



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



A Teoria da Entropia na Análise da Precipitação no Estado da Paraíba

Edicarlos Pereira de Sousa¹, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva², João Hugo Baracuy da Cunha Campos³, Sonaly Duarte de Oliveira⁴

¹ Doutorando em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande - PB, Brasil. E-mail: edicarlos_p@hotmail.com;

² Prof. Doutor, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande - PB, Brasil. E-mail: vicente@dca.ufcg.edu.br;

³ Prof. Doutor, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, Universidade Estadual da Paraíba, UEPB, Araruna - PB, Brasil. E-mail: jhugocampos@yahoo.com.br;

⁴ Doutoranda em Meteorologia, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande - PB, Brasil. E-mail: nalydu@hotmail.com.

Artigo recebido em 02/07/2012 e aceito em 24/07/2012

RESUMO

A teoria da entropia de Shannon foi usada para avaliar a variabilidade espacial das chuvas e o potencial da disponibilidade de recursos hídricos do Estado da Paraíba a partir de dados diários de precipitação pluvial de 77 postos para um período de 10 anos. Os valores médios de entropia marginal foram computados para todos os postos pluviométricos observados. Mapas de precipitação, coeficiente de variação e entropia foram construídos para delinear as características anuais e sazonais das chuvas na região de estudo. Os valores da entropia marginal da precipitação foram superiores nos locais com maiores índices pluviométricos. A entropia de Shannon produziu padrões espaciais que possibilitou compreender melhor as características das chuvas em todo o Estado da Paraíba.

Palavras-chave: precipitação, entropia marginal, variabilidade, transferência de informação, recursos hídricos.

The Entropy Theory for Analysing Rainfall in Paraíba State

ABSTRACT

The theory of Shannon entropy was used to evaluate the spatial variability of rainfall and the potential availability of water resources of the State of Paraíba from daily rainfall data of 77 stations for a period of 10 years. Mean values of marginal entropy were computed for all observation stations. Rainfall, coefficient of variation and entropy maps were constructed for delineating annual and seasonal characteristics of rainfall in the studied region. The marginal entropy values of rainfall were higher in the locations with the highest amounts of rainfall. The Shannon entropy produced spatial patterns that led to better understanding of rainfall characteristics all over Paraíba state.

Keywords: precipitation, marginal entropy, variability, information transfer, water resources.

1. Introdução

Os recursos hídricos são fundamentais para a sustentabilidade dos ecossistemas naturais, bem como em todas as atividades humanas, uma vez que o meio

ambiente está sempre sendo modificado pelo homem de modo a atender as suas necessidades. Martins (2004) afirma que a sustentabilidade caracteriza-se pelo uso racional dos recursos naturais, de tal maneira a buscar a renovação quando possível ou a

* E-mail para correspondência: edicarlos_p@hotmail.com (Sousa, E. P.).

sua preservação em quantidades razoáveis à manutenção da vida no planeta. A história da humanidade consiste na história da adaptação do homem e de sua sociedade às condições do ambiente físico-natural terrestre (Mendonça, 2002). A preocupação com o manejo racional do potencial hidrográfico e hidrológico se faz indispensável à sobrevivência humana, principalmente em áreas onde a precipitação é mais escassa. Para Bertoni e Tucci (1993), o conhecimento da precipitação durante o ano é o fator determinante para estimar, dentre outras ações, a necessidade de irrigação de culturas e o abastecimento de água doméstico e industrial. Visto dessa forma, a precipitação configura-se como uma das variáveis meteorológicas indispensáveis ao processo de desenvolvimento sócio-econômico de uma região.

Segundo Young (2010) a utilização racional da água tornou-se um dos maiores desafios para o desenvolvimento dos países nas últimas décadas. Essa preocupação é proveniente da utilização indiscriminada do recurso vital à manutenção da sociedade moderna. O crescimento econômico acelerado levou à exaustão dos recursos naturais fundamentais à vida do homem e dos ecossistemas. Assim, atentar para práticas responsáveis no uso e gerenciamento da água passou a ser considerada uma questão prioritária para a melhoria da qualidade de vida e, por isso, atribuiu-se valor inestimável ao seu livre acesso.

O Brasil é o país que detém as

maiores quantidades de recursos hídricos, com algo em torno de 14% das disponibilidades mundiais. Se esse recurso for usado racionalmente visando o desenvolvimento sustentável, ou seja, com eficiência econômica, equidade social e sustentabilidade ambiental, virá a ser cada vez mais uma vantagem competitiva que contribuirá para colocar o país, no futuro, no elenco dos países com maiores índices de desenvolvimento humano (Lanna, 2008). Pode-se compreender a disponibilidade hídrica como sendo o volume de água captado para os mais variados consumos.

Dessa maneira, a análise da precipitação é indispensável para se estudar a disponibilidade de recursos hídricos de uma região. A chuva, embora seja um ciclo natural, apresenta uma distribuição espaço-temporal muito irregular e, por conseguinte, a distribuição de recursos hídricos não é homogênea.

Dentro do contexto acima descrito, a aleatoriedade da ocorrência da precipitação e a disposição dessa variável no espaço e no tempo podem ser mais bem compreendidas a partir da aplicação da teoria da entropia. Para Kawachi et al. (2001), essa técnica pode ser utilizada com sucesso para avaliar qualitativamente as incertezas das variáveis hidrológicas. Assim, a análise da disponibilidade e da variabilidade dos recursos hídricos se torna bem mais urgente e necessária nas regiões áridas e semiáridas em virtude da escassez das reservas naturais de

água e, sobretudo, do comportamento inconstante da precipitação no âmbito espaço-temporal e dos escoamentos superficiais. Por isso, no Estado da Paraíba, unidade federativa integrante do semiárido nordestino, vários grupos de pesquisa têm dado foco nesses temas. Dessa forma, este trabalho objetiva avaliar o grau de incerteza dos padrões de ocorrência de chuva no Estado da Paraíba, utilizando-se a técnica da entropia de Shannon.

2. Material e Métodos

O Estado da Paraíba tem uma área de 56.584,6 km² e está situado entre os paralelos de 6°02'12'' e 8°19'18'' de latitude Sul e entre 34°45'54'' e 38°46'12'' de longitude a oeste do Meridiano de Greenwich, localizando-se, portanto, no extremo leste do NEB. Limita-se ao norte com o Rio Grande do Norte, ao sul com Pernambuco, a leste com o Oceano Atlântico e a oeste com o Ceará, apresentando 89,65% de seu território inserido no Polígono das Secas (BRASIL, 2005). O Estado está dividido em quatro mesorregiões: Sertão, Borborema, Agreste e Mata Paraibana (Rodriguez, 2002). Nos 223 municípios que compõem o Estado, observa-se a predominância de climas variados, conforme o relevo que apresentam. A distribuição anual e intra-anual das chuvas nas mesorregiões comporta-se similarmente àquela observada em estados vizinhos. As estações chuvosas podem ser definidas conforme a seguir: Sertão (janeiro a março),

Borborema e Agreste (março a maio) e na Mata Paraibana (abril a junho). Quanto aos índices precipitados, os maiores valores estão no litoral e diminuem no sentido oeste, apresentando um mínimo no Cariri e Curimataú, na encosta oeste da Borborema. O topo do Planalto da Borborema, porém, apresenta índices relativamente altos. No oeste do Estado, encontra-se o Planalto do Rio Piranhas com chuvas de verão e inverno seco.

Dados diários de precipitação pluvial do Estado da Paraíba para um período de dez anos utilizados nesta pesquisa estão disponíveis em arquivos de planilha eletrônica na Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande. Essas séries foram selecionadas com base no critério de se analisar apenas aquelas sem falhas e contínuas, bem como distribuídas homogeneamente na área de estudo, Figura 1. É importante também que se tenha uma ampla rede com um número razoável de postos pluviométricos e que estejam bem distribuídos em toda a área de interesse para ser possível um resultado mais minucioso da coleta dos dados. Daí torna-se evidente a importância de uma correta utilização e espacialização das redes pluviométricas fazendo-as fornecer dados em quantidade e qualidade suficientes para servir de fonte às pesquisas.

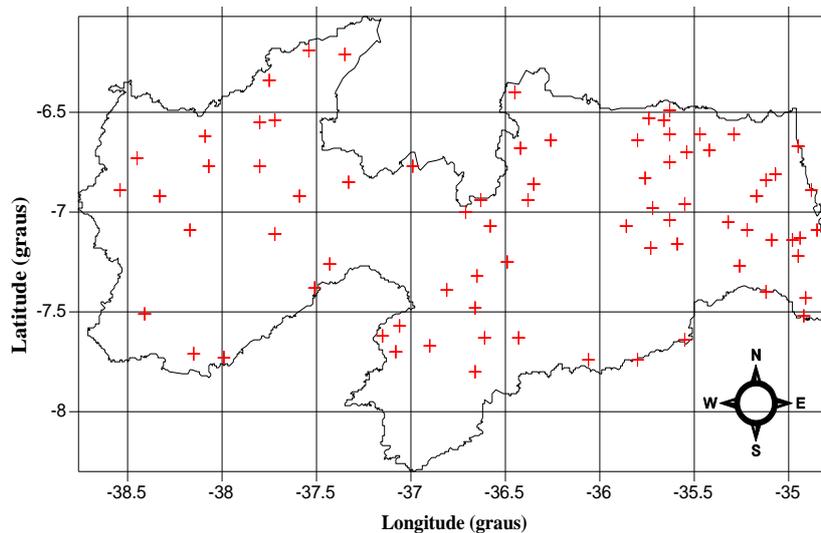


Figura 1. Distribuição geográfica dos 77 postos pluviométricos do Estado da Paraíba.

A teoria da entropia pode servir de base para melhor compreender e/ou aumentar o grau de informações sobre um sistema, no que se refere à incidência/não-incidência de fenômenos a ele relacionados. Nessa linha de pesquisa, Husain (1989) aplicou uma metodologia baseada na teoria da entropia para selecionar o número ótimo de estações numa extensa rede de postos e identificar regiões com máxima informação hidrológica. Por outro lado, Silva et al. (2003) utilizaram dados diários de precipitação pluvial de 58 postos pluviométricos do Estado da Paraíba para discutir a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial com base na teoria da entropia. Analisou-se também a variabilidade temporal da temperatura do ar em Campina Grande de acordo com essa mesma técnica. Os resultados evidenciaram que a entropia é alta em locais com intensa precipitação e baixa quando ocorrem, nesses locais, pequenos índices pluviométricos. Conseqüentemente, nos períodos chuvosos a entropia é alta e, nos períodos de estiagem, é

mínima. Esse trabalho evidenciou ainda que qualquer série temporal de entropia decresce exponencialmente com o aumento do seu desvio-padrão. Dessa maneira, essa teoria foi utilizada neste estudo para analisar a variabilidade da precipitação pluvial do Estado da Paraíba e, assim, obter a delimitação dos recursos hídricos na região. A sequência de dados diários de chuva em cada ano foi descrita pela distribuição de probabilidade de ocorrência de precipitação e o valor médio da entropia anual foi obtido para cada posto por meio da entropia da informação de Shannon.

A entropia foi considerada como a estimativa da incerteza da ocorrência de um determinado evento num processo aleatório discreto, que pode ser obtida por (Shannon, 1948):

$$H = -k \sum p_i \log p_i \quad (1)$$

em que p_i é o resultado da probabilidade da i -ésima variável aleatória discreta, k é uma constante positiva, cujo valor depende das unidades utilizadas, e H é a entropia da

variável aleatória. Assumindo a constante k , como unidade de estimativa, igual a 1 e a base do logaritmo 2, a Eq. (1) pode ser simplificada como:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

em que H é obtido em “bit”, como unidade de medida da entropia, e n é o número possível de eventos da variável aleatória discreta. A unidade de entropia pode ser *bit* para a base 2, *napiers* ou *nats* para a base neperiana e *hartley* para a base 10. Neste trabalho foi utilizada a unidade *bit* para entropia, que significa dígito binário, ou seja, a menor unidade na notação numérica binária que pode assumir o valor 0 ou 1.

Se todos os p_i 's são iguais, isto é, $p_i = 1/n$, então a entropia é $H = \log_2 n$. Assim, H é uma função monotonicamente crescente em n . Para um dado n , H é máximo quando todos os p_i 's são iguais. Ao contrário, H é mínimo e igual a zero quando todos os p_i 's, exceto um, é zero. Isso significa que todo resultado da variável aleatória é sempre o mesmo e, portanto, um dos p_i 's torna-se unitário. Assim, o valor da entropia, varia dentro do intervalo de zero a $\log_2 n$, de acordo com a forma da distribuição de probabilidade dos p_i 's. O valor da entropia decresce com o aumento do número de contraste e aumenta com o decréscimo desse número. Visto dessa maneira, a entropia pode ser considerada como uma estimativa funcional da incerteza associada à distribuição de probabilidade.

Para cada série histórica de

precipitação de um ano, está sendo admitido que r_i representa a precipitação pluvial diária correspondente ao enésimo dia do ano. Por exemplo, valores diários de precipitação pluvial de 1 de janeiro e 31 de dezembro para o mesmo ano podem ser expressos por r_1 e r_{365} , respectivamente. Assim, a precipitação total durante um ano não-bissexto R que é expressa pelo somatório dos valores diários, variando de $i = 1$ até $i = 365$, pode ser representada por:

$$R = \sum_{i=1}^{365} r_i \quad (3)$$

em que os valores de r_i podem ser zero para alguns dias e diferentes de zero para outros. As séries de precipitação formadas por r_1, r_2, \dots, r_n podem ser fixadas como a frequência de ocorrência acumulada de chuvas para 1, 2, ..., enésimo dia do ano, respectivamente. Assim, a frequência relativa da precipitação (p_i) será obtida dividindo-se r_i pelo tamanho total da amostra (R), ou seja:

$$p_i = \frac{r_i}{R} \quad (4)$$

A frequência relativa (p_i) é fixada como uma probabilidade de ocorrência do total da precipitação no enésimo dia, e, portanto, sua distribuição representa a característica probabilística da partição temporal da precipitação ao longo do ano, isto é, a ocorrência da incerteza da precipitação. Substituindo a Eq. (4) na Eq. (2), teremos:

$$H = -\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R} \log_2 \left(\frac{r_i}{R} \right) \quad (5)$$

De acordo com a Eq. (5) o valor de H é independente da ordem sequencial de r_i na

série temporal; assume o valor zero quando R ocorre apenas uma vez no ano e o valor máximo ($\log_2 n$) quando R ocorre em todos os dias do ano. Logo, a entropia aproxima-se do seu valor máximo quanto mais uniforme for sua distribuição, isto é, quando os dados da série apresentam pouca variabilidade temporal. Assim, H pode ser uma estimativa da variabilidade da precipitação no sentido de escala.

Quando as séries anuais de precipitação para n anos estão disponíveis, num mesmo posto pluviométrico, a melhor estimativa da entropia daquele posto pode ser obtida através da média aritmética de seus valores anuais e expressa por:

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H \quad (6)$$

em que \bar{H} é a entropia média e n o número de anos que foram utilizados no cálculo de H .

3. Resultados e Discussão

A teoria da entropia de Shannon foi utilizada neste trabalho na análise da delimitação dos recursos hídricos no Estado da Paraíba, com base em dados diários para o período de 10 anos de 77 postos pluviométricos. A distribuição geográfica dos postos escolhidos possibilitou uma caracterização do comportamento da pluviometria em todo o Estado; evitando, assim, que houvesse concentração de informações em uma determinada mesorregião em relação às demais existentes.

Através de técnicas de construção de

mapas de isoentropias (linhas de mesma entropia), de isoietas (linhas de mesma precipitação) e do coeficiente de variação (CV) da precipitação, esta pesquisa buscou discutir não somente o comportamento dessa variável meteorológica em escala anual, bem como analisar a sua variabilidade nos períodos de maior precipitação (chuvoso) e menor precipitação (seco). A fim de identificar os períodos chuvosos e secos em todo o Estado, foram elaborados histogramas de frequência para todos os postos pluviométricos analisados e, a partir de então, escolhidos os municípios representativos de cada mesorregião com base nos seus valores médios (Figura 2). Considerando neste estudo intervalos semestrais, conclui-se que no Estado da Paraíba o semestre janeiro-junho é o mais chuvoso e o período julho-dezembro é o mais seco. O município de Juazeirinho, integrante da mesorregião da Borborema, aparece neste trabalho com baixa disponibilidade hídrica, apresentando período chuvoso entre os meses de janeiro a junho. A localidade de Mari, na Mata Paraibana, tem índices pluviométricos acima da média e apresenta a maior disponibilidade hídrica em toda área de estudo, com estação chuvosa entre os meses de março a agosto. Por outro lado, em Pombal, localizado no Sertão do Estado, o período chuvoso está praticamente limitado aos meses de dezembro a maio. Essa mesorregião apresenta disponibilidade hídrica moderadamente baixa. Já no município de Duas Estradas, o período chuvoso aparece

bem distribuído ao longo do ano, com valores máximos nos meses de fevereiro a julho e uma disponibilidade hídrica relativamente alta

quando comparada a outras mesorregiões do Estado.

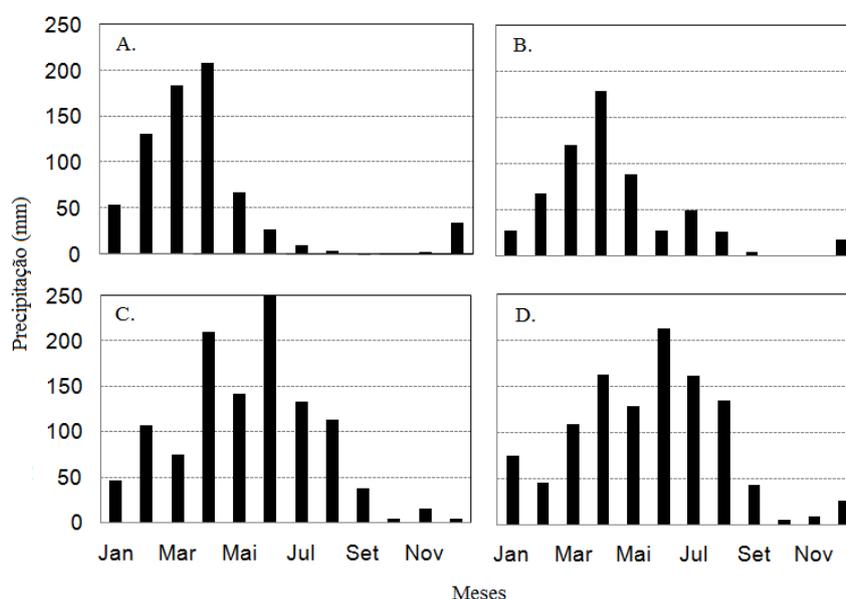


Figura 2. Histograma de frequência da precipitação pluvial de localidades representativas das quatro mesorregiões: Sertão - Pombal (A), Borborema - Juazeirinho (B), Agreste - Duas Estradas (C) e Mata Paraibana - Mari (D).

As estatísticas básicas (média, mínimo, máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação da entropia (H) e da precipitação

(P) para cada localidade do Estado) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Estatística básica da entropia e da precipitação para o Estado da Paraíba (média, mínimo, máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação)

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo	Desvio-Padrão	Coef. de Variação
Entropia anual (bit)	6,16	4,20	8,20	0,83	13,55
Entropia p. chuvoso (bit)	4,84	3,25	7,67	0,92	18,95
Entropia p. seco (bit)	1,32	0,18	2,37	0,66	50,68
Precipitação anual (mm)	1005,85	436,80	2078,63	382,71	38,05
Precipitação p. chuvoso (mm)	783,96	370,60	1470,00	240,44	30,67
Precipitação p. seco (mm)	221,89	24,80	625,77	175,09	78,90

Esses resultados mostram que a entropia do período anual manteve-se maior nos municípios do Litoral em relação às localidades do Sertão. No período chuvoso a

entropia dos postos pluviométricos da mesorregião da Borborema é superior àquela dos postos pertencentes ao Agreste Paraibano, enquanto que o período seco exibe os

menores índices de entropia quando comparado aos outros períodos analisados, sendo decrescentes do litoral ao sertão.

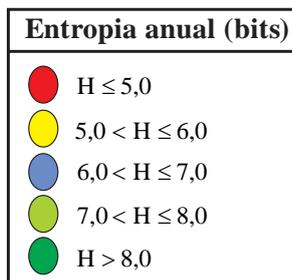
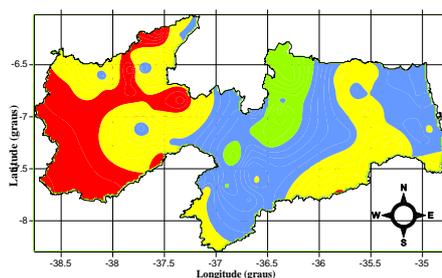
A variabilidade espacial média anual da entropia, da precipitação e do coeficiente de variação da precipitação do Estado da Paraíba é exibida na Figura 3. A análise das isolinhas correspondentes à média anual de entropia revela valores máximos em quase todo o Litoral e na mesorregião da Borborema. Os mínimos inferiores a 6,0 bits são encontrados no Agreste e Sertão Paraibano (Figura 3A). O padrão espacial médio anual da precipitação pluvial está associado aos valores de entropia. Por exemplo, a microrregião do Litoral, que está localizada na Mata Paraibana, apresentou concomitantemente valores elevados de entropia e de precipitação. Por outro lado, o Sertão Paraibano, que apresentou pluviometria relativamente baixa, exibiu os menores valores de entropia, comportamento observado também em algumas localidades situadas no Cariri do Estado.

Na microrregião do Brejo, a entropia variou de 5,0 a 7,0 bits com precipitação pluviométrica média anual em torno de 1100 mm. A microrregião do Sertão apresentou os

mais baixos valores de entropia, em torno de 5,0 bits (cor vermelha). A precipitação na região não ultrapassa, em sua maioria, os 800 mm/ano (Figura 3B). Assim sendo, a disponibilidade dos recursos hídricos no Estado da Paraíba diminui na direção do interior do Estado, ou seja, do Litoral para o Sertão, sendo máxima na Zona da Mata e mínima no Cariri e Curimataú. De modo geral, a entropia se manteve alta nas localidades cujos índices pluviométricos foram maiores.

O valor médio anual do CV da precipitação no Estado da Paraíba é 38,05%. Em geral, a variabilidade da precipitação anual é menor do que 50%, exceto num pequeno núcleo, localizado na região do município de Cabaceiras. Esses resultados conferem com estudos já realizados para o CV da precipitação anual em localidades do Estado do Ceará variando entre 28,8 e 41%. Ressalta-se, entretanto, que a variabilidade intra-anual da precipitação é mais elevada do que a anual, conforme resultados obtidos por Silva et al. (2011) que obtiveram valores de CV variando de 84 a 243% no Estado da Paraíba.

A)



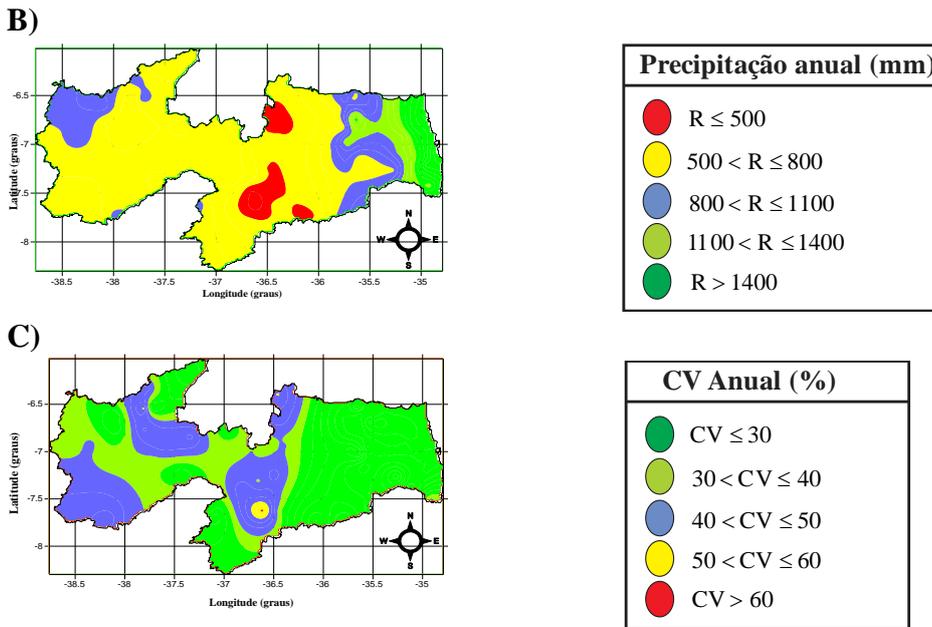


Figura 3. Variabilidade espacial média anual da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).

A Figura 4 exibe as isolinhas das variáveis pesquisadas no período chuvoso. Os valores de entropia média para esse período (Figura 4A) são máximos na mesorregião da Borborema e em alguns pontos da mesorregião do Sertão, com entropia superior a 5,0 bits; enquanto que os valores mínimos situam-se no Agreste e em parte do Litoral Sul do Estado. Esse resultado indica que as incertezas do regime pluviométrico são menores nas regiões e períodos menos chuvosos e também confere com aqueles obtidos por Silva et al. (2003). A distribuição da precipitação na área de estudo é apresentada na Figura 4B e evidencia que cerca de 80% do Estado da Paraíba apresenta, em média, totais pluviométricos inferiores a 800 mm durante o período chuvoso. Por outro lado, apenas a parte litorânea do Estado apresenta totais pluviométricos superiores a

800 mm, e numa faixa mais estreita ainda, e mais próxima do litoral essa média é superior a 1200 mm. Esses resultados são particularmente importantes no planejamento hídrico e agrícola da região. Deste modo, ações educacionais que visem prioritariamente reduzir ou eliminar os vícios de desperdícios dos recursos hídricos no Estado da Paraíba devem ser exploradas. Além disso, o setor agrícola também se beneficia das informações ora obtidas, haja vista que culturas com elevada exigência hídrica não devem ser cultivadas na maior parte da região pesquisada.

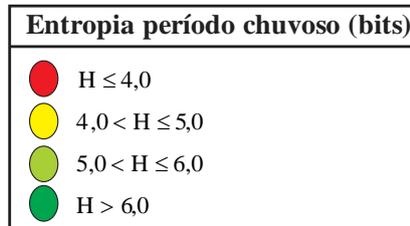
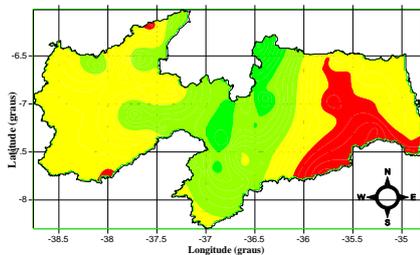
A variabilidade da precipitação pluvial durante o período chuvoso exibe padrão similar àquele do período anual. Mais da metade do Estado da Paraíba apresenta coeficiente de variação da precipitação entre 30 e 45%, predominantemente nas

mesorregiões da Borborema e Sertão. Constataram-se, ainda, valores similares em algumas áreas do Estado, principalmente nas microrregiões que envolvem os municípios de Monteiro e Catolé do Rocha. Por outro lado, valores mais elevados de CV, variando entre 45 e 60%, são observados em poucas localidades, notadamente naquelas com os menores índices pluviométricos.

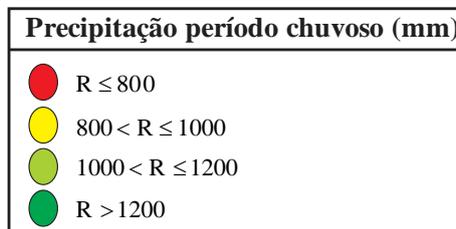
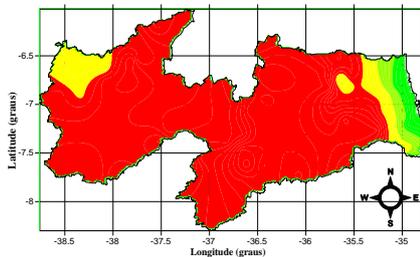
Muito embora o comportamento e a variabilidade da precipitação durante o

período chuvoso sejam similares aos do período anual, a entropia do período chuvoso é diferente daquela do período anual. Dessa observação, infere-se que a técnica da entropia marginal é apropriada para delimitação dos recursos hídricos de uma região. Nesse sentido, Kawachi et al. (2001) fizeram uso do conceito de entropia na construção de mapas de disponibilidade hídrica para avaliar o grau de variabilidade da precipitação pluviométrica no Japão.

A)



B)



C)

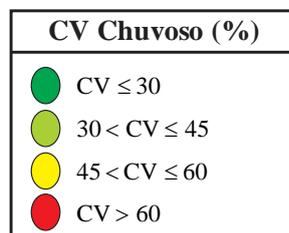
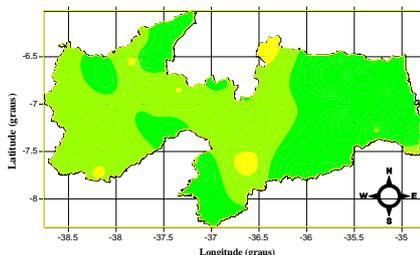


Figura 4. Variabilidade espacial média do período chuvoso da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).

As isolinhas de entropia (isoentropia), de precipitação (isoieta) e do coeficiente de variação (CV) da precipitação

durante o período seco no Estado da Paraíba são exibidas na Figura 5. O período seco, se comparado aos outros dois períodos

analisados, apresentou contrastes mais acentuados nas variáveis estudadas. As isoentropias do período seco exibem máximos no Litoral e Agreste, com valores acima de 1,5 bits (Figura 5A). Algumas áreas do Cariri e Curimataú Paraibano concentram valores intermediários de entropia entre aqueles obtidos a leste e a oeste do Estado, estendendo-se de 1,0 a 1,5 bits. Os valores mínimos de entropia durante o período seco, menores ou iguais a 1,0 bits, ocorreram em parte da mesorregião da Borborema e em todo o Sertão.

Durante o período seco, a

precipitação não ultrapassa 150 mm na mesorregião da Borborema e em todo Sertão do Estado (Figura 5B). Por outro lado, a costa leste da Paraíba, mais especificamente as regiões que envolvem o Agreste e a Zona da Mata, apresenta também os maiores valores de precipitação pluviométrica, ultrapassando os 450 mm. Isto é, as regiões com baixa entropia ocorrem em áreas com baixa precipitação; por outro lado, naquelas localidades onde a entropia foi elevada, a precipitação atingiu seus maiores valores. Portanto, a incerteza da precipitação é menor nos períodos e locais menos chuvosos.

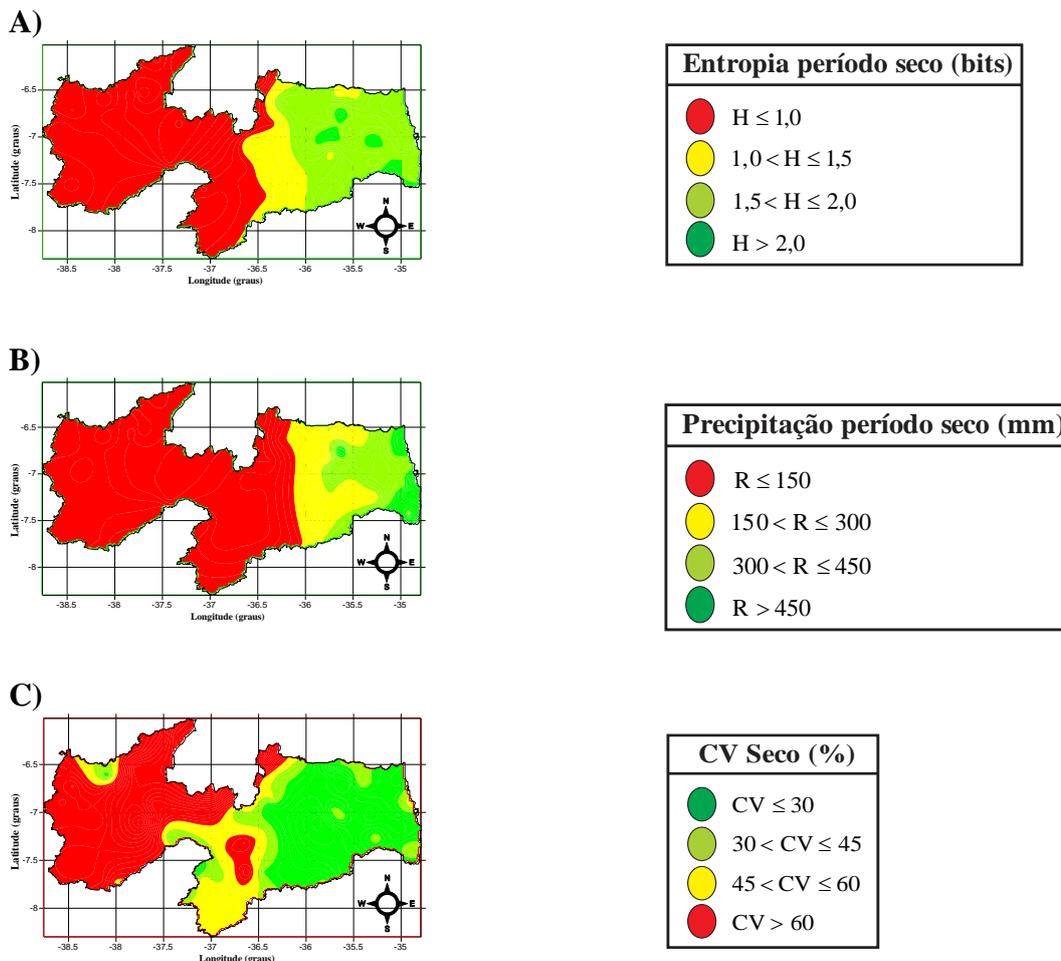


Figura 5. Variabilidade espacial média do período seco da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).

Os mapas de isolinhas de precipitação dos períodos estudados constataam que a precipitação pluvial na Paraíba apresenta índices anuais decrescentes de leste para oeste do Estado. As isolinhas de entropia do período anual revelam máximos na Borborema e no Litoral do Estado. O período chuvoso apresenta os maiores valores de entropia na mesorregião da Borborema e mínimos no Agreste e parte do Litoral Sul. O Sertão Paraibano obteve os mais baixos índices de entropia do Estado nos períodos anual e seco. O índice pluviométrico médio anual mínimo foi de 436,80 mm no município de Coxixola. Silva et al. (2003) afirmam, ainda, que na microrregião onde se encontra

esse município está também a cidade de Cabaceiras, conhecida como aquela que menos chove em todo o Brasil, com média climatológica de precipitação pouco superior a 300 mm anuais.

Para uma análise mais detalhada, a Tabela 2 exhibe as médias da precipitação pluvial e da entropia nos períodos anual, chuvoso e seco para quatro municípios localizados nas diferentes mesorregiões do Estado da Paraíba. As localidades da Borborema, do Brejo e do Litoral se caracterizam por apresentarem os valores máximos de entropia média anual, que em sua maioria são superiores a 6,0 bits.

Tabela 2. Precipitação pluvial P (mm) e entropia anual H (bits), dos períodos anual (PA), chuvoso (PC) e seco (PS) para quatro municípios de diferentes microrregiões paraibanas

Localidade	Mesorregião	P anual	P chuvoso	P seco	H anual	H chuvoso	H seco
Baía da Traição	Mata Paraibana	1969,83	1416,57	553,27	6,73	4,70	2,03
Areia	Agreste	1300,73	831,91	468,82	6,18	3,86	2,31
Tenório	Borborema	669,17	601,10	68,07	6,40	5,60	0,80
Condado	Sertão	802,99	755,92	47,07	5,08	4,74	0,34

Por outro lado, a microrregião do Sertão aparece predominantemente com os menores valores anuais de entropia, iguais ou inferiores a 5,0 bits, especificamente nos municípios do alto sertão paraibano. Não obstante, no período chuvoso, a entropia só alcançou valores de até 4,0 bits no Agreste do Estado. É importante ressaltar, porém, que a entropia do período seco se manteve muito abaixo da entropia do período chuvoso e,

consequentemente, da entropia anual. Nas localidades de Baía da Traição e Areia, pertencentes às microrregiões do Litoral e Brejo, respectivamente, a precipitação pluvial do semestre chuvoso foi inferior a 75% do total anual; enquanto os valores da entropia não superaram 5,0 bits.

Seguindo ainda na análise do período chuvoso, no município de Condado, situado no Sertão do Estado, a precipitação superou o

percentual dos 94% do total anual e a entropia foi 4,74 bits. Assim, percebe-se que nas microrregiões do oeste da Paraíba, praticamente toda a precipitação pluvial anual se concentra no semestre chuvoso, enquanto que no Brejo e Litoral a chuva se distribui de forma mais homogênea ao longo do ano. Sendo assim, é compreensível que o percentual do total precipitado no período seco seja maior nas localidades do Brejo e Litoral do que naquelas do Sertão Paraibano.

Ao contrário da distribuição anual e do período seco, a entropia da precipitação no período chuvoso nas localidades do Sertão é superior a do Litoral e Brejo Paraibano, embora a precipitação média anual dessas microrregiões seja bastante superior à do Sertão. Com base neste estudo, constatou-se que a entropia da precipitação é maior nos municípios e períodos com maior pluviosidade e menor nos locais e períodos com baixa precipitação. Por outro lado, a variabilidade da precipitação no Estado da Paraíba durante os períodos anuais e secos é menor no Litoral e Brejo e maior no Sertão e na porção central; enquanto no período chuvoso essa situação é inversa.

4. Conclusões

A aplicação da técnica da entropia na precipitação do Estado da Paraíba durante o período de 10 anos possibilitou chegar às seguintes conclusões:

1. A incerteza da precipitação pluvial no Estado da Paraíba é maior nas localidades

e períodos com maior pluviosidade e menor nos locais e períodos com baixa precipitação;

2. Os valores de entropia da precipitação pluvial anual variaram entre 8,20 bits, na cidade de Frei Martinho, e 4,20 bits, no município de Belém do Brejo do Cruz; os valores mínimos de entropia são inferiores a 1,0 bit e ocorreram no período seco, em grande parte da mesorregião da Borborema e em todo o Sertão Paraibano.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

6. Referências

Bertoni, J. C.; Tucci, C. E. M. Precipitação. In: Tucci, C. E. M. (Org.). (1993). Hidrologia: Ciência e Aplicação, UFRGS, ABRH, Porto Alegre. Cap. 5, p. 177-200.

Brasil. Ministério da Integração Nacional. (2005). Relatório Final Grupo de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semi-Árido Nordeste e do Polígono das Secas. Brasília (DF).

Husain, T. (1989). Hydrologic uncertainty measure and network design. *Water Resources Bulletin* 25 (3), 527-534.

Kawachi, T.; Maruyama, T.; Singh, V. P. (2001). Rainfall entropy for delineation of

water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 246, n. 1, p. 36-44.

Lanna, A. E. (2008). A economia dos recursos hídricos: os desafios da alocação eficiente de um recurso (cada vez mais) escasso. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63.

Martins, T. (24 jul. 2004). O conceito de desenvolvimento sustentável e seu contexto histórico: algumas considerações. *Jus Navigandi*, Teresina, ano 8, n. 382.

Mendonça, F. (2002). Clima e criminalidade: ensaio analítico da correlação entre a temperatura do ar e a incidência de criminalidade urbana. Curitiba: Editora da UFPR.

Rodriguez, J. L. (Org.). (2002). *Atlas Escolar da Paraíba*. João Pessoa, ed. Grafset.

Shannon, C. E. (1948). A mathematical

theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, p. 379-343.

Silva, V. P. R.; Cavalcanti, E. P.; Nascimento, M. G.; Campos, J. H. B. C. (2003). Análises da precipitação pluvial no Estado da Paraíba com base na teoria da entropia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 269-274.

Silva, V. P. R.; Pereira, E. R. R.; Azevedo, P. V.; Sousa, F. A. S.; Sousa, I. F. (2011). Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 131-138.

Young, M. C. F. (2010). Considerações sobre a Implementação da Nova Política de Recursos Hídricos no Estado do Rio de Janeiro. *Escola Nacional de Ciências Estatísticas ENCE/IBGE*, p. 1-2.