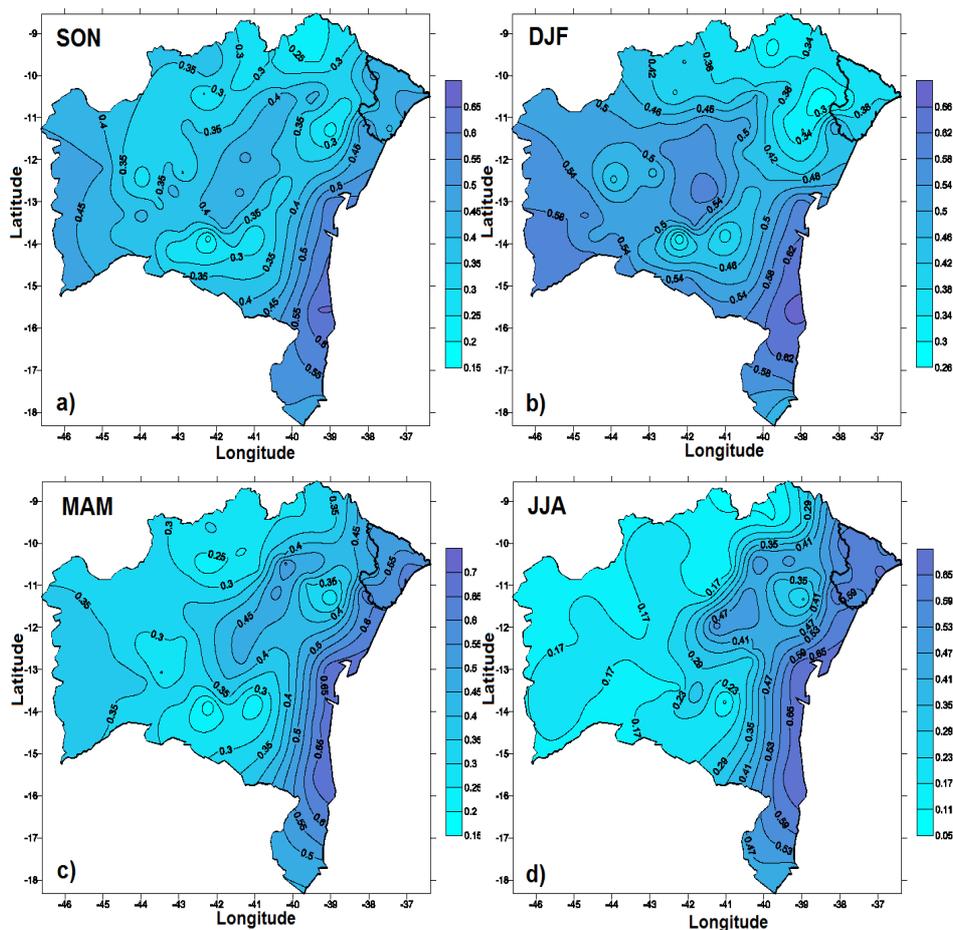
Durante os meses do outono (Figura 5c), os valores mínimos se estendem em quase toda a área de estudo, com exceção das regiões costeiras até  $-42^{\circ}W$  (próximo à Chapada diamantina). No inverno (Figura 5d) as probabilidades mínimas se localizam sobre quase todo o oeste, enquanto que os valores máximos se estendem ao longo do litoral.



**Figura 5.** Distribuição espacial de probabilidade condicional de dias secos seguidos de dias chuvosos -  $P(C/S)$ , primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).

A distribuição de probabilidades médias para cada estação do ano de dia chuvoso seguido de dia chuvoso, ou seja, de dia chuvoso dado que o anterior foi chuvoso,  $P(C/C)$ , para a área de estudo, calculada através da equação 6, mostra que os valores máximos não diferem expressivamente de uma estação para outra (Figura 6a-d). Os

padrões de distribuição em todas as estações seguem as distribuições da precipitação média mensal (Figuras 2) e a distribuição de probabilidade condicional de dias chuvosos (Figura 6a-d), indicando a forte associação entre ocorrências de dias chuvosos e quantidade de precipitação.



**Figura 6.** Distribuição espacial de probabilidade condicional de dias chuvosos seguidos de dias chuvosos -  $P(C/C)$ , primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).

Os máximos valores de probabilidade condicional de dias chuvosos seguidos de dias chuvosos indicam alta continuidade dos dias chuvosos associados aos sistemas predominantes que geram precipitação sobre a área de estudo, em cada uma das estações.

No início do período chuvoso, a partir de outubro, a maior probabilidade localiza-se sobre a região sudeste, abrangendo as sub-regiões do Recôncavo e área Metropolitana de Salvador ao sul (Figura 6a), onde os mecanismos de convecção intensa parecem

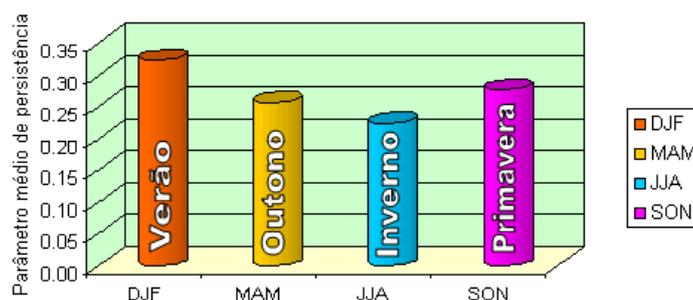
ser contínuos devido aos sistemas frontais. A intensificação da convecção sobre a área de estudo, seguindo o ciclo anual, causa incremento e a persistência de dias chuvosos, como indicados pelo incremento dos valores de probabilidade condicional durante a estação de verão (Figura 6b). Posteriormente, os valores de probabilidades máximas se deslocam cobrindo toda a porção leste, com exceção do território do Sisal, durante os meses de outono (Figura 6c), seguindo os máximos valores médios e alta probabilidade incondicional de precipitação. Já no inverno, o que se verificou no outono é intensificado. Os valores máximos se concentram no leste da área de estudo com exceção do extremo norte, observando-se baixos valores de probabilidade. No resto da área as probabilidades são inferiores a 0,17 (Figura 6d). Em termos de transição de probabilidades, a relação  $P(C/S) < P(C) < P(C/C)$  (Wilks, 1995) se confirma em todas as estações do ano na área de estudo.

A persistência da Cadeia de Markov, que implica em um alto grau de autocorrelação com defasagem de um,  $r(1)$ , denominado parâmetro de persistência, pode ser calculada a partir das probabilidades de

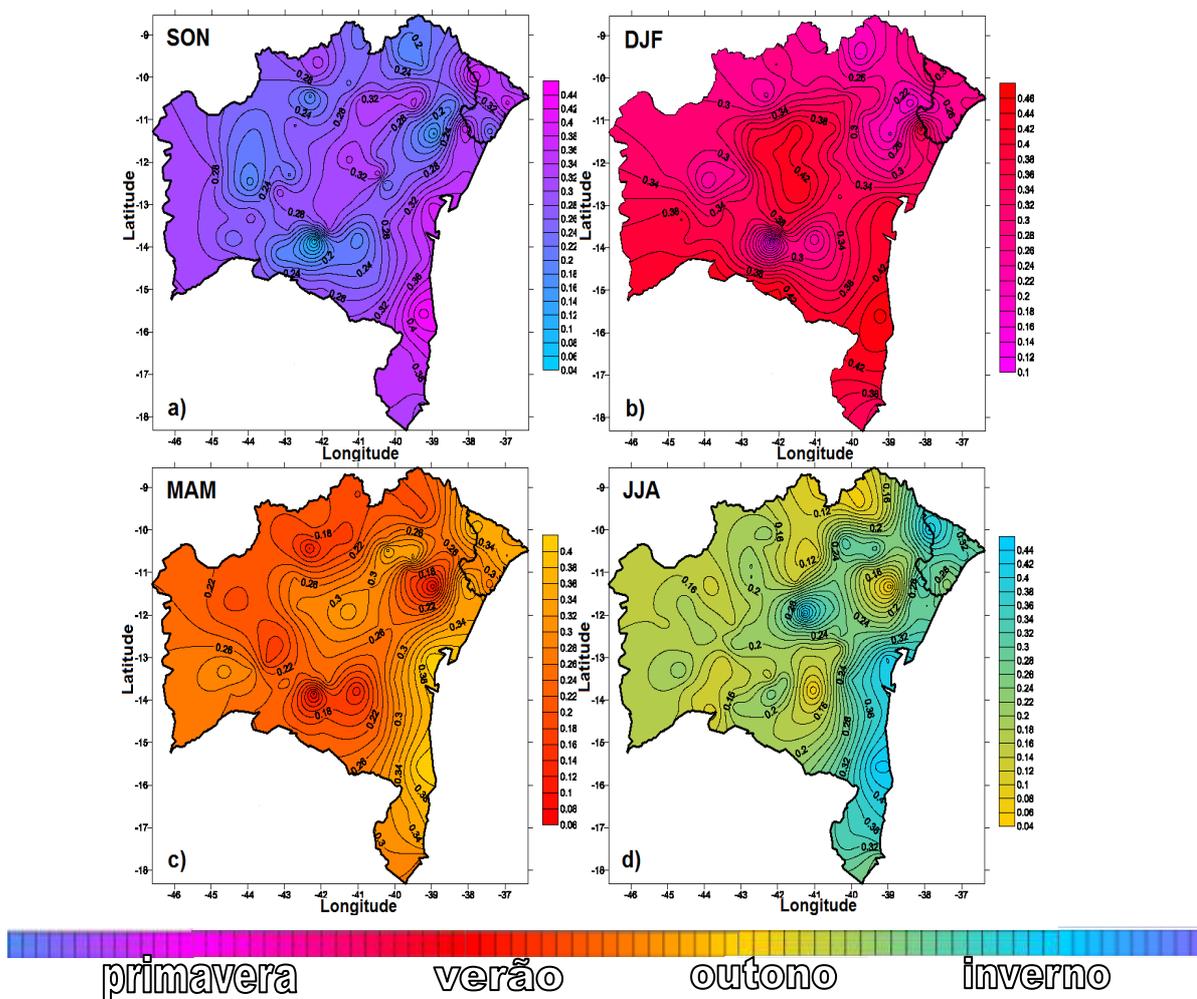
transição  $P(C/C)$  e  $P(C/S)$ , com  $r(1) = P(C/C) - P(C/S)$  (Wilks, 1995).

Assim, quanto maior a diferença entre  $P(C/C)$  e  $P(C/S)$  maior será a persistência da precipitação diária. Isto significa que é mais provável que um dia chuvoso seja seguido por um dia chuvoso e cada vez menos provável que um dia seco seja seguido por um dia chuvoso.

Seguindo este conceito, com base nas Figuras 4, 5a-d, 6a-d, 7 e 8, pode-se inferir para a área de estudo, que particularmente a parte oeste, sudeste e centro-norte na estação de verão (DJF), são as que apresentam os maiores parâmetros de persistência, excetuando-se apenas o Vale Jiquiriçá, Bacia do Paramirim e da Bacia do Jacuípe ao extremo norte. A alta persistência também ocorre no extremo sul e porção do sudeste na estação primavera (SON), especialmente do território de Piemonte do Paraguaçu às áreas costeiras, já para o inverno (JJA), quase metade da área de estudo, a porção oeste, é a que apresenta os menores valores de persistência. Estas regiões que demonstram persistência podem facilitar o prognóstico da precipitação em curto e médio prazo.



**Figura 7.** Parâmetro médio de persistência para cada estação do ano.



**Figura 8.** Distribuição espacial do parâmetro de persistência  $r(1) = P(C/C) - P(C/S)$  na área de estudo, primavera (a), verão (b), outono (c) e inverno (d).

#### 4. Conclusões

A distribuição espacial das estatísticas da precipitação sobre a área pesquisada mostra que a variabilidade desta, em escala interanual e sazonal, apresenta características regionais intrínsecas. O ciclo anual é a característica mais proeminente da precipitação sobre a maior parte do domínio, com relativa persistência interanual. A zona oeste da área pesquisada é a mais favorecida com a precipitação na estação verão, ocorrendo o oposto disto na estação inverno; o leste é o mais beneficiado no inverno, o sul na primavera, e o norte no outono.

A distribuição sazonal da precipitação

média está diretamente relacionada com a probabilidade incondicional de dias chuvosos e probabilidade condicional de dia chuvoso seguido de dia chuvoso, em todas as estações do ano. Assim, conclui-se que nas regiões onde o índice pluviométrico é baixo (alto), a probabilidade de precipitações fracas (moderada) é máxima. A probabilidade incondicional,  $P(C)$ , probabilidade de eventos úmidos ao longo da região costeira, aparentemente modulados pela alta disponibilidade de umidade do Atlântico e pela geração de sistemas que provocam precipitação devido ao contraste oceano-continente, particularmente durante os meses

de outono e primavera. No verão o efeito oceânico não é percebido devido à alta disponibilidade de umidade sobre a área pesquisada. A alta persistência da precipitação diária está associada com os núcleos de máximas precipitações e se destaca na estação verão, enquanto que a baixa persistência predomina no inverno. Os verões e as primaveras são mais chuvosos, em média, para todo o litoral. O contrário é observado para o outono e inverno.

## 5. Agradecimentos

À CAPES pela ajuda financeira e aos revisores anônimos pelo afincamento nas correções.

## 6. Referências

Alves, J. M. B e Kayano, M. T. (1991). Estudo preliminar da precipitação no sul do Ceará durante a pré-estação chuvosa. *Boletim Climanalise*, v.6, n.2, p.41-50.

Andrade Júnior, A. S.; Frizzone, J. A.; Sentelhas, P. C. (2001). Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.2, p.271-278.

Assis, F. N. (1991). Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba-SP e Pelotas-RS. 1991. 134 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

Back, A. J. (1997). Aplicação de cadeias

markovianas à modelagem da precipitação diária. *Revista de Tecnologia e Ambiente*, v.4, n.9, p.17-28.

De Groen, M. M.; Savenije, H. H. G. (2000). Markov chains at daily timesteps, key to transpiration at monthly timesteps. In: *WARFSA WATERNET SYMPOSIUM*, 1., 2000, Maputo. Sustainable use of water resources: proceedings. Maputo: WARFSA. p.1-12.

Gabriel, K. R.; Neumann, J. A. (1962). Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.88, n.11, p.90-95.

Gordon, P. (1965). *Théorie des chaînes de Markov finies et ses applications*. Paris: Dunod, 130f.

Katz, R. W. (Sept. 1983). Statistical procedures for making inferences about precipitation changes simulated by an atmospheric general circulation model. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 40, n.9, p.2193-2201.

Kousky, V. E. (1979). Frontal influences on northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v.107, n.17, p.1140-1153.

Kousky, V. E. (1980). Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 108, n.4, p.488-498.

Lettenmaier, D. (1995). Stochastic modeling of

precipitation with applications to climate model downscaling. In: Von Storch, H.; Navarra, A. ed. Analysis of climate variability: Applications of statistical techniques. Berlin: Springer. Cap. 11, p.197-212.

Markhan, C. G. e Mclain, D. R. (1977). Sea Surface Temperature Related to Tain in Ceará Northeastern Brazil. *Nature*, n.265, p.320-323.

Muhammad, F.; Nabi, G. (1991). Markov chain model for rainfall occurrence in Pakistan. *Journal of Islamic Academy of Sciences*, v.4, p.173-178.

Punyawardena, B. V. R.; Kulasiri, D. (1997). On development and comparative study of two Markov models of rainfall in the dry zone of Sri Lanka. In: JOINT INTERNATIONAL

CONFERENCE ON AGRICULTURAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 1997, Dhaka. Proceedings. Dhaka: ASAE, p.231-238.

Rao, V. B.; Cavalcanti, I. F. A.; Hada, K. (Nov. 1996). Annual variations of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. *Journal of Geophysical Research*, v. 101, n. D21, p. 26539-26551.

Stern, R. D.; Coe, R. (1982). The use of rainfall models in agricultural planning. *Agricultural Meteorology*, v.26, n. 7, p.35-50.

Stern, R. D.; Coe, R. (1984). A model fitting analysis of daily rainfall data. *Journal of the Royal Statistical Society*, v.147, p.1-34.

Wilks, D. S. (1995). *Statistical methods in the atmospheric sciences: An introduction*. San Diego: Academic Press. 464 p.