



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS - UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DELIMITAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DA PARAÍBA COM
BASE NA TEORIA DA ENTROPIA**

EDICARLOS PEREIRA DE SOUSA

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO DE 2011

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DELIMITAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DA PARAÍBA COM
BASE NA TEORIA DA ENTROPIA**

EDICARLOS PEREIRA DE SOUSA

ORIENTADORES

Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725d Sousa, Edicarlos Pereira de.
 Delimitação dos recursos hídricos no Estado da Paraíba com base na
 teoria da entropia / Edicarlos Pereira de Sousa. — Campina Grande,
 2011.
 78 f. : il. col.

 Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de
 Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
 Referências.
 Orientadores: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof.
 Dr. João Hugo Baracuy da Cunha Campos.

 1. Precipitação. 2. Entropia Marginal. 3. Variabilidade. 4.
 Transferência de Informação. 5. Recursos Hídricos. I. Título.

CDU – 551.577.21 (043)

EDICARLOS PEREIRA DE SOUSA

**DELIMITAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DA PARAÍBA COM
BASE NA TEORIA DA ENTROPIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Área de Concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Subárea: Climatologia Agrícola

CAMPINA GRANDE – PB


AGOSTO DE 2011

EDICARLOS PEREIRA DE SOUSA


DELIMITAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DA PARAÍBA
COM BASE NA TEORIA DA ENTROPIA


DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/08/2011

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. INAJÁ FRANCISCO DE SOUSA
Departamento Engenharia Agrônoma
Universidade Federal de Sergipe


Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Estadual da Paraíba

DEDICATÓRIA

A Deus,

pela presença intensa e constante na minha vida, pelas belezas que deixei de ver, pelas palavras que me recusei a escutar, pelas ocasiões que levantei e até quando caí, pelos momentos que falhei ou acertei, por tudo que vi, ouvi e senti.

A meus pais,

Erenilton e Marilu, pais por opção e amor, que se privaram por inúmeras vezes do nosso convívio familiar, doando-se por inteiro e renunciando aos seus sonhos para que os meus se tornassem realidade.

Aos meus familiares e amigos,

que me incentivaram e me acompanharam ao longo da vida, fazendo-me superar obstáculos e me promovendo verdadeiras transformações. Em especial, ao meu ilustre professor Jessé Benigno e a Jair Freires, sem os quais não teria iniciado e, tão pouco, terminado esta jornada.

A todos os colegas do curso de Mestrado em Meteorologia,

que me apoiaram nos momentos necessários e que agora fazem parte do meu ser. De modo especial, agradeço a Sonaly Duarte, sempre parceira na perspectiva de que este sonho pudesse ser concretizado.

A minha namorada e futura esposa, Mabel Barbosa,

pelo apoio incondicional demonstrado ao longo destes anos, levando-me a perceber sua importância em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, pela competência demonstrada na condução da pesquisa, pela paciência e sobremaneira pelo comportamento ímpar, ao me permitir uma inquestionável evolução não apenas no aspecto acadêmico, bem como e não menos importante no aspecto humano.

Aos professores integrantes da banca examinadora, pelas sugestões pertinentes à melhoria da qualidade deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia que a seu modo me deram grandes contribuições ao longo desta caminhada.

Aos funcionários da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, em especial, à secretária do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Divanete Cruz Rocha Farias, pelo modo eficiente e prestativo com que desempenha as suas funções.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela estrutura física, didática, pedagógica e humana no decorrer de meus estudos.

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.

De modo geral, meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que me permitiram alcançar mais uma vitória.

“Há escolas que são gaiolas e há escolas que são asas.

Escolas que são gaiolas existem para que os pássaros desaprendam a arte do voo. Pássaros engaiolados são pássaros sob controle. Engaiolados, o seu dono pode levá-los para onde quiser. Pássaros engaiolados sempre têm um dono. Deixaram de ser pássaros. Porque a essência dos pássaros é o voo.

Escolas que são asas não amam pássaros engaiolados. O que elas amam são pássaros em voo. Existem para dar aos pássaros coragem para voar. Ensinar o voo, isso elas não podem fazer, porque o voo já nasce dentro dos pássaros. O voo não pode ser ensinado. Só pode ser encorajado.”

(Rubem Alves)

DELIMITAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DA PARAÍBA COM BASE NA TEORIA DA ENTROPIA

RESUMO

Usando a teoria da entropia de Shannon, a variabilidade espacial das chuvas e o potencial da disponibilidade de recursos hídricos do Estado da Paraíba foram avaliados a partir de dados diários de precipitação pluvial de 77 postos para o 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. A interseção dos valores médios anuais de entropia e de precipitação na região pesquisada originou 4 categorias distintas de disponibilidade hídrica. Esta pesquisa verificou que cada mesorregião do Estado da Paraíba enquadra-se dentro de cada uma dessas categorias cujo comportamento foi bastante diferenciado. Os resultados também indicaram que as mesorregiões da Borborema, Mata Paraibana, Sertão e Agreste foram classificadas de acordo com a disponibilidade de água como baixa, alta, moderadamente baixa e moderadamente alta, respectivamente.

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

DELIMITATION OF WATER RESOURCES IN PARAÍBA STATE BASED ON THE ENTROPY THEORY

ABSTRACT

Using the Shannon entropy theory, the space variability of rainfall and potential availability of water resources of the Paraíba state was assessed using daily rainfall data from 77 stations for a 10-year period. 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. The intersection of the average annual entropy and of rainfall in the study region originated 4 distinct categories of water availability. This research found that each middle region of Paraíba state falls within each of these categories whose behavior was very different. The results also indicated that the Borborema middle region, Mata Paraibana, Sertão and Agreste were classified according to the availability of water as low, high, moderately low and moderately high, respectively.

Key words: precipitation, marginal entropy, variability, information transfer, water resources.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Localização da área de estudo no mapa do Brasil.	42
Figura 2 Distribuição geográfica das mesorregiões do Estado da Paraíba.	43
Figura 3 Distribuição geográfica dos 77 postos pluviométricos do Estado da Paraíba analisados neste estudo.	46
Figura 4 Histograma de frequência da precipitação pluvial de localidades representativas da Categoria 3 – Pombal (A), Categoria 1 – Juazeirinho (B), Categoria 4 – Duas Estradas (C) e Categoria 2 – Mari (D).	52
Figura 5 Variabilidade espacial média anual da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).	56
Figura 6 Variabilidade espacial média do período chuvoso da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).	58
Figura 7 Variabilidade espacial média do período seco da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de	60

variação da precipitação (CV) (C).

- Figura 8** Relação entre entropia e precipitação anual de 77 postos pluviométricos do Estado da Paraíba. 64
- Figura 9** Relação entre entropia e precipitação anual de 21 postos pluviométricos da mesorregião da Borborema. 65
- Figura 10** Relação entre entropia e precipitação anual de 18 postos pluviométricos da mesorregião da Mata Paraibana. 66
- Figura 11** Relação entre entropia e precipitação anual de 20 postos pluviométricos da mesorregião do Sertão. 67
- Figura 12** Relação entre entropia e precipitação anual de 18 postos pluviométricos da mesorregião do Agreste. 68

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 Estatística básica da entropia e da precipitação para o Estado da Paraíba (média, mínimo, máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação)	53
Tabela 2 Precipitação pluvial P (mm) e entropia anual H (bits), nos períodos anual (PA), chuvoso (PC) e seco (PS) para quatro municípios de diferentes microrregiões paraibanas	61
Tabela 3 Critérios de distribuição dos postos pluviométricos em categorias de regimes de chuva em função da entropia média anual (\bar{H}) e da precipitação média anual (\bar{P})	63
Tabela 4 Classificação da disponibilidade de recursos hídricos em função da Precipitação Média da Categoria (PMC) e da Precipitação Média da Região (PMR)	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	19
2.1. Objetivo Geral.....	19
2.2. Objetivos Específicos.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1. Recurso hídrico e meio ambiente: algumas considerações.....	21
3.2. O uso da água em regiões semiáridas.....	26
3.3. Sustentabilidade hídrica: desafios e perspectivas.....	30
3.4. Sistemas atmosféricos atuantes na região Nordeste do Brasil.....	33
3.5. A teoria da entropia no estudo da precipitação pluviométrica.....	35
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
4.1. Área de estudo.....	42
4.1.1. Localização.....	42
4.1.2. Relevo.....	43
4.1.3. Clima.....	44
4.1.4. Vegetação.....	45
4.2. Dados de precipitação pluvial.....	46
4.3. Método.....	47
4.4. Cálculo da entropia marginal da precipitação.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1. Zonas hidrológicas.....	53
5.2. Classificação da disponibilidade hídrica.....	63

6. CONCLUSÕES.....	69
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXOS.....	78

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 a partir de suas necessidades. 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.

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. Na perspectiva de compreensão e gestão do potencial de recursos hídricos de uma região é preciso considerar que a importância se dá não só no total precipitado como também na existência de uma variabilidade. A aleatoriedade das precipitações traz consigo grandes entraves para o desenvolvimento de pesquisas. Geralmente, os métodos convencionais são desenvolvidos no sentido de quantificar a precipitação ocorrida num certo ponto de medição para se referir a toda uma região. Assim, para Conti (2002), uma rede com elevado número de postos pluviométricos bem distribuídos em toda a área de interesse é necessária para um resultado satisfatório. 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. Nesse sentido, Moulin (2005) afirma que os dados de precipitação são importantes à medida que podem se tornar fundamentais para diversas atividades humanas, a exemplo da geração de energia elétrica, da navegação fluvial, dos sistemas de irrigação, da exploração de aquíferos, da prevenção de erosão hídrica, das obras de engenharia (pontes, viadutos, portos e obras para dispersão de poluentes em corpos de água), da ocupação do solo no tocante a áreas inundáveis e do suprimento de água para cidades e complexos industriais.

O potencial de recursos hídricos sempre foi determinante na sobrevivência e evolução de uma sociedade. A água funciona como fator de desenvolvimento, pois ela é utilizada para inúmeros usos diretamente relacionados com a economia regional, nacional e internacional. Os usos múltiplos da água aceleram-se em todas as regiões, continentes e países, aumentando à medida que as atividades econômicas se diversificam e as necessidades por este recurso natural crescem para atingir níveis de sustentação compatíveis com as pressões da sociedade de consumo, da produção industrial e agrícola (Tundisi, 2003). Portanto, uma demanda diversificada na aplicação dos recursos hídricos agravada pela crescente e desorganizada urbanização das sociedades paralelamente ao visível aumento populacional são alguns dos aspectos que demonstram a urgência de diferentes avaliações das reais condições, do monitoramento e dos avanços tecnológicos no que concerne ao tratamento e gestão da água.

Há algum tempo, o Brasil vem discutindo e buscando desenvolver uma política de gestão de seus recursos hídricos. Nesse sentido, muitos acordos, órgãos e entidades existem ou estão sendo criados com o intuito de voltarem seus estudos para esse assunto. Como exemplo, pode-se citar a Lei Federal nº 9.433/97 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, fundando o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos. A Política

Nacional de Recursos Hídricos toma como base os preceitos de que a água é um bem público, um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Desse modo, em situações de escassez, o uso humano e de animais é prioritário. Além disso, ressalta ainda que a gestão dos recursos hídricos precisa ser descentralizada, com a participação conjunta do poder público, dos usuários e da sociedade de modo geral.

Muito embora o Brasil já tenha respaldo legal sobre as questões do consumo, monitoramento, administração e perspectivas futuras dos mananciais aquáticos e apesar da criação de inúmeros órgãos para o controle dos mesmos, tudo isso não é suficiente para solucionar os problemas hoje existentes nessa área. Na luta pela resposta de seus próprios problemas, a sociedade exerce um papel fundamental no gerenciamento dos nossos recursos, construindo paralelamente ao setor público o mesmo ideal: assegurar a gerações atuais e futuras a disponibilidade hídrica para seus vários fins. Para Tundisi (2003), deve-se também considerar que as mudanças globais em curso poderão afetar drasticamente os recursos hídricos do planeta. Estas mudanças globais, em parte resultantes da aceleração dos ciclos biogeoquímicos e da contribuição de gases de efeito estufa para a atmosfera, também poderão interferir nas características do ciclo hidrológico, afetar a temperatura das águas superficiais de lagos, rios e represas, alterar a evapotranspiração e produzir impactos diversos na biodiversidade. Além disso, poderão ter efeitos na agricultura, na distribuição da vegetação e conseqüentemente poderão alterar a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Um trabalho integrado de gestão dos recursos hídricos se constitui atualmente numa das prioridades das políticas públicas em todo o mundo. É preciso reconhecer que a gestão dos potenciais hídricos é algo de abrangência multidisciplinar, de grande complexidade, estando intrinsecamente ligado ao desenvolvimento sustentável e à gestão ambiental.

Dentro do contexto acima descrito, a aleatoriedade da ocorrência da precipitação e a melhor disposição dessa variável no espaço e no tempo podem ser melhor 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, o Estado da Paraíba, como unidade federativa integrante do semiárido nordestino, deve estar buscando refletir acerca desse tema. A partir daí surge também outra problemática: a urgência em se pensar numa delimitação dos recursos hídricos no Estado, muito embora essa delimitação nem sempre coincida a rigor com a divisão política das mesorregiões existentes. Dessa forma, é razoável apresentar a hipótese de que a aplicação da teoria da entropia de Shannon será capaz de delimitar os recursos hídricos no Estado da Paraíba.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o grau de incerteza dos padrões anuais de ocorrência de chuva no Estado da Paraíba e discutir acerca da disponibilidade hídrica na região de estudo.

2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Construir mapas de isolinhas de entropia, de precipitação e do coeficiente de variação da precipitação dos períodos anual, chuvoso e seco;
- ✓ Observar o comportamento da entropia, da precipitação e do coeficiente de variação da precipitação em cada mesorregião do Estado durante os períodos analisados;
- ✓ Delimitar categorias de regimes de chuva para os postos pluviométricos estudados;
- ✓ Verificar certa correspondência entre as categorias de regimes de chuva e as mesorregiões do Estado da Paraíba;
- ✓ Classificar as mesorregiões do Estado da Paraíba em termos de disponibilidade hídrica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1998, o Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, por intermédio da Secretaria de Recursos Hídricos, desenvolveu um documento que retrata o estado da arte dos recursos hídricos no Brasil. Ainda segundo esse documento, o conceito preconizado pela Lei 9.433/97, a “Lei das Águas”, é o de envolvimento dos cidadãos nos trabalhos de gestão dos recursos hídricos como uma necessidade, tendo em vista as dimensões continentais do Brasil e as próprias características do setor, que impossibilitam qualquer iniciativa centralizadora ou apenas governamental para o trato com a água. Não só no gerenciamento das águas, como também em outras iniciativas de conservação e proteção ambiental, os movimentos sociais brasileiros têm sido responsáveis por boa parte dos avanços observados, embora falte uma maior articulação e o reconhecimento de uma série de fatores que podem contribuir para aumentar a eficácia e a abrangência desses movimentos (BRASIL, 1998).

A gestão dos recursos hídricos no Estado da Paraíba está prevista na Lei nº 6.308 de 02 de novembro de 1996 que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos e foi regulamentada em seus diversos aspectos através da legislação complementar (decretos, resoluções, portarias, normas, etc.), tendo por base os seguintes princípios (AESA, 2007):

- ✓ O acesso aos recursos hídricos é direito de todos e objetiva atender às necessidades essenciais da sobrevivência humana;
- ✓ Os recursos hídricos são um bem público, de valor econômico, cuja utilização deve ser tarifada;
- ✓ A bacia hidrográfica é a unidade básica físico-territorial de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos;

- ✓ O gerenciamento dos recursos hídricos far-se-á de forma participativa e integrada, considerando seus aspectos quantitativos e qualitativos e as diferentes fases do ciclo hidrológico;
- ✓ O aproveitamento dos recursos hídricos deverá ser feito racionalmente, de forma a garantir o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente;
- ✓ O aproveitamento e o gerenciamento dos recursos hídricos serão utilizados como instrumento de combate aos efeitos adversos da poluição, da seca e do assoreamento.

Ainda segundo AESA (2007), no tocante ao arranjo institucional da Política Estadual de Recursos Hídricos, foi criado pela lei 6.308/96 o Sistema Integrado de Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGERH) que tem por finalidade a execução da Política Estadual de Recursos Hídricos e a formulação, atualização e aplicação do Plano Estadual de Recursos Hídricos através de seu órgão gestor, a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), em consonância com os órgãos e entidades federais, estaduais e municipais, com a participação da sociedade civil organizada.

3.1. Recurso hídrico e meio ambiente: algumas considerações

A água é essencial à existência da vida e deste modo todos os organismos vivos dependem dela para sua sobrevivência. Segundo Tundisi (2003), o planeta Terra é o único planeta do sistema solar que tem água nos três estados (sólido, líquido e gasoso), e as mudanças de estado físico da água no ciclo hidrológico são fundamentais e influenciam os processos biogeoquímicos nos ecossistemas terrestres e aquáticos. Para esse autor, somente 3% da água do planeta está disponível como água doce. Destes 3%, cerca de 75% estão congelados nas calotas polares, em estado sólido, 10% estão confinados nos aquíferos e,

portanto, a disponibilidade dos recursos hídricos no estado líquido é aproximadamente 15% desses 3%. A água, portanto, é um recurso extremamente reduzido. O suprimento de água doce de boa qualidade é essencial para o desenvolvimento econômico, para a qualidade de vida da população humana e para a sustentabilidade dos ciclos no planeta.

Dada sua essencialidade e o poder de resiliência dos corpos hídricos em seus variados estados frente às crescentes demandas por água, os recursos hídricos são estratégicos nas mais variadas etiologias da relação sociedade x natureza. Sendo assim, devem ser avaliados num contexto sócio-espacial amplo, superando uma visão exclusivamente limnológica (Rodrigues & Carvalho, 2005). Os últimos vinte anos acumularam evidências sem precedentes de alterações no planeta, tanto em escala quanto em magnitude. Muitas destas mudanças ocorrem em escala global - a degradação das águas (oceanos, bacias hidrográficas, etc.) e dos solos, as chuvas ácidas, a poluição do ar, os acidentes termonucleares. Ainda sobre desequilíbrios ambientais, destacam-se o efeito estufa, os processos de desertificação, a redução da biodiversidade, a mortandade de cadeias de corais, a disseminação de endemias e epidemias, a exaustão de mananciais e secas. Esses fatos são decorrentes da sinergia entre o desenvolvimento tecnológico e as atividades socioeconômicas em nível global (Rodrigues & Carvalho, 2005).

Para 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, a questão da escassez de água doce passou a ser considerada prioritária para a melhoria da qualidade de vida e atribuiu-se valor inestimável ao seu livre acesso. A preservação do meio ambiente através da elaboração de políticas públicas objetiva reduzir os impactos decorrentes da industrialização e da urbanização aceleradas que

trouxeram conjuntamente modificações nos cursos naturais dos rios e geraram efeitos ambientais irreversíveis, resultando na maioria dos casos numa situação de baixa disponibilidade hídrica para consumo.

Algumas pesquisas realizadas em vários países revelam que a água doce, além de mal distribuída pelo planeta, passou a ter qualidade comprometida para o uso humano (Young, 2010). Para esse autor, a crescente degradação ambiental provocada pela poluição hídrica e a ausência de serviços de saneamento básico são responsáveis pelo alarmante aumento da mortalidade infantil ocasionado por doenças de veiculação hídrica. Nesse mesmo trabalho, o autor defende ainda que a cobrança pelo uso da água tem o propósito de induzir o comportamento dos usuários, do poder público e da sociedade como um todo ao uso racional dos recursos hídricos, reduzindo o desperdício e diminuindo os índices altíssimos de poluição, além de contribuir para a execução de investimentos visando a recuperação ambiental das bacias hidrográficas, garantindo seus usos múltiplos e sua existência para atender demandas futuras.

Segundo Lanna (2008), a escassez faz da água um dos interesses da economia e, em razão disso, é atribuído a ela valor econômico. Ao contrário de muitas afirmações, não foi a lei que atribuiu esse valor econômico à água, pois essa não é uma condição legal. O valor econômico decorre de que todo recurso escasso acaba por afetar as relações econômicas e por isso é possível estimar seu valor econômico. A água escassa para as primeiras necessidades da vida humana onera os que por essa condição são afetados, ônus derivado da necessidade de busca cada vez mais longe e, por isso, com custos cada vez maiores. Os que sofrem com essa situação, se não puderem pagar os custos crescentes, terão que utilizar parte do seu tempo para a busca de água, reduzindo sua produtividade nas atividades que mantêm sua subsistência. Por causa disso, as propriedades rurais afetadas se desvalorizam. São exemplos da cadeia de efeitos que a escassez de água gera pela via econômica. Os custos revelados para

buscar água mais longe induzem à perda de produtividade ou à diminuição do valor de mercado da propriedade, constituindo-se meios de estimativa do valor econômico da água.

No gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros deve-se levar em consideração a concentração da população em determinadas regiões, cidades e áreas metropolitanas, haja vista que tudo isso implica numa demanda tanto da disponibilidade de água quanto para dissolução de cargas poluidoras urbanas. Nesse contexto, é fácil perceber que a poluição hídrica no nosso país tem se agravado gradativamente, considerando o aumento das cargas poluidoras urbanas e industriais, o uso inadequado dos solos, de insumos agrícolas e de mineração, os processos de erosão e de desmatamento, dentre outros. Tais fatores associados à distribuição anual das chuvas e às características climáticas levam a danos ambientais dos nossos recursos hídricos tais como o aumento do transporte de sedimento e a contaminação orgânica e química das águas.

De acordo com o trabalho intitulado “Recursos Hídricos no Brasil” da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, publicado em abril de 1998, os impactos ambientais decorrentes da poluição de águas fluviais provocada pelos pólos agro-industriais (principalmente suinocultura e avicultura), no sul do Brasil, e os relacionados à agroindústria sucroalcooleira do nordeste e do Estado de São Paulo, exemplificam alterações significativas dos recursos hídricos no Brasil. Destaca-se, ainda, o alto grau de comprometimento ambiental dos recursos hídricos da região carbonífera do sul do país e da região de garimpo e de mineração no norte brasileiro onde não há tecnologia ambientalmente adequada para a exploração e o processamento desses recursos minerais. Outras atividades causadoras de poluição das águas são as termelétricas e os complexos siderúrgicos que ainda operam com processos industriais mais antigos e não contam com a instalação de equipamentos de controle da poluição adequados. Deste modo, os conflitos de interesses em relação ao uso da água oriundos do setor hidrelétrico, dos

complexos industriais, do abastecimento urbano, da irrigação e do adensamento urbano industrial evidenciam a necessidade de articulação interinstitucional para a adoção de políticas de gestão integrada de recursos hídricos.

Essas questões formam um preâmbulo de uma constatação relevante: a água é um patrimônio ambiental brasileiro, de interesse estratégico, e que se constitui em uma vantagem comparativa em termos mundiais. Afinal, 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).

Em relação aos recursos hídricos em si, devido à falta latente de água derivada da ausência de chuvas na maioria das cidades que compõem algumas bacias hidrográficas brasileiras, uma campanha de conscientização da população foi iniciada nos meios de comunicação, complementando o processo de educação ambiental empreendido por poucos conscientes da realidade crítica em relação a este recurso natural. Porém, na análise da história desse país, somente a conscientização da população não é suficiente, vistos relatos descrédulos sobre a situação real da escassez de água, pois o que se aprende desde a infância é que o Brasil é o país que dispõe da maior parte dos recursos hídricos do planeta, possuindo uma fonte quase que inesgotável deste recurso. Mas, embora abundante, a água é distribuída de forma irregular no território nacional (Barbosa et al., 2003).

3.2. O uso da água em regiões semiáridas

O Nordeste é uma das regiões geográficas mais discutidas do país, apesar de ainda ser a menos conhecida. Frequentemente, sua área é associada ao fenômeno climático das secas – característico de parte significativa da região – e das consequências sobre a população local. Entretanto, nem todo o Nordeste é castigado pela estiagem e, por este motivo e para melhor administrar tal fato, nas áreas mais afetadas do mencionado território, foi delimitada a região que compreende, de acordo com critérios estabelecidos, as maiores adversidades condicionadas pela semiaridez climática. Essa área é denominada de Polígono das Secas ou, mais comumente, de semiárido (Andrade, 2005). Essa vasta área do interior nordestino apresenta com forte predominância, clima seco e quente, com chuvas que se concentram nas estações de verão e outono. A região sofre a tímida influência de várias massas de ar (a Equatorial Atlântica, a Equatorial Continental, a Polar, as Tépidas Atlânticas e as Calaarianas) que interferem na formação do seu clima, mas essas massas adentram o interior do Nordeste com pouca energia, tornando extremamente variáveis não apenas os volumes das precipitações caídas, mas principalmente os intervalos entre as chuvas (Suassuna, 2002).

A região semiárida caracteriza-se principalmente pela escassez de água decorrente da incidência de chuvas apenas em curtos períodos de três a cinco meses por ano, irregularmente distribuídas no tempo e no espaço. Essa característica causa uma forte dependência da intervenção do homem sobre a natureza no sentido de garantir, por meio de obras de infraestrutura hídrica, o armazenamento de água para abastecimento humano e demais usos produtivos (Garjuli, 2003). A autora afirma ainda que, a partir da década de 1980, consolida-se no mundo a discussão de um novo modelo de desenvolvimento que tem como princípio central o conceito de sustentabilidade. Deste modo, o Brasil passa a perceber a real importância de desenvolver seu arcabouço jurídico e institucional sobre recursos hídricos

tomando como essência a idéia de uma política de gestão descentralizada, integrada e participativa, contrapondo-se às ideologias até então vigentes na sociedade.

Para Rebouças (2001), desde o surgimento do planeta até a atualidade, os volumes disponíveis das reservas de água são os mesmos e a demora que ocorre entre o uso da água, muitas vezes submetida a processos poluentes, e sua depuração na atmosfera são interpretadas como se houvesse uma redução nas quantidades disponíveis. Melo & Pereira (2008) afirmam que no tocante à distribuição desigual da água entre as regiões do planeta, alguns aspectos são determinantes para a existência de sua oferta ou escassez. O principal deles é a distribuição irregular motivada por diversos fenômenos, inclusive climáticos, o que acaba por determinar as quantidades precipitadas. Para esses autores, mesmo alguns países reconhecidamente abundantes na disponibilidade hídrica hospedam dentro de suas fronteiras regiões extremamente áridas ou semiáridas, exigindo ações de políticas, normas e conscientização para o uso deste recurso com eficiência.

De acordo com as ideias de Garjuli (2003), o Estado brasileiro, em especial na região semiárida, tem longa tradição de intervenção de caráter centralizador e fragmentado no setor hídrico, pois as iniciativas sempre partiram de decisões governamentais unilaterais e, não raro, para atender interesses pontuais, particulares ou setoriais, quer seja na construção de barragens, em projetos de irrigação, perfuração de poços ou construção de adutoras. A autora defende também que a política hídrica para a região priorizou a construção de obras, sem garantir o uso público da água acumulada em milhares de açudes de pequeno e médio porte que se tornaram “privados” por estarem localizados dentro de propriedades privadas. Quanto aos grandes reservatórios administrados por órgãos estatais, foi garantida a sua utilização pública sem, contudo, articular esta disponibilidade de água com outras políticas estatais, a exemplo das políticas agrícolas e agrárias.

Os estados nordestinos estão implementando sistemas de gestão de água envolvendo de um lado órgãos gestores de sua oferta e de outro os órgãos setoriais dos diversos usos, notadamente de abastecimento, irrigação, agricultura e preservação ambiental. Conseqüentemente, segundo Vieira (2003), faz-se necessário o desenvolvimento de mecanismos de articulação intersetorial através das seguintes etapas:

- ✓ Complementação do marco legal e institucional dos sistemas de gestão hídrica e ambiental;
- ✓ Relacionamento estreito entre os conselhos estaduais de recursos hídricos e os conselhos estaduais de meio ambiente;
- ✓ Avaliação conjunta dos impactos setoriais cruzados, especialmente entre ações de aproveitamento hídrico e atividades de preservação ambiental;
- ✓ Compatibilização e integração de programas setoriais de curto, médio e longo prazo, inclusive aqueles referentes ao aumento da resistência às secas e os intrinsecamente ligados à defesa civil;
- ✓ Coordenação de ações interinstitucionais, a exemplo do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) e de outros órgãos regionais juntamente com as entidades e/ou autarquias responsáveis pelo planejamento e construção de obras hídricas estaduais;
- ✓ Ações integradas interestaduais definidas e conduzidas através de fóruns regionais.

De modo geral e em decorrência das secas, a região Nordeste lançou certa tradição cultural, ao longo dos anos, no uso e conservação da água. Sob o ponto de vista tecnológico, a região foi pioneira, através do DNOCS, em termos de medições pluviométricas, controle de umidade de maciços de barragens, piscicultura extensiva e intensiva e algumas técnicas de aproveitamento hídrico e agrícola. As ações de outros organismos regionais e/ou federais tais

como a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), a CODEVASF e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em conjunto com o Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS) e o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), sendo esses dois últimos órgãos extintos, sempre motivados pelo desequilíbrio entre o nordeste e outras regiões do país, notadamente em função da calamidade climática, contribuíram, sobretudo, para a conscientização do problema hídrico e da propensão social para absorver tecnologias voltadas para o uso racional da água (Vieira, 2003).

Em contraposição à face insustentável da maior parcela do semiárido está o agronegócio, praticado com tecnologia avançada nos vales férteis da região, cujo mercado tem como destinação as exportações. Esses “oásis”, que muitas vezes se localizam a poucos quilômetros das áreas secas, têm vida própria e em nada lembram as dificuldades e a escassez, não apenas de água, mas também de oportunidades de bons negócios em contraste com a agricultura local (Melo & Pereira, 2008). Lacerda & Lacerda (2004) afirmam que a produção agrícola nas áreas dos grandes projetos de irrigação pode ser tomada como um bom exemplo no espaço rural nordestino das transformações de base técnico-econômica do agronegócio brasileiro. Soares (2007) acredita que o conhecimento necessário para uma boa administração e, por conseguinte, efetiva sustentabilidade do potencial de recursos hídricos não pode e nem deve ser uma particularidade somente de regiões semiáridas, tendo em vista a urgência em se estabelecerem usos racionais para tão precioso componente.

Nessas condições, a avaliação do problema da água de uma determinada região já não pode se restringir ao simples balanço entre oferta e procura. Deve abranger também os inter-relacionamentos entre os seus recursos hídricos com as demais peculiaridades geoambientais e sócio-culturais, tendo em vista alcançar e garantir a qualidade de vida da sociedade, a qualidade do desenvolvimento socioeconômico e a conservação das suas reservas

de capital ecológico (Rebouças, 1997). Melo & Pereira (2008) mencionam que, no âmbito dessa região caracterizada nacionalmente como atrasada, surge outro cenário formado por áreas de agricultura intensiva voltada à exportação que não vê nos recursos hídricos um agravante para a produção agrícola, pois quando se faz uso da tecnologia tais aspectos deixam de se apresentar como empecilhos. Esses autores defendem ainda que a limitação que caracteriza o Nordeste semiárido está na necessidade de adoção de mecanismos de gestão adequada tanto dos recursos hídricos, através da adoção da bacia hidrográfica (enquanto unidade de planejamento ambiental), quanto do potencial humano existente na região que vem sendo preterido ao longo de cinco séculos de colonização. Hafner (2007) entende que a aceitação e a participação da sociedade são fundamentais para se alcançar o objetivo desejado seja qual for a alternativa de uso racional da água adotada. Dessa forma, ações educacionais devem ser adotadas para informar e conscientizar a sociedade.

3.3. Sustentabilidade hídrica: desafios e perspectivas

O Estado brasileiro e o mundo começam, de modo geral, a buscar melhor eficiência no uso de seus recursos hídricos. A água tem suscitado grandes preocupações dos planejadores enquanto tema integrante da base de sustentação da sociedade moderna (Tucci, 2002). Para esse autor, os recursos hídricos e o meio ambiente do Brasil possuem uma diversidade de paisagens, ecossistemas e solos: florestas tropicais da Amazônia, Pantanal, ambiente costeiro e o semiárido nordestino. Com isso, é perceptível a necessidade de desenvolvimento adequado de estratégias, produtos e serviços condizentes a cada realidade, haja vista a variabilidade e a complexidade das interações entre o meio natural e o socioeconômico. Sendo assim, os grandes desafios em ciência e tecnologia são os de

compreender e desenvolver suporte tecnológico que atenda aos anseios da sustentabilidade dos ecossistemas brasileiros.

Segundo UICN (1991) e Ferrão (1998), o desenvolvimento sustentável tem como principal objetivo melhorar a qualidade de vida humana dentro dos limites da capacidade de suporte dos ecossistemas que é entendida como sendo a capacidade que um ecossistema tem de suportar organismos saudáveis e, concomitantemente, manter a produtividade, a adaptabilidade e a capacidade de renovação. Deste modo, o princípio de sustentabilidade implica no uso de recursos renováveis a taxas iguais ou inferiores a sua regeneração, isto é, se um sistema utiliza recursos acima da taxa de reposição ou da capacidade de assimilação natural, não há garantia de sustentabilidade. Pode-se definir disponibilidade hídrica como sendo o total de vazão originária de uma bacia hidrográfica, constituída pelo volume de água captado para os mais variados consumos, aquele mantido no curso d'água e o que é utilizado para a manutenção da sustentabilidade do próprio ecossistema (Cruz, 2001).

Para Tucci (2002), sob o aspecto da quantidade de disponibilidade hídrica, faz-se necessária a observação das vazões média e mínima. A primeira está relacionada à disponibilidade máxima, uma vez que representa a maior vazão que pode ser regularizada estabelecendo, assim, os limites superiores do uso da água de um manancial. A vazão mínima, por sua vez, ocorre durante a estiagem e está relacionada a períodos de menor oferta de água. Por outro lado, Martins (2004) afirma que a sustentabilidade caracteriza-se pelo uso racional dos recursos disponíveis, de tal maneira a buscar a renovação quando possível ou a sua preservação em quantidades razoáveis à manutenção da vida no planeta. Na sociedade moderna, inúmeros conceitos de sustentabilidade surgiram ou estão emergindo e é, nesse contexto, que Bezerra & Munhoz (2000) abordam algumas de suas ideias:

- ✓ Sustentabilidade ecológica: refere-se à base física do processo de crescimento e tem como principal objetivo a manutenção dos estoques de capital natural, incorporados às atividades produtivas;
- ✓ Sustentabilidade ambiental: refere-se à manutenção da capacidade de sustentação dos ecossistemas, o que implica na capacidade de absorção e recomposição dos ecossistemas em face de agressões antrópicas;
- ✓ Sustentabilidade social: refere-se ao desenvolvimento e tem por objetivo a melhoria da qualidade de vida da população. Para o caso de países com problemas de desigualdade e de exclusão social, implica a adoção de políticas distributivas e a universalização do atendimento a questões como saúde, educação, habitação e seguridade social;
- ✓ Sustentabilidade política: refere-se ao processo de construção da cidadania para garantir a incorporação plena dos indivíduos no processo de desenvolvimento;
- ✓ Sustentabilidade econômica: refere-se a uma gestão eficiente dos recursos em geral e caracteriza-se pela regularidade de fluxos do investimento público e privado. Implica na avaliação da eficiência dos processos macrossociais.

Sendo assim, um dos desafios da ciência e da tecnologia é o de estabelecer elementos que criem condições para a população de permanecer em sua região, melhorando cada vez mais suas possibilidades econômicas, habitacionais, de saúde e de educação. Nessa perspectiva, é preciso aumentar a disponibilidade hídrica através de técnicas inovadoras e gerenciar aquelas até então existentes. Todos esses desafios somente serão vencidos através da educação conjuntamente com o desenvolvimento tecnológico que busque, por exemplo, a racionalização e a criação de sistemas eficientes de controle e tratamento de água.

3.4. Sistemas atmosféricos atuantes na região Nordeste do Brasil

A variabilidade no regime de precipitação de certa localidade pode ser explicada, em parte, pelos sistemas que ali atuam como é o caso do Nordeste do Brasil (NEB). Vários sistemas atmosféricos são responsáveis pela precipitação nessa região. Roucou et al. (1996) observaram que a precipitação pluvial no NEB também é associada aos movimentos verticais ascendentes de ar e à migração da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Por outro lado, Silva (2004) destaca ainda que essa região sofre influência dos vórtices ciclônicos de ar superior e de frentes frias.

O Estado da Paraíba está dividido politicamente em quatro mesorregiões: Sertão, Borborema, Agreste e Mata Paraibana. 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. As variações de clima e de precipitação ocorrem também em função da variabilidade climática modulada pelas anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) sobre os oceanos Pacífico e Atlântico (Vitorino et al., 2006). Além disso, as oscilações de escalas de tempo decadal, interdecadal e quase bienal tem modulado a atmosfera tropical (Hastenrath & Heller, 1977; Moura & Shukla, 1981; Zebiak, 1993; Chang et al., 1997; Moron, 1997; Souza et al., 1998).

A média pluviométrica anual do Estado da Paraíba é inferior a 800 mm no semiárido, enquanto que na parte litorânea tais valores podem ultrapassar os 1500 mm (Silva, 2004). Assim como nos estados vizinhos, a Paraíba possui um regime de chuvas influenciado pelos sistemas atuantes no NEB. Esses mecanismos podem ser classificados em mecanismos de grande escala, meso e microescalas e são responsáveis pelo total de precipitação observado na região. Dentre os mecanismos de grande escala atuantes no Estado, destacam-se os sistemas frontais, associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Nos mecanismos de mesoescala fazem parte as perturbações ondulatórias no campo dos alísios, os complexos convectivos de mesoescala (CCM) e as brisas marítimas e terrestres, enquanto que os principais fenômenos de microescala são as circulações orográficas e as pequenas células convectivas (Macedo et al., 2009).

Dentre os principais sistemas atuantes no Nordeste encontram-se os sistemas frontais (Kousky, 1979), a zona de convergência intertropical (Uvo, 1989), os vórtices ciclônicos de ar superior (Kousky & Gan, 1981) e os distúrbios de leste (Espinoza, 1996). Os sistemas frontais, importante sistema produtor de precipitação, atuam basicamente na região sul do NEB, nos meses de novembro a fevereiro e têm o seu máximo de precipitação em dezembro, principalmente na parte sul da Bahia, decrescendo para o norte (Chu, 1983). A Zona de Convergência Intertropical é o sistema meteorológico mais importante na determinação de quão abundante ou deficiente serão as chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil, podendo ser compreendida como uma banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul (Ferreira & Mello, 2005). De maneira simplificada, pode-se dizer que a convergência dos ventos faz com que o ar quente e úmido ascenda, carregando umidade do oceano para os altos níveis da atmosfera, ocorrendo a formação das nuvens. A

ZCIT atua de fevereiro a maio, principalmente no Estado do Ceará, oeste do Rio Grande do Norte e interior da Paraíba e Pernambuco (Araújo et al., 2008).

3.5. A teoria da entropia no estudo da precipitação pluviométrica

O termo entropia, enquanto conceito científico cuja origem advém da física, foi inicialmente utilizado em termodinâmica por Clausius em 1850. Mais tarde, em 1877, Boltzmann verificou sua interpolação probabilística dentro da mecânica estatística e, em 1906, Planck registrou o seu relacionamento com probabilidade (Moulin, 2005). As ideias centrais surgiram por volta da metade do século XIX, quando a termodinâmica começava a se desenvolver, procurando explicar o funcionamento das máquinas térmicas durante a Revolução Industrial. Dessa forma, a entropia surge com o objetivo de distinguir os processos reversíveis dos irreversíveis numa perspectiva de tempo. A Segunda Lei da Termodinâmica discute acerca do crescimento da entropia de um sistema. A partir da Mecânica Estatística, surge a primeira grande reinterpretação do conceito que procurou manter paralelamente outras duas teorias consideradas inadmissíveis: a da Termodinâmica (Segunda Lei) e a da Mecânica que aplica a reversibilidade temporal (Lima et al., 2004).

Boltzmann define a entropia em termos estatísticos dentro de um contexto mecânico. A estatística estuda as propriedades de uma amostragem ou população, ou seja, de um conjunto finito de objetos. De fato, é impossível estudar as propriedades macroscópicas da matéria pelas características individuais de cada molécula. Assim sendo, a entropia que Boltzmann definiu é uma estatística sobre uma quantidade de matéria. A entropia está relacionada tanto a um estado como a uma tendência: no primeiro caso, ao grau de desorganização da matéria; no segundo, à tendência de desorganização de toda a matéria. Para

a termodinâmica a entropia nunca diminui num sistema fechado, ou seja, seu grau de desorganização pode aumentar, mas jamais diminuir. Disso decorre que a entropia é um estado dinâmico que varia em função do estado inicial de organização da matéria e do tempo, caracterizando assim um processo irreversível (Pineda, 2006).

A nova abordagem introduzida por Boltzmann no estudo dos gases foi uma importante influência na Física do século XX pela introdução da descontinuidade da matéria e pela formulação estatística. A teoria da informação também foi diretamente influenciada, uma vez que emprega tratamento estatístico em sua formulação e usa a entropia para definir quantidade de informação. Shannon (1948) propôs que a quantidade de informação deve ser entendida como a entropia da mecânica estatística e que ela tem características relevantes a saber: à medida que a ocorrência de um grupo se torna mais provável que a dos outros a entropia decresce, a entropia máxima só é atingida quando a ocorrência de todos os grupos é equiprovável (não existe tendência de concentração de probabilidade em algum grupo) e quando existe certeza sobre qual símbolo vai ser transmitido a entropia é zero.

Shannon (1948) utilizou os conceitos de Mecânica Estatística desenvolvidos por Boltzmann e aplicou na análise dos sistemas de comunicação. O grau de aleatoriedade de um sistema é melhor compreendido através da determinação do grau de liberdade, ou seja, da forma com que as mensagens se distanciam dos padrões encontrados. Notadamente, nos estudos onde a quantidade de dados é muito grande, a aplicação dos conceitos da teoria da entropia facilita a identificação de informação genuína dos padrões estruturais. Essa teoria, por sua vez, parece ter inaugurado uma nova abordagem para a compreensão de fenômenos das mais diversas áreas. Isso pode ser verificado pela influência exercida na Física, Genética, Química e na própria Matemática e Estatística de onde se originou (Verdú, 1999).

O conceito de entropia em mecânica estatística está relacionado, segundo Lima et al. (2004), ao logaritmo da contagem de quantos estados microscopicamente diferentes são

compatíveis com uma mesma descrição macroscópica do sistema. Daí emerge a unicidade entre a Mecânica e a Termodinâmica: processos nos quais observamos que a diminuição da entropia não é impossível, apenas apresentam probabilidade de ocorrência extremamente pequena. No início do século XX, a Mecânica Quântica começa a aparecer e alguns pesquisadores relacionam o conceito de entropia com essa nova teoria de fenômenos microscópicos. Essa nova ciência foi uma revolução (energia nuclear, laser e transistor são apenas alguns dos exemplos de sua aplicação), mas até então, o conceito de entropia era apenas uma generalização natural. Atualmente, considera-se a contribuição da entropia como uma preparação à subseqüente teoria quântica da informação. No período posterior a II Guerra Mundial, as telecomunicações começaram a ganhar força e faltava subsídio teórico capaz de prever a capacidade de um canal de comunicação. Em 1948, Claude E. Shannon apresentou a entropia de uma fonte de informação. Nascia aí a Teoria da Informação e o conceito de entropia passava a ter uma nova abordagem: compreendia o armazenamento e a transmissão da informação de modo mais econômico.

Para Lima et al. (2004), a noção de entropia vai ao encontro do contexto de probabilidades e não necessariamente se insere nas premissas das teorias físicas a exemplo da Termodinâmica e da Mecânica Estatística, Clássica ou Quântica. Sua presença está assegurada pelos métodos estatísticos ao invés de conceitos mecânicos da teoria. Para entender o conceito informacional da entropia, deve-se considerar um conjunto de n elementos, sendo a incerteza da ocorrência de um deles considerada como a situação na qual não se conhece qual deles ocorrerão (Singh, 1997). Com base no conhecimento de um único evento, a incerteza poderá ser maior ou menor; por exemplo, o número total de eventos n é uma parte da informação e o número desses eventos com probabilidade diferente de zero é outra parte da informação (Belo Filho, 2010). Essa distribuição de probabilidade, se conhecida, oferece um número de informações que pode reduzir as incertezas associadas ao

sistema. Dessa forma, a incerteza pode ser quantificada pela entropia, levando-se em conta todos os tipos de informações disponíveis, e representada pela distribuição de probabilidade da variável controlada. Interpretando um conjunto composto por n elementos e se considerando p_i como a probabilidade de encontrar o sistema no i -ésimo microestado, a entropia de Shannon é igual à entropia da mecânica estatística (Silva et al., 2003).

A aplicação da teoria da entropia para delimitação de zonas de chuva e consequente avaliação dos recursos hídricos em grande escala tem sido bastante utilizada (Harmancioglu et al., 1992; Singh, 1997; Harmancioglu & Singh, 1998). 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. Consequentemente, 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. Resultados semelhantes foram obtidos por Belo Filho (2010) quando analisou a variabilidade da precipitação na região Nordeste do Brasil utilizando a teoria da entropia.

Chapman (1986) fez uso do conceito de entropia condicional para comparar a eficiência de modelos hidrológicos. A aplicação potencial de entropia em pesquisas cuja abordagem contemplava o estudo dos recursos hídricos foi apresentada por Rajagopal et al. (1987). Não obstante, Sonuga (1976), ao estudar a modelagem de chuva-vazão, descreveu a

aplicação do princípio de entropia e observou que essa técnica pode ser utilizada quando a disponibilidade de dados é mínima. Kawachi et al. (2001) utilizaram-se dessa mesma teoria para avaliar o grau de variabilidade da precipitação pluvial no Japão, obtendo assim mapas de disponibilidade hídrica. Nessa mesma linha de pesquisa, Belo Filho (2010) defende que o tamanho reduzido das amostras torna muito difícil a análise da distribuição de probabilidades das variáveis de precipitação pluvial com base em métodos convencionais. Sendo assim, esse problema pode ser evitado através do uso da teoria da entropia que é capaz de determinar distribuições de probabilidades menos parciais a partir de pequenas amostras de dados.

Cavalcanti & Silva (1994) discutem que a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial, em face de sua incerteza e irregularidade ao longo do tempo, constitui-se num problema crucial em estudos de climatologia. Essa variabilidade é ainda maior em regiões tropicais, particularmente no Nordeste do Brasil, onde atuam vários sistemas atmosféricos, como a zona de convergência intertropical, os sistemas frontais, as brisas de leste e os vórtices ciclônicos. Por outro lado, a temperatura média do ar apresenta baixa variabilidade, sendo, portanto, facilmente modelada em função das coordenadas geográficas com alto nível de confiabilidade.

Para Belo Filho (2010), a precipitação constitui a principal variável do ciclo hidrológico. Por isso, ela pode ser utilizada para representar o potencial hídrico de uma região. A desordem ou a incerteza na intensidade e na ocorrência de chuvas ao longo do tempo é uma das restrições primária ao gerenciamento dos recursos hídricos e para utilização eficiente da água. Esse autor defende também que a teoria da entropia oferece uma forma natural para determinar os riscos associados aos sistemas ambientais ou aos recursos hídricos podendo servir como base de análise de confiança. Sua natureza é estatística ou probabilística e pode ser interpretada como uma medida da quantidade do caos ou como a falta de informação sobre o sistema.

Saco et al. (2010) analisaram a possível ligação entre a variabilidade da entropia e as épocas de rápidas mudanças climáticas. Os quantificadores da entropia evidenciaram que existem ciclos de aproximadamente 200 anos durante o Holoceno classificado como antigo e médio. Nesses ciclos, os autores encontraram uma tendência de aumento da entropia durante os períodos mais longos que pode estar associada à aridez dos trópicos baixos. Ainda através do conhecimento da mesma teoria, Liu et al. (2010) utilizaram a entropia cruzada no intuito de analisar séries temporais de taxas de câmbio em países asiáticos verificando o nível de sincronia entre duas séries temporais. De modo particular, nas cidades de Cingapura, Tailândia e Taiwan, os valores da entropia cruzada após a crise das moedas asiáticas foram superiores aos mesmos valores observados no período anterior à crise. Para os autores, a entropia cruzada é bastante eficiente na descrição da correlação entre séries temporais. Entretanto, para Maruyama et al. (2005), a principal questão a ser observada quando se usa a teoria da entropia nessas aplicações é verificar o grau de incerteza ou a medida da desordem de ocorrência de chuva. A distribuição espacial da precipitação está relacionada a fatores meteorológicos e hidrológicos. O conhecimento das condições climáticas e topográficas de uma região pesquisada é, portanto, necessário para a localização de redes de medição de chuva numa bacia hidrográfica afim de que se possam obter boas informações das observações realizadas.

A técnica de dimensionamento de postos pluviométricos tomando como base a teoria da entropia é outra aplicação que pode e deve ser ainda bastante explorada no segmento de recursos hídricos no nosso país. Nessa perspectiva, pode-se citar Moulin (2005) em cujo estudo buscou descobrir um número ótimo de estações dentro de uma rede de 18 postos pluviométricos localizados no Estado do Espírito Santo. A partir do princípio de maximização da informação, os estudos mostraram que somente 15 estações eram suficientes para representar aquela rede. Os resultados obtidos pelo modelo estocástico foram expressos na

forma de mapas de entropia, onde podem ser observados os intervalos correspondentes ao grau de incerteza da precipitação, identificando regiões ou áreas com maior ou menor entropia.

O planejamento, o gerenciamento e a utilização do potencial de recursos hídricos de um local, bacia ou região demandam informações consistentes que quando obtidas de forma precisa reduzem custos operacionais e minimizam falhas nos projetos, principalmente em locais de baixos índices de pluviometria. A teoria da informação desenvolvida por Claude E. Shannon e que fundamenta tantos outros trabalhos científicos apresenta suma importância no estudo da precipitação pluviométrica e de muitos outros temas dentro das inúmeras ciências existentes. Por isso, diversos enfoques podem ser vistos e discutidos no âmbito das múltiplas áreas do conhecimento humano e cujos objetivos encontram sua razão de ser na capacidade que essa teoria possui de gerar informações que contribuem no processo de desenvolvimento do potencial de recursos hídricos de qualquer região do mundo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

4.1.1. Localização

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). Segundo o IBGE (2011), sua população é pouco superior a 3,7 milhões de habitantes. O Estado está dividido em quatro mesorregiões: Sertão, Borborema, Agreste e Mata Paraibana (Rodriguez, 2002). O tipo de vegetação predominante é a caatinga e o solo é bastante diversificado, formado principalmente por latossolo arenoso (Francisco, 2010). A Figura 1 exibe a localização da área de estudo no mapa do Brasil e a Figura 2 exibe a distribuição geográfica das mesorregiões existentes nessa região.

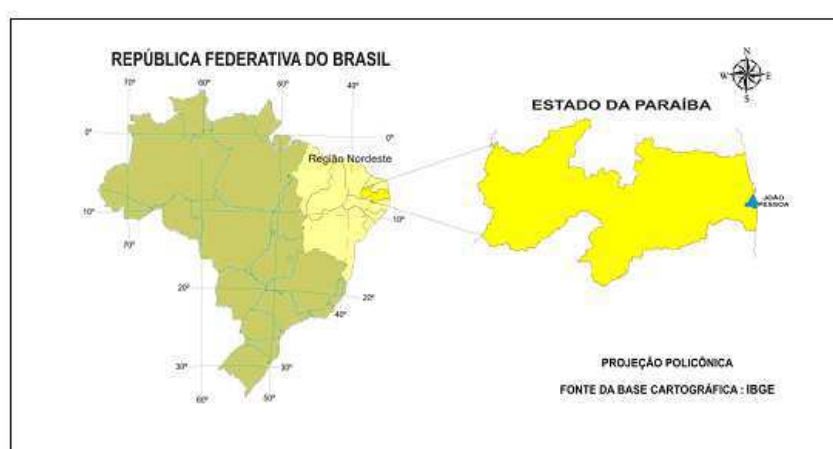


Figura 1. Localização da área de estudo no mapa do Brasil (Fonte: Francisco, 2010).

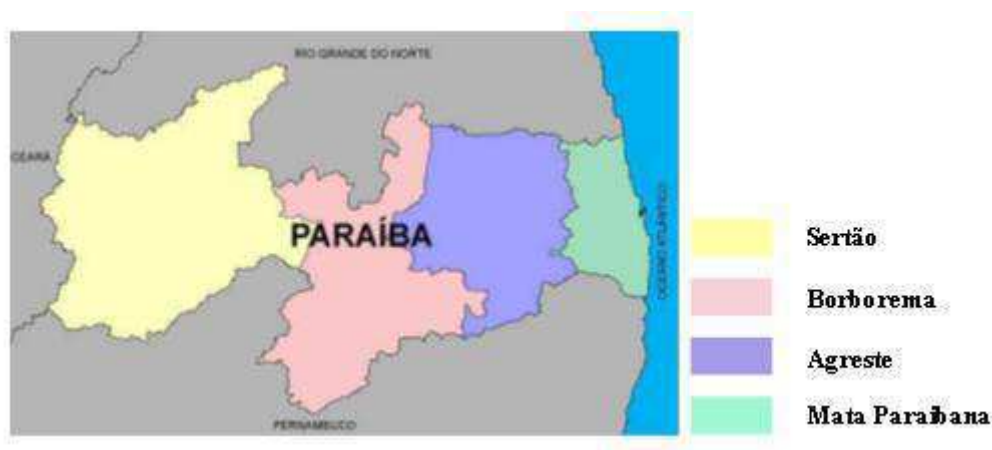


Figura 2. Distribuição geográfica das mesorregiões do Estado da Paraíba (Fonte: Silva Filha, 2006).

4.1.2. Relevo

O relevo paraibano não possui distribuição uniforme ao longo de seu território. No litoral, a altitude oscila entre 0 e 10 m, constituindo formas de relevo tais como praias, restingas, dunas e mangues. Ainda são encontrados também nas encostas orientais e nos vales úmidos do Estado os tabuleiros (ou cerrados) que se situam numa altitude entre 20 e 30 metros, podendo haver alguns deles que chegam a ter até 200 m. Além desses, existem as planícies fluviais que correspondem aos grandes vales formados pelos rios Paraíba e Mamanguape.

A região central é cortada pelo Planalto da Borborema, a parte mais elevada do relevo paraibano, constituído por várias serras com altitudes que variam de 500 a 650 metros. As principais delas são: Araruna, Viração, Caturité, Comissária e Teixeira onde fica o Pico do Jabre que apresenta mais de 1000 m de altitude e é o ponto mais elevado do Estado (Rodriguez, 2002). Na mesorregião do Sertão está situada a depressão sertaneja cujo início se dá na cidade de Patos, após a Serra da Viração. Esta serra é formada a partir de um conjunto

de serras baixas, ocupando uma área extensa entre a mesorregião da Borborema e as terras situadas nos estados vizinhos.

4.1.3. Clima

O Estado da Paraíba possui clima tropical quente e úmido na Planície Atlântica que engloba a encosta oriental do Planalto da Borborema onde podem ser vistas chuvas de outono-inverno (Silva, 2004). Nessa parte do Estado, as chuvas são decorrentes dos ventos alísios de sudeste. A precipitação anual no sentido litoral - interior reduz-se aproximadamente de 1800 mm para 600 mm devido à depressão do relevo, voltando a cerca de 1450 mm nos contrafortes do Planalto da Borborema (Francisco, 2010). Esse autor afirma ainda que na porção central paraibana predomina o clima semiárido quente com totais anuais de precipitação inferiores a 600 mm, embora as temperaturas permaneçam inferiores àsquelas do litoral em virtude da altitude. Por fim, no terço oeste da Paraíba, está o sertão formado pela depressão do Rio Piranhas e seus contribuintes com clima semiárido quente nas partes mais baixas ou tropical quente e úmido nas áreas mais elevadas. O Estado situa-se no trecho tropical do Hemisfério Sul próximo à linha do Equador entre a faixa dos ventos alísios de sudeste que sofrem desvios significativos em consequência da presença de áreas serranas relativamente transversais a sua direção. Essa posição geográfica possibilita à Paraíba receber alta intensidade de radiação solar e, por conseguinte, elevados níveis de insolação anual.

4.1.4. Vegetação

A vegetação encontrada no litoral do Estado da Paraíba é variada. Nas desembocaduras dos rios estendendo-se até onde existir influência das marés aparecem solos lamacentos, salinos, pantanosos ou instáveis, com ocorrência de vegetação arbórea ou arbustiva de mangue. Nas encostas orientais e nos vales úmidos, podem ser vistos solos areno-argilosos e solos férteis de várzea onde predominava uma mata densa e úmida conhecida como Mata Atlântica que se apresenta atualmente bem reduzida em relação a sua área primitiva. Essa vegetação tem como característica marcante a presença de árvores altas, com folhas perenes e sempre verdes tais como peroba e sucupira. Na superfície aplainada do Baixo Planalto onde os solos mal drenados são constituídos de camadas arenosas aparece o cerrado. Formado principalmente por gramíneas e arbustos tortuosos, predominantemente representados, dentre outras espécies, por batiputás e mangabas, o cerrado também é conhecido localmente por tabuleiro (Rodriguez, 2002). Segundo essa autora, a degradação do Agreste pela ação do homem resume quase toda a depressão a uma cobertura de gramíneas rasteiras e muitos juazeiros, destacando entre as espécies dessa formação vegetal o mulungu, a barriguda e o mandacaru. A formação do Agreste prolonga-se entre o Brejo úmido e o Cariri semiárido. Na frente oriental da Borborema, a região do Brejo, os ventos aquecidos dão origem às chuvas orográficas e, por isso, os solos são bem evoluídos, argilosos, assegurando a ocorrência de uma mata úmida (Mata do Brejo). Depois do brejo, em toda a porção aplainada elevada da Borborema, a semiaridez caracteriza a paisagem. Os solos são rasos e pedregosos. Sob essas condições, desenvolve-se a caatinga das regiões do Cariri e Curimataú paraibanos. A catingueira é uma árvore bem característica dessa formação. No seridó, a caatinga aparece numa forma bem mais empobrecida e no sertão esse tipo de vegetação primitivamente

arbustivo-árborea foi sendo degradada para ocupação do solo, apresentando uma formação arbustiva esparsa a exemplo do marmeleiro, do mandacaru e do xique-xique.

4.2. Dados de precipitação pluvial

Neste estudo foram utilizadas séries diárias de precipitação pluvial do Estado da Paraíba de postos pluviométricos com dez anos de dados. Essas séries foram selecionadas com base no critério de se analisar apenas aquelas sem falhas e contínuas, bem como distribuídas homogêneas na área de estudo. Os dados diários de precipitação pluvial 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. A Figura 3 exibe a distribuição geográfica dos 77 postos utilizados neste estudo.

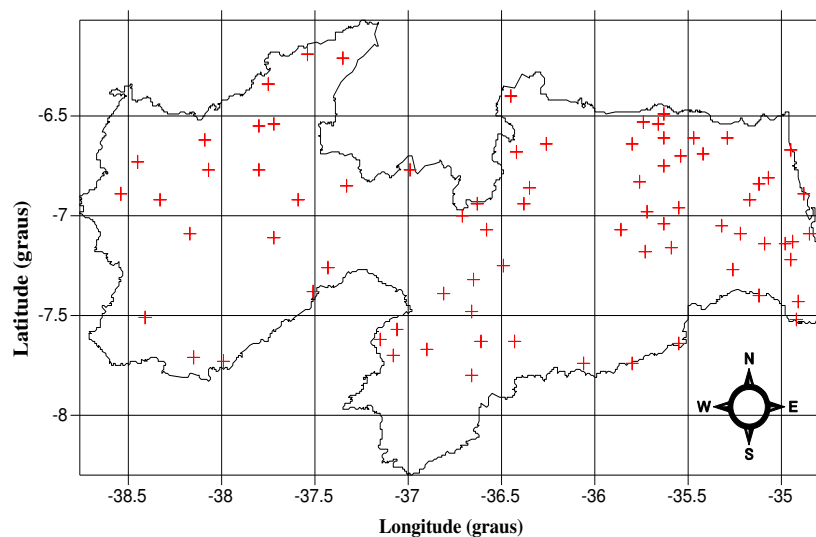


Figura 3. Distribuição geográfica dos 77 postos pluviométricos do Estado da Paraíba analisados neste estudo.

4.3. Método

Um software apropriado para traçar isolinhas foi utilizado para elaborar os mapas de distribuição dos postos pluviométricos, de isoentropias (linhas de mesma entropia), de isoietas (linhas de mesma precipitação) e do coeficiente de variação (CV) da precipitação. Além disso, foi utilizado também outro software que possibilitou a elaboração das figuras de classificação dos postos pluviométricos em categorias de regimes de chuva.

4.4. Cálculo da entropia marginal da precipitação

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. Por isso, 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 i -ésimo 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 \overline{H} é a entropia média e n o número de anos que foram utilizados no cálculo de H .

O ganho de uma informação resulta no decréscimo da entropia e vice-versa. A entropia torna-se zero quando existe certeza absoluta da ocorrência de certo evento, ou estatisticamente, quando todas as probabilidades de um conjunto, exceto uma, é zero.

5. 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.

Na perspectiva de compreensão dos padrões de distribuição de chuva no Estado da Paraíba, esta pesquisa buscou, 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, 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 partir do processamento dos dados, foi possível a elaboração de mapas de classificação de categorias de regimes de chuva de acordo com a similaridade entre os valores da precipitação e de sua entropia. Dada a particularidade que envolve cada uma dessas categorias, foi possível estabelecer certa relação entre o potencial hídrico e as mesorregiões do Estado.

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 4). 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. A Categoria 1, que é representada pelo município de Juazeirinho e integrante da mesorregião da Borborema, aparece neste trabalho com baixa disponibilidade

hídrica, apresentando período chuvoso entre os meses de janeiro a junho. A Categoria 2, que é representada pelo município de Mari, 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, na Categoria 3, representada pelo município de Pombal e 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 na Categoria 4 que é representada pelo 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 as outras categorias.

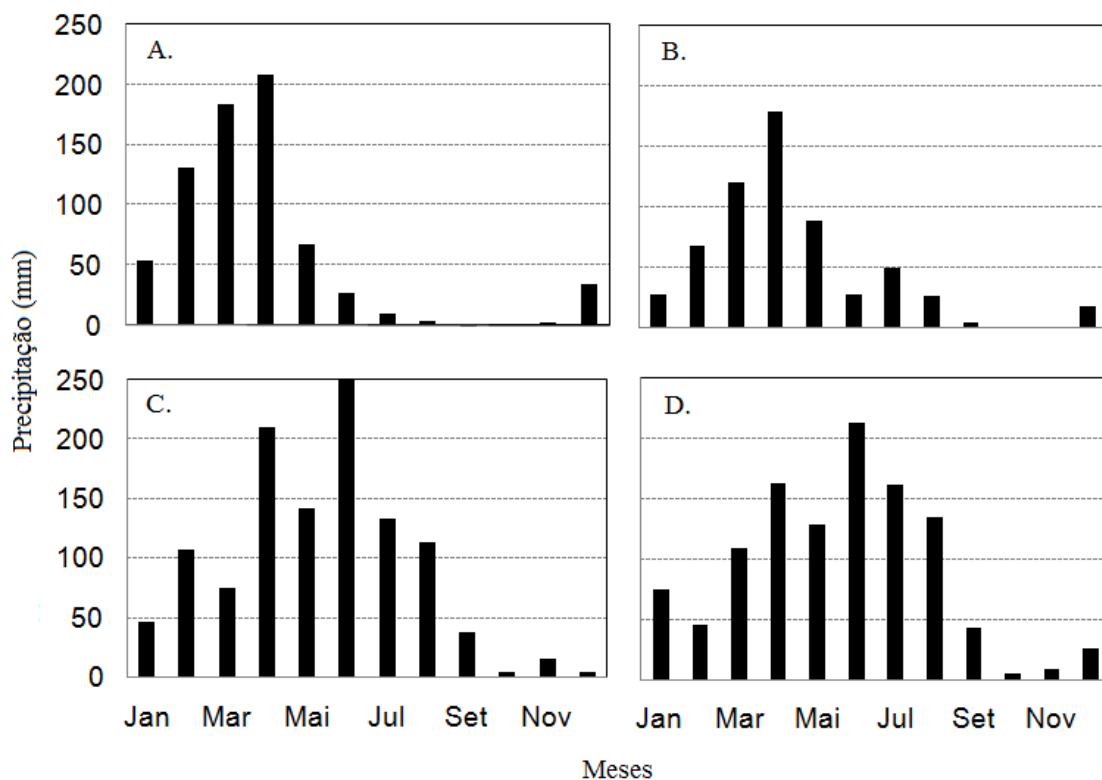


Figura 4. Histograma de frequência da precipitação pluvial de localidades representativas da Categoria 3 – Pombal (A), Categoria 1 – Juazeirinho (B), Categoria 4 – Duas Estradas (C) e Categoria 2 – Mari (D).

5.1. Zonas hidrológicas

Os mapas de isolinhas que descrevem a distribuição média da precipitação \bar{P} , da entropia \bar{H} e do coeficiente de variação \overline{CV} da precipitação para o período anual são apresentados a seguir. Nesses mapas, as diferentes cores definem os intervalos de magnitude das variáveis no Estado da Paraíba. 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

O valor máximo da entropia média anual foi 8,20 bits, ocorreu na cidade de Frei Martinho, enquanto que o mínimo foi de 4,20 bits no município de Belém do Brejo do Cruz. Durante o período chuvoso a entropia variou de 3,25 bits (Umbuzeiro) a 7,67 bits (Frei Martinho). Por outro lado, verifica-se uma variação da entropia de 0,18 bits (São José de Espinharas) a 2,37 bits (Pedras de Fogo) durante o período seco. Esses resultados mostram

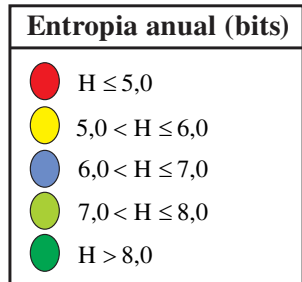
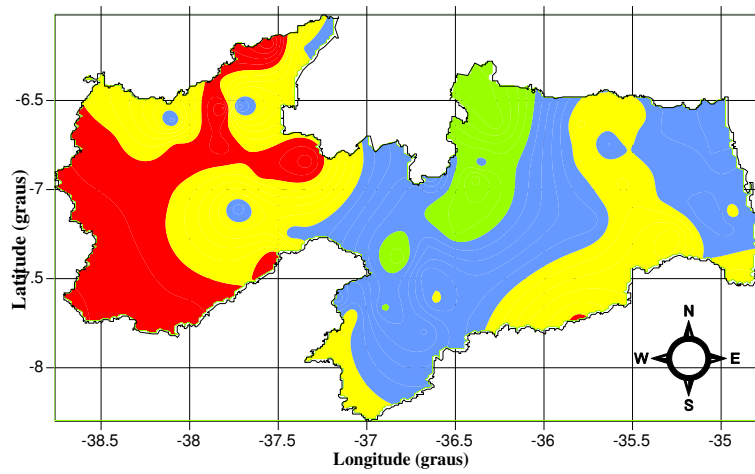
que a entropia do período anual manteve-se maior nos municípios do Litoral em relação às localidades do Sertão. No período chuvoso a entropia dos postos pluviométricos da mesorregião da Borborema é superior àquela dos postos pertencentes ao Agreste Paraibano, enquanto que o período seco exhibe os menores 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 5. 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 5A). 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.

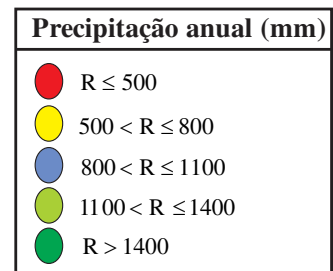
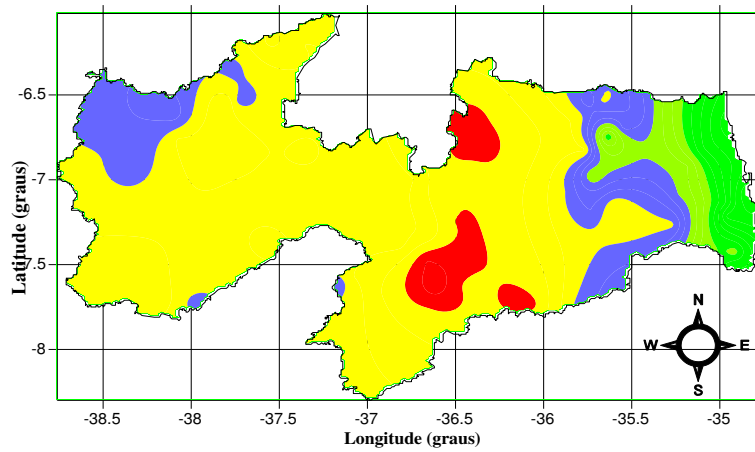
Na microrregião do Brejo, a entropia variou de 5,0 a 7,0 bits com precipitação pluviométrica média anual em torno de 1100 mm. A microrregião do Sertão apresentou os mais baixos valores de entropia, em torno de 5,0 bits (cor vermelha). A precipitação na região não ultrapassa, em sua maioria, os 800 mm/ano (Figura 5B). 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. Resultados semelhantes foram obtidos por Belo Filho (2010) quando analisou a entropia da vazão e da precipitação na região Nordeste do Brasil.

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 aqueles obtidos por Belo Filho (2010) quando encontrou 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. Nesse trabalho, os autores obtiveram CV médio da precipitação anual de 53%, cuja discrepância com os valores encontrados no presente estudo podem estar associados à própria variabilidade das chuvas na região e ao período das séries temporais analisadas.

A)



B)



C)

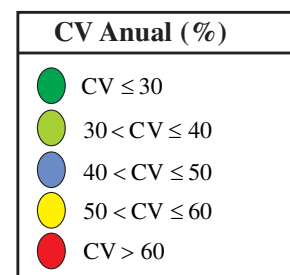
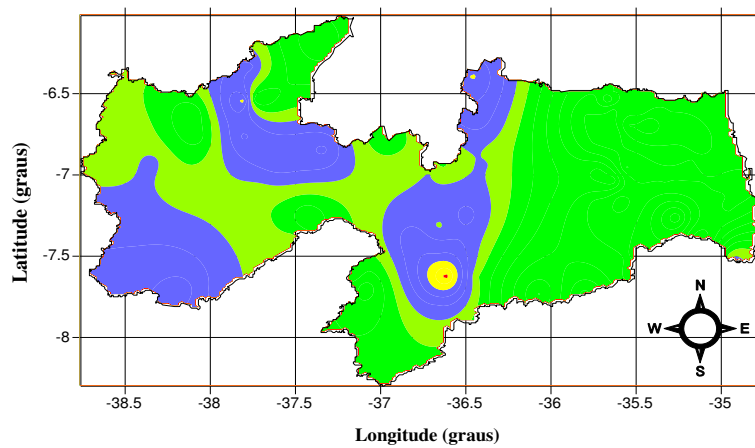


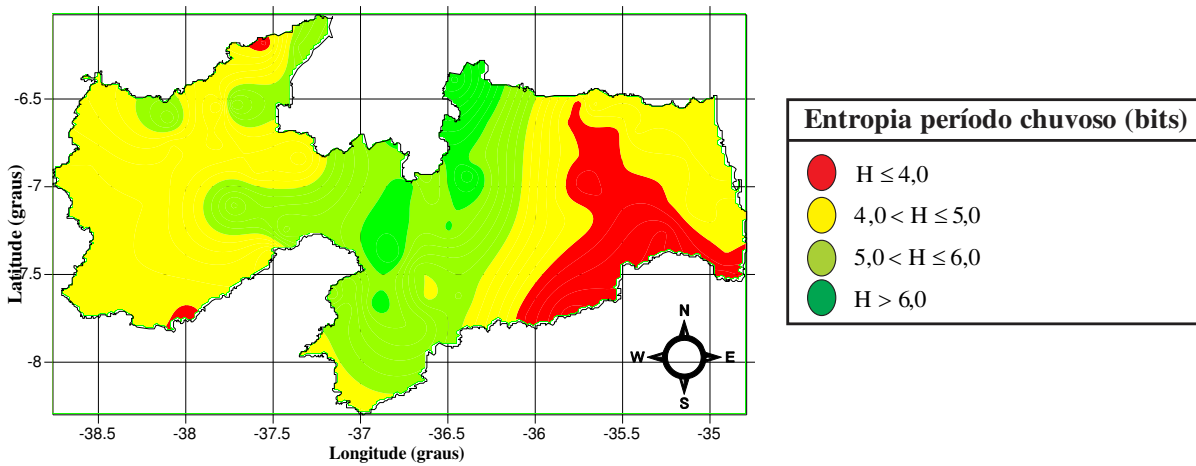
Figura 5. Variabilidade espacial média anual da entropia (isentrofia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).

A Figura 6 exibe as isolinhas das variáveis pesquisadas no período chuvoso. Os valores de entropia média para esse período (Figura 6A) 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).

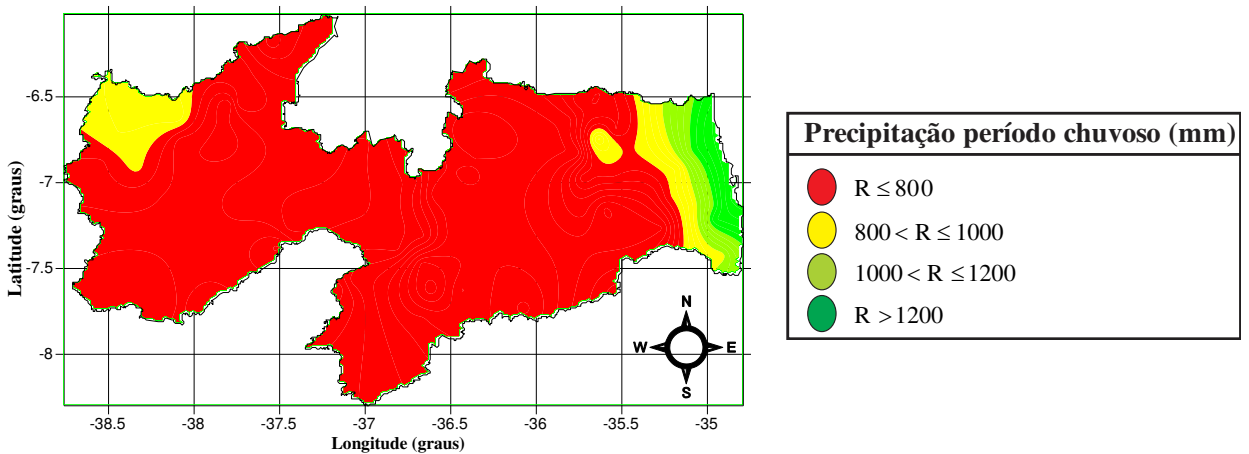
A distribuição da precipitação na área de estudo é apresentada na Figura 6B e evidencia que cerca de 80% do Estado da Paraíba apresenta, em média, totais pluviométricos inferiores a 800 mm durante o período chuvoso. Por outro lado, apenas a parte litorânea do Estado apresenta totais pluviométricos superiores a 800 mm, e numa faixa mais estreita ainda, e mais próximo 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.

A)



B)



C)

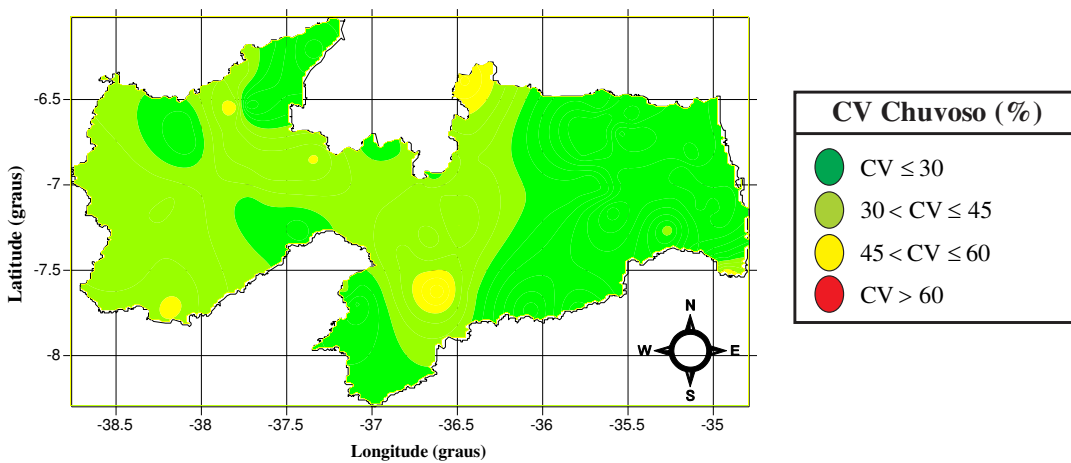


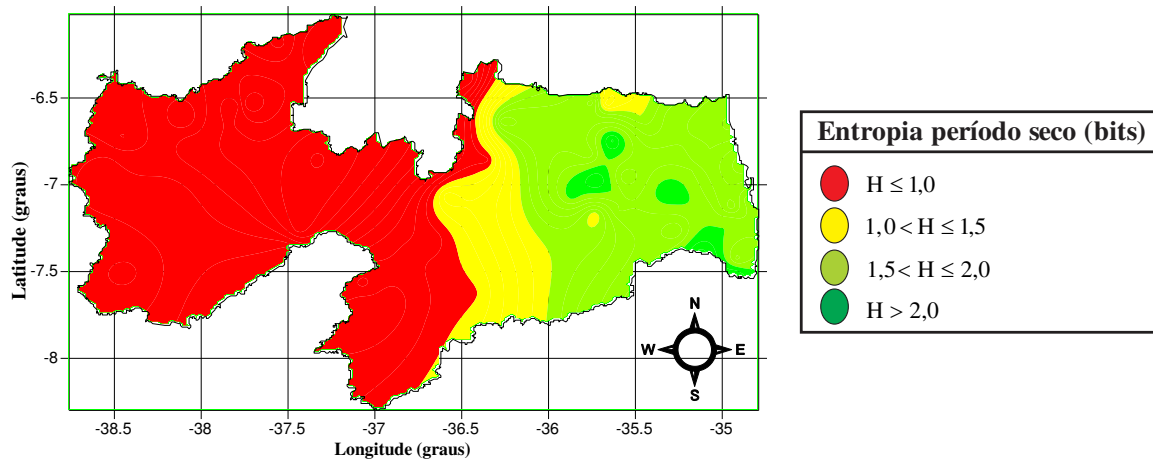
Figura 6. Variabilidade espacial média do período chuvoso da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).

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.

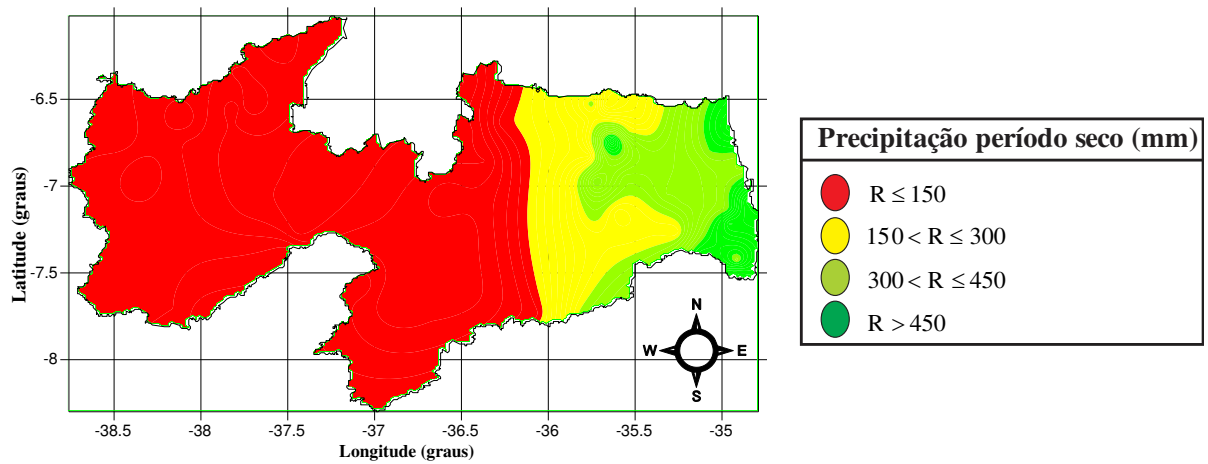
As isolinhas de entropia (isoentropia), de precipitação (isoieta) e do coeficiente de variação (CV) da precipitação durante o período seco no Estado da Paraíba são exibidas na Figura 7. O período seco, se comparado aos outros dois períodos analisados, apresentou contrastes mais acentuados nas variáveis estudadas. As isoentropias do período seco exibem máximos no Litoral e Agreste, com valores acima de 1,5 bits (Figura 7A). 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 7B). 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.

A)



B)



C)

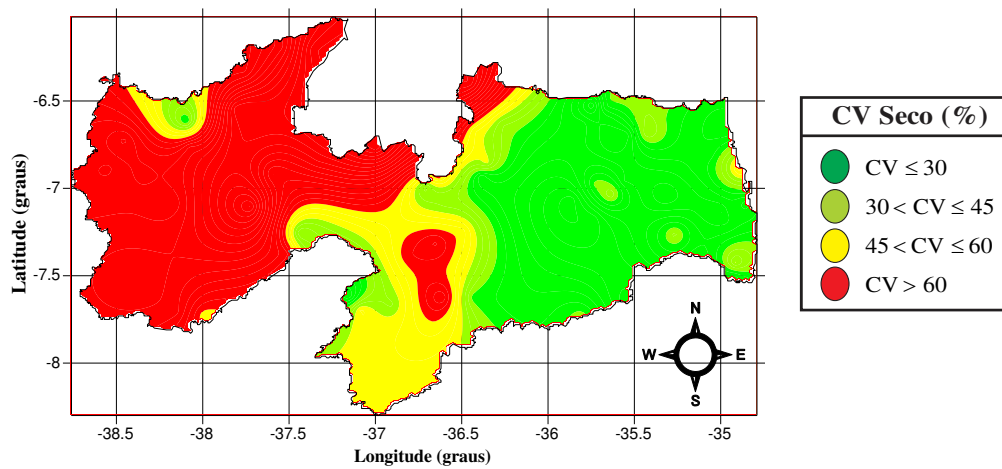


Figura 7. Variabilidade espacial média do período seco da entropia (isoentropia) (A), da precipitação (isoieta) (B) e do coeficiente de variação da precipitação (CV) (C).

Os mapas de isolinhas de precipitação dos períodos estudados constatam 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, conseqüentemente, 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. Resultados similares foram obtidos por Silva et al. (2003) quando analisaram a variabilidade da precipitação do Estado da Paraíba.

5.2. Classificação da disponibilidade hídrica

Os postos pluviométricos da região de estudo foram classificados em categorias conforme os critérios estabelecidos na Tabela 3 e a disponibilidade hídrica classificada de acordo com a Tabela 4. Com base nessas tabelas, as Figuras 8 a 12 exibem a divisão do Estado da Paraíba em quatro partes, determinadas pela intersecção das médias da entropia e da precipitação anual dos postos analisados, estabelecendo-se, assim, regiões com regimes de chuva homogêneos. A teoria da entropia aplicada às séries temporais de precipitação pluvial pode oferecer uma medida do potencial de recursos hídricos numa determinada região (Kawachi et al., 2001).

Tabela 3. Critérios de distribuição dos postos pluviométricos em categorias de regimes de chuva em função da entropia média anual (\bar{H}) e da precipitação média anual (\bar{P})

Categoria	Entropia (bits)	Precipitação (mm)
1	$H > \bar{H}$	$P \leq \bar{P}$
2	$H > \bar{H}$	$P > \bar{P}$
3	$H \leq \bar{H}$	$P \leq \bar{P}$
4	$H \leq \bar{H}$	$P > \bar{P}$

Tabela 4. Classificação da disponibilidade de recursos hídricos em função da Precipitação Média da Categoria (PMC) e da Precipitação Média da Região (PMR)

Grupo	Classificação	Critério
I	Baixa	$PMC \leq 80\% PMR$
II	Moderadamente baixa	$80\% PMR < PMC \leq 100\% PMR$
III	Alta	$PMC > 120\% PMR$
IV	Moderadamente alta	$100\% PMR < PMC \leq 120\% PMR$

A Figura 8 exibe a relação entre entropia média anual e a precipitação média anual dos 77 postos utilizados nesta pesquisa, com vistas à construção de 4 categorias de regimes de chuva na área de estudo. A precipitação média anual do Estado da Paraíba é de 1005,9 mm e a entropia média anual é de 6,2 bits. Os postos pluviométricos analisados se ajustam dentro de categorias distintas de acordo com as suas características, denotando, assim, que o comportamento da chuva e de sua entropia no Estado da Paraíba apresenta padrões diferentes principalmente entre as mesorregiões situadas a oeste (localizadas dentro das Categorias 1 e 3) e aquelas do leste do Estado (localizadas principalmente dentro das Categorias 2 e 4).

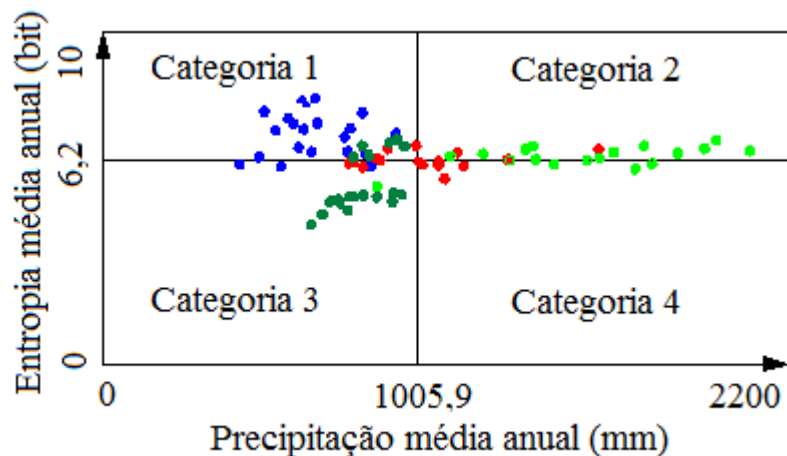


Figura 8. Relação entre entropia e precipitação anual de 77 postos pluviométricos do Estado da Paraíba.

A relação entre entropia e precipitação durante o período anual para 21 postos pluviométricos da mesorregião da Borborema é apresentada na Figura 9 e os valores médios dessas variáveis para cada localidade são apresentados no Anexo I. A grande maioria dos postos dessa mesorregião se enquadra dentro da Categoria 1. A disponibilidade de recursos hídricos nessa categoria é considerada como baixa, haja vista que a precipitação pluvial

representa 67% da média anual e a entropia mantém-se acima da média na maioria das estações. A precipitação média \pm desvio-padrão dessa categoria é $676,13 \pm 131,83$ mm/ano; enquanto a entropia média \pm desvio-padrão é $6,96 \pm 0,69$ bits. Portanto, os postos pluviométricos concentram-se predominantemente na Categoria 1 e a média de precipitação nessa mesorregião corresponde a apenas dois terços da média anual do Estado. Ressaltam-se ainda que na mesorregião da Borborema são encontradas algumas localidades com os menores índices de precipitação dentro da área pesquisada, como é o caso de Coxixola e Serra Branca com 436,80 e 499,27 mm/ano de chuva, respectivamente. Portanto, são necessárias políticas de gestão do potencial hídrico nessa mesorregião em face da baixa pluviometria anual e do alto nível de incertezas das chuvas indicado pela entropia.

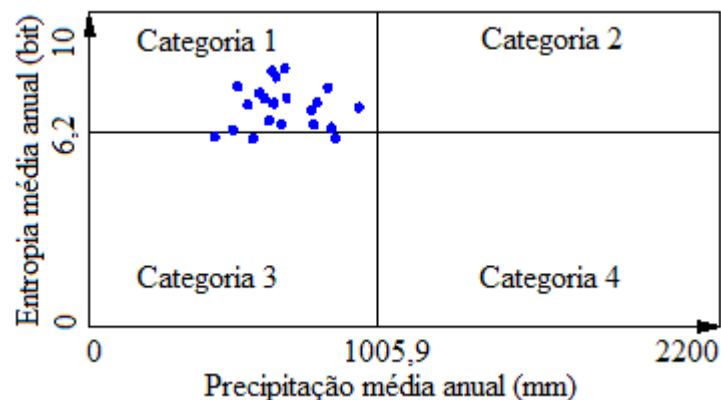


Figura 9. Relação entre entropia e precipitação anual de 21 postos pluviométricos da mesorregião da Borborema.

Os postos pluviométricos localizadas na Mata Paraibana são exibidos na Figura 10 e as médias anuais de entropia e precipitação dessas localidades são apresentadas no Anexo II. Essa mesorregião se enquadra dentro da Categoria 2, com 18 municípios que apresentam

precipitação pluviométrica média anual acima da média do Estado e, por isso, dispõem de uma alta disponibilidade hídrica, excedendo em 54% a média anual precipitada na região estudada. A precipitação média \pm desvio-padrão dessa categoria é $1551,32 \pm 371,60$ mm/ano; enquanto a entropia média \pm desvio-padrão é $6,27 \pm 0,32$ bits. Os maiores índices pluviométricos do Estado da Paraíba são encontrados nessa mesorregião, como no caso dos municípios de Cabedelo, Baía da Traição e João Pessoa que apresentaram totais anuais médios de chuva de 2078,63; 1969,83 e 1932,77 mm, respectivamente. Com valores superiores à média do Estado, essa mesorregião apresenta alta disponibilidade de recursos hídricos em face dos sistemas atmosféricos que atuam na costa leste da região Nordeste do Brasil. Entretanto, o nível de aleatoriedade das chuvas é também consideravelmente importante, com entropia média apenas um pouco inferior àquela da mesorregião da Borborema.

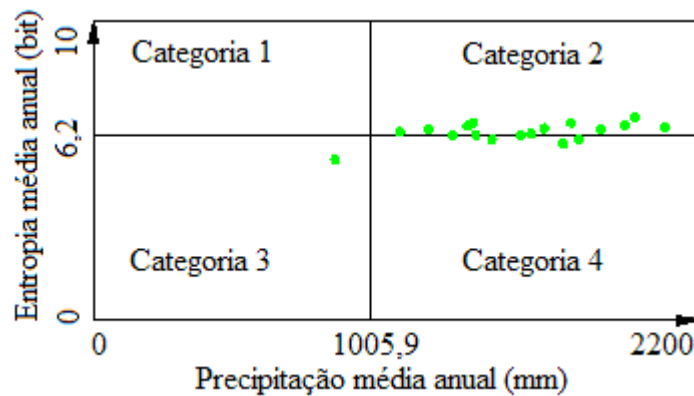


Figura 10. Relação entre entropia e precipitação anual de 18 postos pluviométricos da mesorregião da Mata Paraibana.

A relação entre entropia e precipitação anual dos 20 postos pluviométricos da mesorregião do Sertão é exibida na Figura 11. Esses postos pluviométricos aparecem agrupados, em sua maioria, na Categoria 3 com valores médios de entropia e precipitação que são apresentados no Anexo III. O Sertão Paraibano apresenta disponibilidade hídrica moderadamente baixa, com um percentual de 83% da média anual do Estado da Paraíba. Essa mesorregião tem clima semiárido que é agravado pelas periodicidades das secas, com altas temperaturas e elevadas taxas de evaporação (Silva, 2004). A precipitação média \pm desvio-padrão dessa categoria é $836,64 \pm 102,89$ mm/ano; enquanto a entropia média \pm desvio-padrão é $5,29 \pm 0,74$ bits.

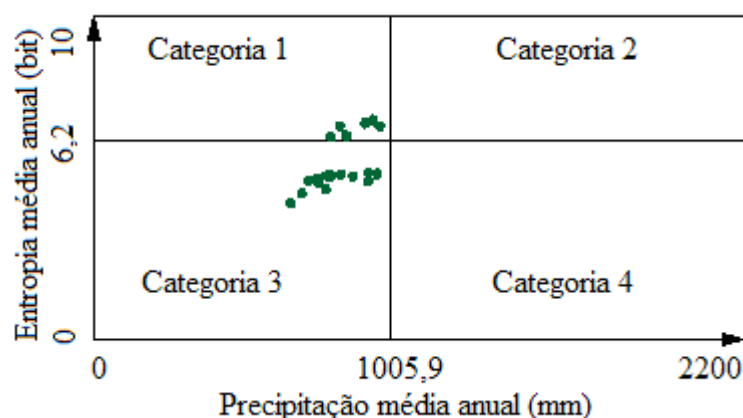


Figura 11. Relação entre entropia e precipitação anual de 20 postos pluviométricos da mesorregião do Sertão.

A relação entre entropia e precipitação anual de 18 postos pluviométricos pertencentes à mesorregião do Agreste Paraibano é exibida na Figura 12, enquanto que as médias dessas variáveis são apresentadas no Anexo IV. Esses postos pluviométricos se enquadram dentro da Categoria 4, porém, algumas estações se localizam em outras categorias,

principalmente naquela classificada como Categoria 3. Este resultado indica que o regime de chuva do Agreste do Estado da Paraíba não é uniforme dentro de uma única categoria e, possivelmente, sofre as influências dos mesmos sistemas atmosféricos que produzem chuvas na mesorregião do Litoral. Essa mesorregião apresenta valores pluviométricos aproximados às médias anuais da área de estudo (102%), indicando uma disponibilidade hídrica moderadamente alta. A precipitação média \pm desvio-padrão dessa categoria é $1033,07 \pm 194,54$ mm/ano; enquanto a entropia média \pm desvio-padrão é $6,09 \pm 0,34$ bits. A adoção de políticas públicas de contenção do desperdício d'água deve ser implantada nessa mesorregião.

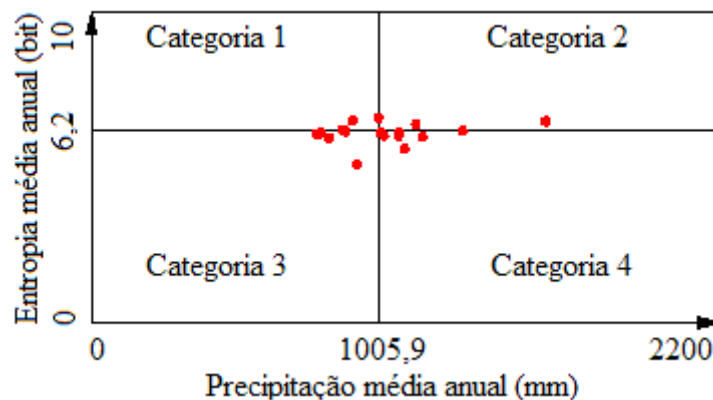


Figura 12. Relação entre entropia e precipitação anual de 18 postos pluviométricos da mesorregião do Agreste.

A ilustração da rede pluviométrica do Estado da Paraíba em categorias possibilita identificar características comuns do regime de chuvas, pois os postos pluviométricos se agrupam conforme os padrões de comportamento das variáveis entropia e precipitação. Resultados semelhantes foram obtidos por Kawachi et al. (2001) quando analisaram a disponibilidade dos recursos hídricos no Japão.

6. 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;

3. As mesorregiões da Borborema, Mata Paraibana, Sertão e Agreste são classificadas em termos de disponibilidade hídrica como baixa, alta, moderadamente baixa e moderadamente alta, respectivamente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AESA. Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA. Gestão de Recursos Hídricos no Estado da Paraíba. Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente, João Pessoa, 2007.
- Andrade, M. C. A terra e o homem no nordeste. 7ª ed. São Paulo: Cortez, 2005.
- Araújo, L. E.; Sousa, F. A. S.; Ribeiro, M. A. F. M.; Santos, A. S.; Medeiros, P. C. Análise Estatística de Chuvas Intensas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Revista Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos - SP, v. 23, n. 2, p. 162-169, 2008.
- Barbosa, C. F.; Angelini, J. M. G.; Oliveira, J. R. G.; Agarussi, M. A. S. N.; Garcia, T. A. Sistema de gestão de recursos hídricos através de sistema de gestão ambiental (SGA) em áreas de proteção ambiental municipais (APA ou APAM). Instituto de Geociências, Unicamp, 2003.
- Belo Filho, A. F. A teoria da entropia aplicada no estudo da precipitação pluvial e da vazão fluvial no nordeste do Brasil. 53f. (Tese de Doutorado). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- Bertoni, J. C.; Tucci, C. E. M. Precipitação. In: Tucci, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação, UFRGS, ABRH, Porto Alegre. Cáp. 5, p. 177-200, 1993.
- Bezerra, M. C. L.; Munhoz, T. M. T. (coord. geral). Gestão dos Recursos Naturais: subsídios à elaboração da Agenda 21 brasileira. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis; Consórcio TC/BR/FUNATURA, 2000.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Secretaria de Recursos Hídricos. Recursos Hídricos no Brasil. Brasília (DF), 1998.

- Brasil. Ministério da Integração Nacional. Relatório Final Grupo de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semi-Árido Nordestino e do Polígono das Secas. Brasília (DF), 2005.
- Cavalcanti, E. P.; Silva, E. D. V. Estimativa da temperatura do ar em função das coordenadas locais. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8, e Congresso Latino-Americano e Ibérico de Meteorologia, 2, Belo Horizonte, Anais... Belo Horizonte: SBM, v. 1, p. 154-157, 1994.
- Chang, P.; Ji, L.; Li, H. A Decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interaction. *Nature*, 385: 516-518, 1997.
- Chapman, T. G. Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance. *Journal Hydrology*, v. 85, p. 111-126, 1986.
- Chu, P. S. Diagnostic studies of rainfall anomalies in Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 111, p. 1655-1664, 1983.
- Conti, G. C. Estimativa da Precipitação Através de Técnicas de Sensoriamento Remoto: Estudo de Caso para o Estado do Rio Grande do Sul (Dissertação de Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- Cruz, J. C. Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- Espinoza, E. S. Distúrbios nos ventos de leste no Atlântico tropical. 120f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, INPE, São Paulo, 1996.
- Ferrão, P. C. Introdução à Gestão Ambiental. Lisboa: IST Press, 219p, 1998.
- Ferreira, A. G.; Mello, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região.

- Revista Brasileira de Climatologia, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 15-28, dez. 2005. Associação Brasileira de Climatologia. Disponível em: <http://www.geografia.ffch.usp.br/abclima/>. Acesso em: 27 out. 2010.
- Francisco, P. R. M. Classificação e mapeamento de mecanização das terras do Estado da Paraíba utilizando sistema de informações geográficas. (Dissertação de Mestrado em Manejo de Solos e Água). Centro de Ciências Agrárias, UFPB, Areia, 2010.
- Garjuli, R. Os recursos hídricos no semiárido. Revista Ciência e Cultura, São Paulo, v. 55, n. 4, São Paulo, 2003. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br>. Acesso em: 30 abr. 2011.
- Hafner, A. V. Conservação e reuso de água em edificações – experiências nacionais e internacionais. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- Harmancioglu, N. B.; Singh, V. P. Entropy in environmental and water resources. In: Herschy, R. W.; Fairbridge, R. W. (Eds.). Encyclopedia of Hydrology and Water Resources. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 225-241, 1998.
- Harmancioglu, N. B.; Singh, V. P.; Alpaslan, N. Versatile uses of the entropy concept in water resources. In: Singh, V. P.; Fiorentino, M. (Eds.). Entropy and Energy Dissipation in Water Resources. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 91-117, 1992.
- Hastenrath, S.; Heller, L. Dynamics of climate hazards in Northeast Brazil. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., 103 (435): 77-92, 1977.
- Husain, T. Hydrologic uncertainty measure and network design. Water Resources Bulletin 25 (3), 527-534, 1989.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 17 fev. 2011.
- Kawachi, T.; Maruyama, T.; Singh, V. P. Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 246, n. 1, p. 36-44, 2001.

Kousky, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review*, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

Kousky, V. E.; Gan, M. A. Upper tropospheric cyclones vórtices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, v. 33, p. 538-551, 1981.

Lacerda, M. A. D.; Lacerda, R. D. O cluster da fruticultura no pólo Petrolina/Juazeiro. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v. 4, n. 1, Campina Grande, 2004.

Lanna, A. E. 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, 2008.

Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340142008000200008&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt. Acesso em: 31 mar. 2011.

Lima, B. N. B.; Cioletti, L. M.; Cunha, M. O. T.; Braga, G. A. Entropia: introdução à Teoria Matemática da (des)Informação. Minicurso apresentado na II Bienal da SBM, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2004.

Liu, L. Z.; Qian, X. Y.; Lua, H. Y. Cross-sample entropy of foreign exchange time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 389, n. 21, p. 4785-4792, 2010.

Macedo, M. J. H.; Braga, C. C.; Dantas, F. R. C.; Silva, E. D. V. Variabilidade regional da pluviometria no Estado do Piauí. In: *Anais... III Simpósio Internacional de Climatologia*, Canela, RS, 2009.

Martins, T. O conceito de desenvolvimento sustentável e seu contexto histórico: algumas considerações. *Jus Navigandi*, Teresina, ano 8, n. 382, 24 jul. 2004. Disponível em: <http://jus2.uol.com.br>. Acesso em: 06 mai. 2011.

Maruyama, T.; Kawachi, M. T.; Singh, V. P. Entropy-based assessment and clustering of potential water resources availability. *Journal of Hydrology*, v. 309, n. 1-4, p. 104-113, 2005.

- Melo, J. A. B.; Pereira, R. A. Recursos hídricos na zona rural do semiárido brasileiro: formas de captação, qualidade da água e configuração de cenários distintos. In: Dantas Neto, J. (Org.). *Uso eficiente da água: aspectos teóricos e práticos*. Campina Grande, p. 40-63, 2008. Livro digital da Biblioteca Virtual de Derecho, Economía y Ciencias Sociales. Disponível em: <http://www.eumed.net/libros/2008c/447/>. Acesso em: 14 dez. 2010.
- Mendonça, F. *Clima e criminalidade: ensaio analítico da correlação entre a temperatura do ar e a incidência de criminalidade urbana*. Curitiba: Editora da UFPR, 2002.
- Moron, V. Trend, Decadal and Interannual Variability in Annual Rainfall of Subequatorial and Tropical North Africa. *Inter. Jour. Climat.*, 17, 785-805, 1997.
- Moulin, G. D. *Técnicas de entropia e de geoestatística no dimensionamento de redes pluviométricas*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, 2005.
- Moura, A. D.; Shukla, J. On the dynamics of the droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 38, n. 12, 2653-2675, 1981.
- Pineda, J. O. C. *A entropia segundo Claude Shannon: o desenvolvimento do conceito fundamental da teoria da informação*. Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre. Pontifícia Universidade Católica, 124p, 2006.
- Rajagopal, A. K.; Teitler, S.; Singh, V. P. Some new perspectives on maximum entropy techniques in water resources research. In: Singh, V. P. (Ed.). *Hydrologic Frequency Modeling*. Dordrecht: D. Reijel Publishing, v. 1, n. 1, p. 247-366, 1987.
- Rebouças, A. C. Água na região nordeste: desperdício e escassez. *Estudos Avançados*, 11(29), 1997.
- Rebouças, A. C. Água e desenvolvimento rural. *Estudos Avançados*, 15(43), 2001.

- Rodrigues, F.; Carvalho, O. Bacias Hidrográficas como Unidade de Planejamento e Gestão Geoambiental: Uma Proposta Metodológica. *Revista Fluminense de Geografia 2* (Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros). Ano I, 2005. Disponível em: http://www.agbniteroi.org.br/Revista2/rfg2_texto4.htm. Acesso em: 23 abr. 2011.
- Rodriguez, J. L. (Org.). Atlas Escolar da Paraíba. João Pessoa, ed. Grafset, 2002.
- Roucou, P.; Aragão, J. O. R.; Harzallah, A.; Fontaine, B.; Janicot, S. Vertical motion, changes to Northeast Brazil rainfall variability: A GCM simulation. *International Journal of Climatology*, West Sussex, v. 16, n. 1, p. 879 – 891, 1996.
- Saco, P. M.; Carpi, L. C.; Figliola, A.; Serrano, E.; Rosso, O. A. Entropy analysis of the dynamics of El Niño/Southern Oscillation during the Holocene. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 189, n. 1, p. 5022-5027, 2010.
- Shannon, C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, p. 379-343, 1948.
- Silva, V. P. R.; Cavalcanti, E. P.; Nascimento, M. G.; Campos, J. H. B. C. 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, 2003.
- Silva, V. P. R. On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 58, n. 4, p. 575-596, 2004.
- Silva, V. P. R.; Pereira, E. R. R.; Azevedo, P. V.; Sousa, F. A. S.; Sousa, I. F. 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, 2011.
- Silva Filha, O. L. Caracterização da criação de suínos locais no Curimataú Paraibano. 157f. Tese (Doutorado em Zootecnia) pelo Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2006.

- Singh, V. P. The use of entropy in hydrology and water resources. *Hydrological Processes*, v. 11, n. 1, p. 587-626, 1997.
- Soares, T. M. Utilização de águas salobras no cultivo de alface em sistemas hidropônicos NFT como alternativa agrícola condizente ao semi-árido brasileiro. 267p. Tese (Doutorado). Piracicaba, 2007.
- Sonuga, J. O. Entropy principle applied to the rainfall-runoff process. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 30, n. 1, p. 81-94, 1976.
- Souza, E. B.; Alves, J. M. B.; Repelli, C. A. Influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico na Estação Chuvosa do Semiárido Nordeste. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 277-283, 1998.
- Suassuna, J. Semi-árido: proposta de convivência com a seca. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 13p, 2002.
- Tucci, C. E. M. Regionalização de vazões. Porto Alegre: UFRGS, 2002.
- Tundisi, J. G. Recursos Hídricos. *Multiciência: Revista Interdisciplinar dos Centros e Núcleos da Unicamp*. Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos, 2003. Disponível em: <http://www.multiciencia.unicamp.br/art03.htm>. Acesso em: 30 abr. 2011.
- UICN. União Internacional para a Conservação da Natureza. PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. WWF. Fundo Mundial para a Natureza. Cuidando do planeta terra: uma estratégia para o futuro. São Paulo: Governo de São Paulo, 1991.
- Uvo, C. R. B. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região Norte e Nordeste brasileiro. 215f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). São José dos Campos, INPE, São Paulo, 1989.
- Verdú, S.; McLaughlin, S. (Orgs.). *Information Theory – 50 Years of Discovery*. Nova Iorque, Wiley - IEEE Computer Society, 1999.
- Vieira, P. P. B. Desafios da Gestão Integrada de Recursos Hídricos no Semi-Árido. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 7-17, 2003.

- Vitorino, M. I.; Braga, C. C.; Brito, J. I. B. Análise da variabilidade de baixa frequência da precipitação sobre o Estado da Paraíba. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis. A Meteorologia a Serviço da Sociedade. Florianópolis: SBMET, 2006.
- Young, M. C. F. 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, 2010.
- Zebiak, S. E. Air-sea interaction in the equatorial atlantic region. J. Climate, 6: 1567-1586, 1983.

ANEXOS

Anexo I. Caracterização dos postos pluviométricos localizados na mesorregião da Borborema representados na Figura 9.

Município	Latitude (°)	Longitude (°)	Entropia Média (bits)	Precipitação Média (mm)
Alcantil	-7,74	-36,06	5,96	570,67
Amparo	-7,57	-37,06	6,42	784,00
Baraúna	-6,64	-36,26	8,11	636,60
Congo	-7,8	-36,66	7,09	642,37
Coxixola	-7,63	-36,61	6,03	436,80
Cubati	-6,86	-36,35	7,05	553,23
Frei Martinho	-6,4	-36,45	8,20	680,03
Gurjão	-7,25	-36,49	7,41	593,63
Juazeirinho	-7,07	-36,58	7,25	610,27
J. do Seridó	-7	-36,71	7,11	792,97
N. Palmeira	-6,68	-36,42	7,63	516,43
Ouro Velho	-7,62	-37,15	6,96	940,00
Parari	-7,32	-36,65	6,86	774,70
Prata	-7,7	-37,08	5,97	858,63
São D. Cariri	-7,63	-36,43	6,54	626,50
S. J. Cordeiros	-7,39	-36,81	7,58	831,73
S. V. Seridó	-6,94	-36,38	7,93	651,33
Serra Branca	-7,48	-36,66	6,25	499,27
Sumé	-7,67	-36,9	7,27	686,97
Tenório	-6,94	-36,63	6,41	669,17
Várzea	-6,77	-36,99	6,32	843,60
Média	-	-	6,96	676,13

Anexo II. Caracterização dos postos pluviométricos localizados na mesorregião da Mata Paraibana representados na Figura 10.

Município	Latitude (°)	Longitude (°)	Entropia Média (bits)	Precipitação Média (mm)
Alhandra	-7,43	-34,91	6,03	1449,09
B. da Traição	-6,67	-34,95	6,76	1969,83
Bayeux	-7,13	-34,94	6,05	1764,83
Caaporã	-7,52	-34,92	5,89	1708,90
Cabedelo	-7,09	-34,85	6,44	2078,63
Capim	-6,92	-35,17	6,15	1306,87
Cruz E. Santo	-7,14	-35,09	6,58	1381,30
Jacaraú	-6,61	-35,29	6,48	1358,93
João Pessoa	-7,22	-34,95	6,50	1932,77
Lucena	-6,89	-34,88	6,36	1845,20
Mamanguape	-6,84	-35,12	6,22	1592,80
Mari	-7,05	-35,32	6,28	1114,87
Mataraca	-6,6	-35,05	6,15	1554,15
P. de Fogo	-7,4	-35,12	6,18	1390,53
Pilar	-7,27	-35,26	5,36	878,70
Rio Tinto	-6,81	-35,07	6,59	1737,17
Santa Rita	-7,14	-34,98	6,40	1640,03
Sapé	-7,09	-35,22	6,35	1219,23
Média	-	-	6,27	1551,32

Anexo III. Caracterização dos postos pluviométricos localizados na mesorregião do Sertão representados na Figura 11.

Município	Latitude (°)	Longitude (°)	Entropia Média (bits)	Precipitação Média (mm)
Aguiar	-7,09	-38,17	5,09	835,06
A. Navarro	-6,73	-38,45	5,11	959,56
Aparecida	-6,77	-38,07	5,05	788,20
B. B. do Cruz	-6,19	-37,54	4,20	666,49
Cajazeiras	-6,89	-38,54	5,04	877,88
C. do Rocha	-6,34	-37,75	5,16	929,72
Condado	-6,92	-37,59	5,05	802,99
Emas	-7,11	-37,72	6,59	831,47
Ibiara	-7,51	-38,41	4,86	758,50
Imaculada	-7,38	-37,51	4,95	750,68
Jericó	-6,55	-37,8	4,52	702,87
Mãe d'Água	-7,26	-37,43	6,29	854,23
Manaíra	-7,71	-38,15	4,96	755,29
Mato Grosso	-6,54	-37,72	6,78	943,67
Nazarezinho	-6,92	-38,33	5,08	980,46
Pombal	-6,77	-37,8	4,90	726,16
Princesa Isabel	-7,73	-37,99	4,89	928,27
São Francisco	-6,62	-38,09	6,48	1056,00
S. J. Espinharas	-6,85	-37,33	4,64	784,06
S. J. B. do Cruz	-6,21	-37,35	6,25	801,33
Média	-	-	5,29	836,64

Anexo IV. Caracterização dos postos pluviométricos localizados na mesorregião do Agreste representados na Figura 12.

Município	Latitude (°)	Longitude (°)	Entropia Média (bits)	Precipitação Média (mm)
A. Grande	-7,04	-35,63	6,06	1079,20
Alagoinha	-6,96	-35,55	5,98	1159,07
Arara	-6,83	-35,76	6,06	787,93
Araruna	-6,53	-35,74	6,01	1074,90
Areia	-6,98	-35,72	6,18	1300,73
Bananeiras	-6,75	-35,63	6,48	1591,73
Belém	-6,7	-35,54	6,12	1077,27
C. de Dentro	-6,64	-35,8	5,95	832,43
Caiçara	-6,61	-35,47	6,02	1025,07
C. de Santana	-6,49	-35,63	6,15	889,30
Dona Inês	-6,61	-35,63	6,10	1013,00
Duas Estradas	-6,69	-35,42	6,38	1136,63
Juarez Távora	-7,16	-35,59	6,10	804,33
Massaranduba	-7,18	-35,73	6,59	1004,97
Natuba	-7,64	-35,55	5,59	1096,07
Riachão	-6,54	-35,66	6,20	878,63
S. S. L. Roça	-7,07	-35,86	6,50	914,50
Umbuzeiro	-7,74	-35,8	5,10	929,46
Média	-	-	6,09	1033,07