

UM SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO PARA O MONITORAMENTO DE SECAS METEOROLÓGICAS EM REGIÕES SEMI-ÁRIDAS

Marcos Airton de Sousa Freitas

Professor e Coordenador do Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos, Meio Ambiente e Computação Aplicada da Universidade de Fortaleza - UNIFOR

E-mail: freitas@feq.unifor.br

RESUMO - Na Gestão de Recursos Hídricos em regiões semi-áridas, como, por exemplo, o Nordeste do Brasil, é de capital importância dispor-se de instrumental prático de auxílio à tomada de decisões, notadamente nos períodos de secas. Desenvolveu-se, então, um Sistema de Suporte à Decisão para o monitoramento de secas no Estado do Ceará com base em índices meteorológicos. Diversos índices foram adaptados e incorporados a um sistema de acompanhamento das características básicas dos períodos de seca, quais sejam, duração, severidade e intensidade, de modo que diferenciadas ações mitigadoras pudessem ser de fato implementadas, de acordo com os valores atingidos por esses parâmetros. No monitoramento da precipitação os seguintes índices meteorológicos foram empregados: o RAI (Rainfall Anomaly Index), o BMDI (Bhalme & Mooley Drought Index), o HSI (Herbst Severity Index), bem como o LRDÍ (Lamb Rainfall Departure Index). Uma vantagem prática no uso desses índices é o acompanhamento quase simultâneo (diário, semanal ou mensal, dependendo da disponibilidade dos dados) do grau de severidade e duração dos períodos secos, permitindo, com isso, tomar medidas efetivas e em tempo hábil, objetivando minorar os impactos ocasionados por uma seca.

A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR METEOROLOGICAL DROUGHT MONITORING IN SEMIARID REGIONS

ABSTRACT - By the water resources management in semiarid areas, as for example Northeast Brazil, it is from huge importance the disponibility of a useful drought monitoring and mitigation tool, in a timely and reliable manner, by the decision makers at all levels. A Decision Support System (DSS) has been developed for drought monitoring based on drought indexes. Several indexes have been modified and incorporated into these system to quantify the basic characteristics of drought periods (duration, severity and magnitude), so that the differentiated measures could be implemented according to the values of those characteristics. The following indexes have been used: RAI (Rainfall Anomaly Index), BMDI (Bhalme & Mooley Drought Index), HSI (Herbst Severity Index), and the LRDÍ (Lamb Rainfall Departure Index). The main advantage by applying these indexes is the almost real time monitoring of the duration and severity of droughts, in order to give emergency aid responses to alleviate drought impacts.

1. INTRODUÇÃO

As secas são consideradas um fenômeno natural que se diferenciam nitidamente das demais catástrofes naturais. Uma diferença básica reside no fato de que, ao contrário de outras ocorrências naturais como cheias, furacões e terremotos, as quais iniciam e terminam repentinamente, além de se restringirem, normalmente, a uma pequena região, o fenômeno das secas tem, quase sempre, um início lento, uma longa duração e espalha-se, na maioria das vezes, por uma extensa área. BRYANT (1991) analisou 31 catástrofes naturais (climáticas e geológicas), dentre furacões, cheias, terremotos, tsunamis, vulcões, etc., com base nos parâmetros característicos e efeitos causados pelas mesmas, tais como duração da catástrofe, área de atuação, número de vítimas fatais, prejuízo econômico, duração dos efeitos, conseqüências sociais, etc. e concluiu que as secas são, dentre todas, a mais grave.

A seca é um fenômeno dito recorrente em regiões semi-áridas. Os efeitos de um duradouro período de seca em uma determinada região dependem, entretanto, não somente da duração e intensidade da seca, mas também das condições socio-econômicas e culturais da população atingida. Secas, notadamente, em regiões onde a demanda por água é maior do que a disponibilidade ou onde haja uma grande variabilidade da oferta d'água, trazem quase sempre conseqüências de larga escala. Grandes projetos de irrigação e concentrações urbanas densamente povoadas estão sujeitos a uma enorme vulnerabilidade no que diz respeito ao abastecimento d'água. A figura 1 apresenta a distribuição espacial das principais secas extremas, deste século, ocorridas no Estado do Ceará, em relação à porcentagem da precipitação média anual. Vê-se, a título de exemplificação, que durante a seca de 1919 mais de 80% da área do Estado do Ceará apresentou um total precipitado abaixo de 40% da média a longo prazo.

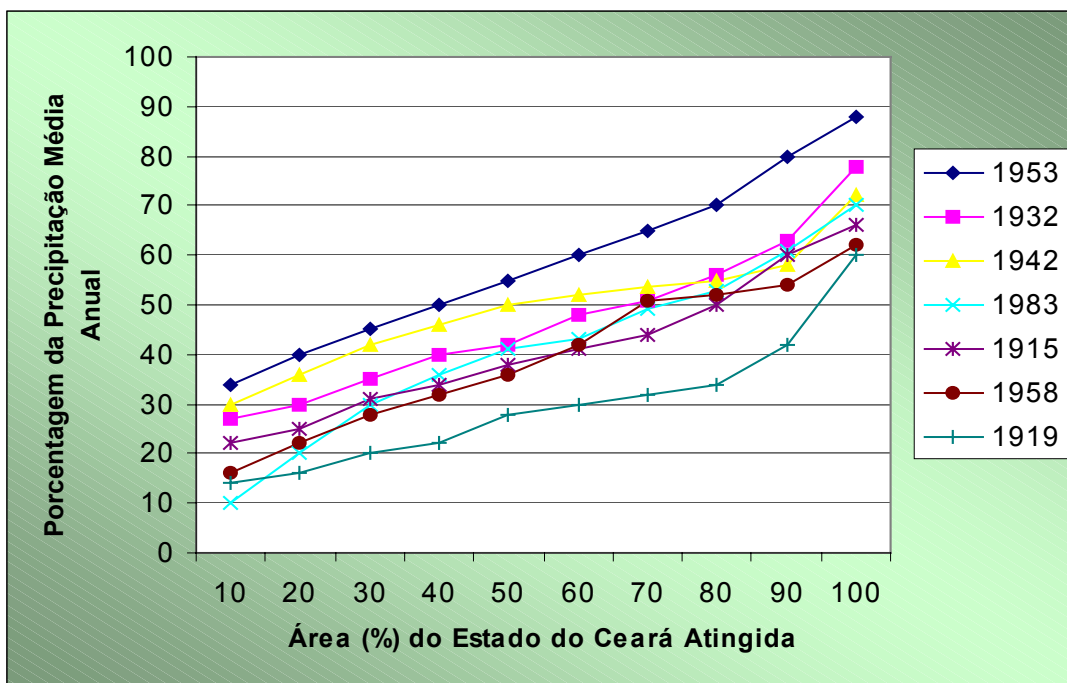


Figura 1 : Distribuição Espacial das Secas Extremas no Estado do Ceará.

FREITAS (1996a) apresentou uma metodologia de análise regional integrada do fenômeno das secas, a qual resumidamente, compõe-se dos seguintes tópicos: (1) definição dos diversos tipos de secas; (2) previsão e monitoramento; (3) gerenciamento dos recursos hídricos; (4) avaliação dos efeitos e (5) planejamento das ações mitigadoras. FREITAS (1996b), bem como FREITAS & BILLIB (1997) demonstraram a viabilidade de utilização de modelos de previsão de secas para o Nordeste do Brasil: modelos estatístico-probabilísticos e modelos neuro-fuzzy. Neste artigo, dar-se-á ênfase ao monitoramento meteorológico, em especial, à análise de diversos índices, os quais ao serem implementados em um Sistema de Suporte à Decisão, auxiliam no acompanhamento dos parâmetros característicos dos períodos de secas.

No Nordeste Brasileiro a previsão e o monitoramento de períodos de secas são particularmente úteis devido aos seguintes aspectos: (1) a existência de inúmeros projetos de irrigação implantados e a serem implantados ao longo dos principais rios; (2) o abastecimento d'água das grandes cidades é, em sua maioria, dependente direto do escoamento dos rios, ou indiretamente do volume acumulado nas barragens; (3) a maioria das culturas agrícolas dependem exclusivamente da regularidade das chuvas e (4) a possibilidade de uso de água subterrânea é pequena quando comparada ao da água superficial.

2. ÍNDICES DE SECAS METEOROLÓGICAS

O monitoramento de períodos de secas pode ser efetuado através do emprego de índices. Com base neles, pode-se desenvolver um sistema de acompanhamento das características dos períodos de seca, assim como as diferenciadas medidas a serem efetivadas de acordo com os valores atingidos por tais parâmetros. O método mais conhecido e largamente empregado para a investigação da distribuição espacial e temporal dos períodos de secas é o da determinação de certo índice de seca. Este pode, em geral, ser definido como um valor, que representa o efeito acumulado ocasionado por um longo período de déficit de umidade.

Em decorrência da dificuldade de se ter uma definição única para o fenômeno da seca, a determinação de um índice de seca é também problemática. A severidade de um período de seca é normalmente expressa como uma anomalia de um ou de vários parâmetros climáticos, de seu valor médio. O mais usual dos índices de seca é expressar o total precipitado em determinada região em termos de percentagem do valor médio dos dados conhecidos (LI & MAKARAU, 1994). Dessa forma, pode-se comparar o valor atual com o valor médio da série histórica, em termos semanal, mensal, semestral ou anual. Um ponto crucial no emprego de um índice como esse, bem como de qualquer outro, reside na escolha do patamar a ser estabelecido para a definição de um período de seca. Esse patamar é, de modo geral, escolhido arbitrariamente. Em um estudo no Estado de Illinois, nos Estados Unidos, CHANGNON (1980) chegou às seguintes conclusões: para um patamar de 75% da precipitação média anual já havia problemas de abastecimento d'água em algumas cidades, bem como problemas nas atividades agrícolas; para um patamar de 60% havia quebra das atividades agrícolas do Estado e problemas de abastecimento d'água em muitas cidades; quando a precipitação caía para um valor de

50% da precipitação média anual havia problemas na atividade industrial e no abastecimento d'água de quase todos os municípios.

Para o Nordeste do Brasil, GHOSE (1971) analisou a frequência dos períodos de cheias e secas para a bacia do rio Itapicuru (Estado da Bahia) com base nos critérios: o ano seria classificado como úmido, se durante o 'período das chuvas' na região (novembro a abril) o total precipitado fosse maior do que a média a longo prazo mais 50% deste valor; um ano seria tido como seco, caso a precipitação estivesse abaixo da média menos 50% da mesma; caso, porém, a precipitação encontrasse entre esses limites, o ano seria classificado como normal. Essa é, entretanto, uma escolha um tanto arbitrária. Tanto é que, num total de 52 anos, somente os anos 1913 e 1959 foram considerados secos e os anos 1914, 1924 e 1964 foram classificados como anos úmidos. Todos os demais foram classificados como anos normais.

A escolha do patamar para a separação entre anos secos e úmidos não deve ser, portanto, arbitrária, mas sim escolhido com base no conhecimento climático da região, na análise das características dos períodos históricos de secas e das correspondentes conseqüências à população e meio ambiente atingidos. Esses efeitos dependem, por sua vez, da infra-estrutura hídrica existente, isto é, variam com o tempo.

No monitoramento de secas são usados, normalmente, índices como medida da severidade de um período seco. De acordo com sua formulação os índices podem ser classificados em meteorológicos, hidrológicos e agrícolas. Embora a precipitação seja um fator importante, o clima de uma determinada região não deve ser classificado em seco ou úmido com base apenas nas séries de precipitação. A evapotranspiração desempenha, particularmente em regiões semi-áridas como o Nordeste do Brasil, um papel fundamental. Além disso, precipitação e evapotranspiração provêm de causas meteorológicas distintas. É mister observar se a precipitação é maior ou menor do que a evapotranspiração, dentre vários outros aspectos. A seguir, diversos índices são investigados com o intuito de determinar a possibilidade de suas aplicações práticas em um sistema de monitoramento de secas no Nordeste do Brasil.

TRANSEAU (1905) determinou um índice para a precipitação efetiva com base em dados de 150 postos pluviométricos dos Estados Unidos, o qual expressava a relação entre a precipitação e a evaporação anuais. À guisa de simplificação, substituiu-se posteriormente a componente da evaporação pela da temperatura. Um exemplo disso é o denominado **Lang Rain Factor (LRF)**. Esse índice corresponde à relação entre a precipitação e a temperatura médias anuais. Um outro índice, conhecido por **Martonne Index of Aridity (MIA)**, nada mais é do que uma pequena alteração do anterior, dado pela equação a seguir: $MIA = N / (T + 10)$. A posteriori, percebeu-se que a evapotranspiração, ao invés da evaporação, era um parâmetro decisivo na classificação do clima de uma região. Um índice por demais conhecido, que já leva em consideração a evapotranspiração é o denominado **Aridity Index (AI)** ou índice de aridez, formulado por THORNTHWAITE (1948), isto é, uma medida do déficit de água como porcentagem da evapotranspiração potencial anual. Conforme o desvio em relação à condição normal, pode-se enquadrar o AI em diversas classes.

2.1 Rainfall Anomaly Index (RAI)

Um primeiro índice, contudo, que pudesse ser incorporado a um sistema de monitoramento é o chamado **Rainfall Anomaly Index (RAI)**. Para tornar o desvio da precipitação em relação à condição normal de diversas regiões passíveis de comparação ROOY (1965) apresentou o índice a seguir:

$$RAI = 3 \cdot \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right], \quad \text{para anomalias positivas} \quad (1)$$

$$RAI = -3 \cdot \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right], \quad \text{para anomalias negativas} \quad (2)$$

sendo:

N = precipitação mensal atual;

\bar{N} = precipitação média mensal da série histórica;

\bar{M} = média das dez maiores precipitações mensais da série histórica;

\bar{X} = média das dez menores precipitações mensais da série histórica.

A figura 2 apresenta, a título de exemplificação, a aplicação desse índice para três postos pluviométricos do Estado do Ceará. É fácil reconhecer os anos 1915 e 1919 como anos secos. Em 1915, porém, o posto de Mombaça apresenta-se mais seco em relação aos outros dois postos. No ano de 1919, entretanto, todos os três postos mostram-se bastante secos, ratificando o observado na figura 1. Com base nesse índice é possível fazer uma comparação das condições atuais de precipitação em relação aos valores históricos. Ele serve ainda para avaliar a distribuição espacial de uma seca, consoante sua intensidade.

2.2 Bhalme & Mooley Drought Index (BMDI)

PALMER (1965) apresentou um procedimento de balanço de água, que ficou depois conhecido como **Palmer Drought Severity Index (PDSI)**, para a região semi-árida do oeste do Estado do Kansas e para a região sub-úmida de Iowa, nos Estados Unidos. O PDSI é calculado tendo como base os dados de evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial eventual etc. e expressa uma medida para a diferença acumulada entre a precipitação normal e a precipitação necessária à evapotranspiração. Essa análise é feita em nível semanal ou mensal. Resulta desse procedimento um índice que varia de -4 (secas extremas), passando por zero (condições normais) a +4 (períodos muito úmidos). Esse índice é não apenas uma função da diferença acumulada entre as condições atuais e a denominada evapotranspiração CAFEC (Climatically Appropriate For Existing Conditions), como também de outros componentes do balanço hídrico. A evaporação é estimada pelo método de THORNTHWAITE. Vazão, infiltração e nível do lençol freático são estimados por meio de um modelo de balanço da água no solo (McMAHON, 1993). Mapas dos Estados Unidos contendo os valores desse índice são publicados semanalmente no 'Weekly Weather and Crop Bulletin'.

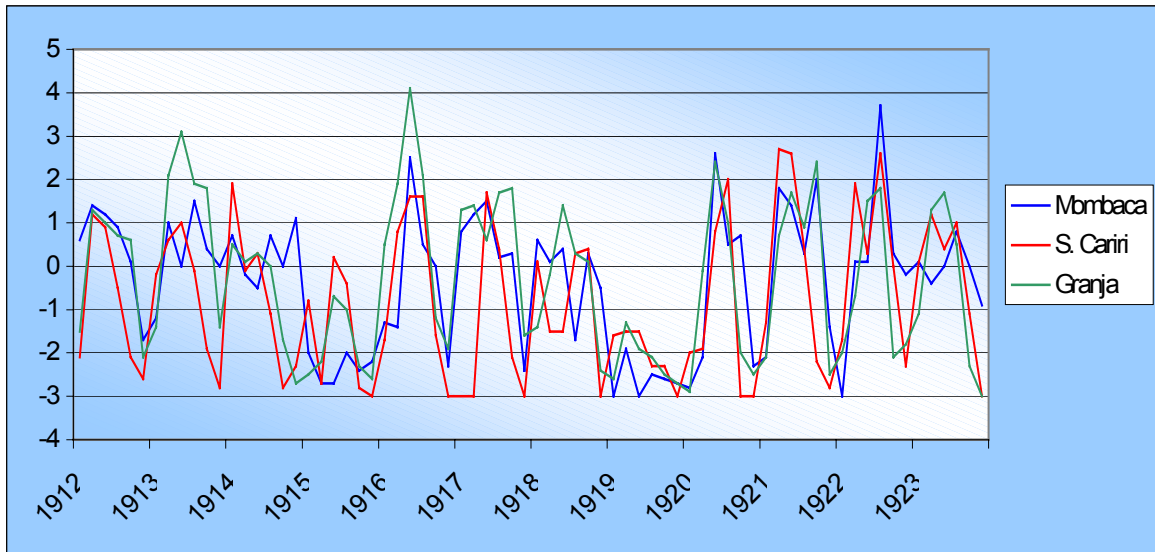


Figura 2: Rainfall Anomaly Index (RAI) para três postos pluviométricos do Estado do Ceará.

Diversos autores (HAVENS, 1969; STEILA, 1971; ALLEY, 1984 e 1985; GUTTMAN, 1991) demonstraram que o PDSI não era um bom indicador das condições de umidade, particularmente, nos períodos secos. Uma outra desvantagem do PDSI é que a regularização da vazão superficial não é considerada. Além disso, HUTCHINSON et al. (1992) demonstraram que o PDSI não apresentava aparentemente nenhuma vantagem em relação ao uso da técnica dos quantis na avaliação do início e d severidade dos períodos de secas. Na aplicação do PDSI em New South Wales, na Austrália, McDONALD (1989) apresentou uma gama de considerações, a saber: (1) seriam necessários pelo menos cerca de 30 anos de dados diários de precipitação e de temperatura para se estimar a capacidade de umidade do solo; (2) esse método calcula a frequência e a severidade, tanto dos períodos úmidos quanto dos períodos secos; (3) esse índice pode ser usado em bacias hidrográficas de pequeno porte; e (4) esse método, originalmente desenvolvido para os estados do meio-oeste americano, apresentam diversas constantes empíricas, que também se mostraram adequadas para New South Wales. Devido aos aspectos citados acima e à escassez de dados de infiltração, evapotranspiração, etc. não foi possível aplicar ao Ceará esse índice diretamente.

Em um estudo nas regiões tropicais da Índia, BHALME & MOOLEY (1979, 1980) também evidenciaram esses mesmos problemas. Eles, então, propuseram uma modificação do índice original, de modo a incorporar as condições climáticas vigentes na Índia. Tal índice ficou conhecido por **Bhalme & Mooley Drought Index (BMDI)**. Apresenta-se aqui a aplicação desse novo índice para o Estado do Ceará, conforme o algoritmo descrito a seguir:

1) Cálculo do índice de umidade $H_{i,j}$ para cada posto de precipitação:

$$H_{i,j} = \frac{100(N_{i,j} - \bar{N}_j)}{S_j} \quad (3)$$

$N_{i,j}$ = precipitação atual do mês j, no ano i;
 \bar{N}_j = precipitação média do mês j;
 S_j = desvio padrão da precipitação do mês j;

2) Cômputo da média dos valores mais elevados do índice de umidade acumulado (negativos) para o período chuvoso (janeiro a junho) para todos os postos da região. Essa medida das anomalias de umidade regional evidencia uma relação numérica entre os períodos de secas extremas para as diversas partes da região estudada.

3) As condições mais extremas mensais, acumuladas, em valores negativos, para o índice de umidade pode ser estimado por meio do método dos mínimos quadrados, dado por:

$$\sum_{t=1}^k H_t = a + bk \quad (4)$$

onde

H_t = índice de umidade acumulado durante um período de t meses;
 k = número de meses do período;
 a, b = constantes.

Para trinta postos, especialmente bem distribuídos, pesquisados do Estado do Ceará (figura 3) foram encontrados os valores de $a=58.62$ e $b=80.90$. Esta equação, que apresenta um coeficiente de correlação de $r=0.994464$ é representada pela reta da figura 4. As ordenadas entre a linha de regressão e o canto superior da figura podem ser divididos em tamanhos iguais. Desse modo podem ser criadas três linhas, dando origem a quatro regiões de categorias de secas (catastrófica [-4], extrema [-3], moderada [-2] e suave [-1]). Analogamente, têm-se os patamares [+4], [+3], [+2] e [+1] para os períodos de umidade catastrófica, extrema, moderada e suave.

4) Essas famílias de retas são descritas por:

$$I_k = \frac{\sum_{t=1}^k H_t}{[0.25(a + bk)]} \quad (5)$$

onde

I_k = intensidade da seca no k-ésimo mês.

Introduzindo os valores de a e b, encontrados para o Estado do Ceará na equação 5 teremos para $k=1$, o seguinte:

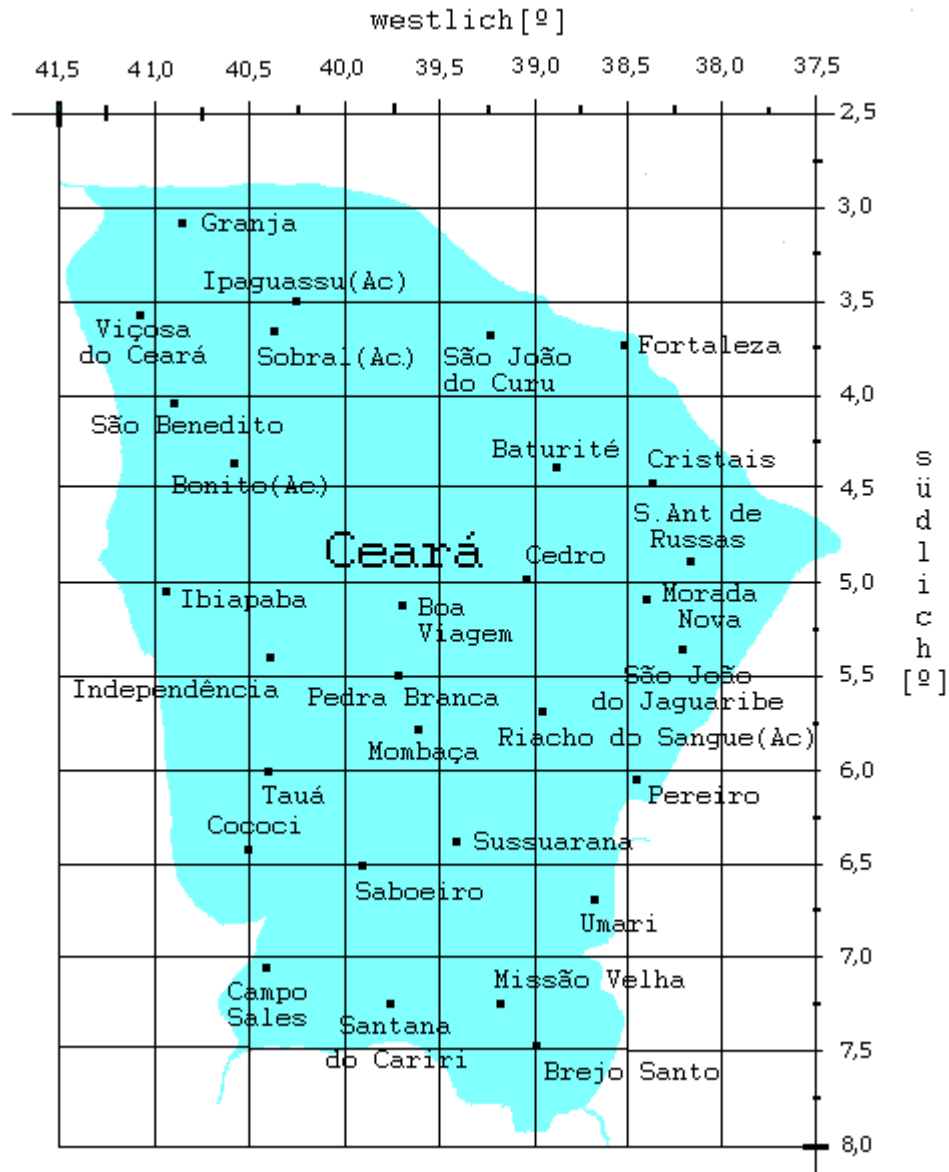


Figura 3: Localização dos Postos Pluviométricos Utilizados (Estado do Ceará).

$$I_1 = \frac{H_1}{(58.62 + 80.90)} \quad (6)$$

Para o mês inicial é válido a igualdade $I_o = 0$:

$$I_1 - I_o = \Delta I_1 = \frac{H_1}{139.52} \quad (7)$$

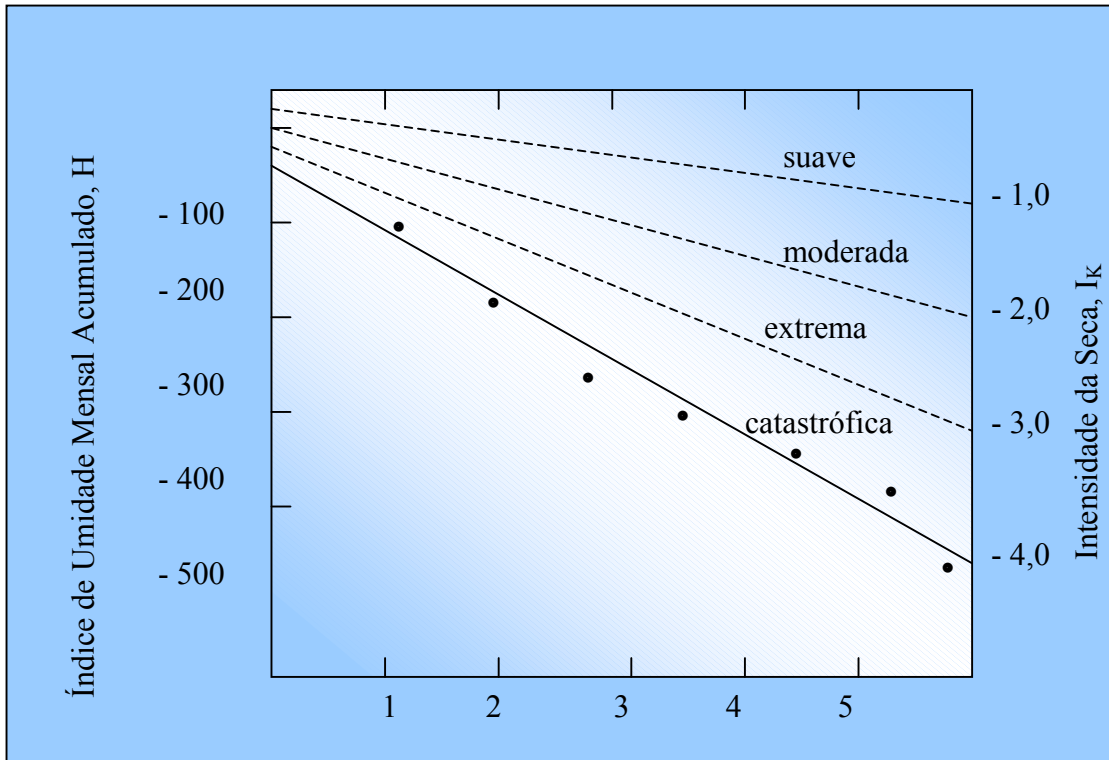


Figura 4: Valores de BMDI para o Estado do Ceará

São necessários valores negativos de H em meses consecutivos, de forma a se estabelecer períodos secos. A taxa segundo a qual os índices de umidades devem ser aumentados de modo a se ter um valor constante para I está diretamente associada ao valor do próprio I. Significa que, para todos os meses, exceto o mês inicial, um termo adicional deve ser acrescido à equação 7:

$$\Delta I_k = (H_k / 139.52) + C \cdot I_{k-1} \quad (8)$$

$$\Delta I_k = I_k - I_{k-1} \quad (9)$$

A constante C pode ser calculada a partir de dois meses consecutivos para um determinado valor de I. Caso na equação 6, por exemplo, for feito k=4 e I₄ = -1, resulta-se no seguinte resultado:

$$\sum_{t=1}^4 H_t = -382.22 \quad (10)$$

Da mesma forma, tem-se para k=3 e I₃ = -1

$$\sum_{t=1}^3 H_t = -301.32 \quad (11)$$

De modo que:

$$H_4 = \sum_{t=1}^4 H_t - \sum_{t=1}^3 H_t = -80.90 \quad (12)$$

Da equação 8 resulta um valor de $C = -0.58$.

Devido ao fato de esse índice apresentar tanto valores positivos quanto negativos ele pode ser utilizado na avaliação de períodos de secas e de cheias. O valor médio para o 1º semestre do ano, do posto pluviométrico de Mombaça (1911-83) é mostrado na figura 5. O valor atual, mensal, acumulado do BMDI durante o período de crescimento das culturas ou do período chuvoso (janeiro a junho) pode ser, então, comparado com os valores históricos da região, de modo a se ter um controle permanente da condição de umidade.

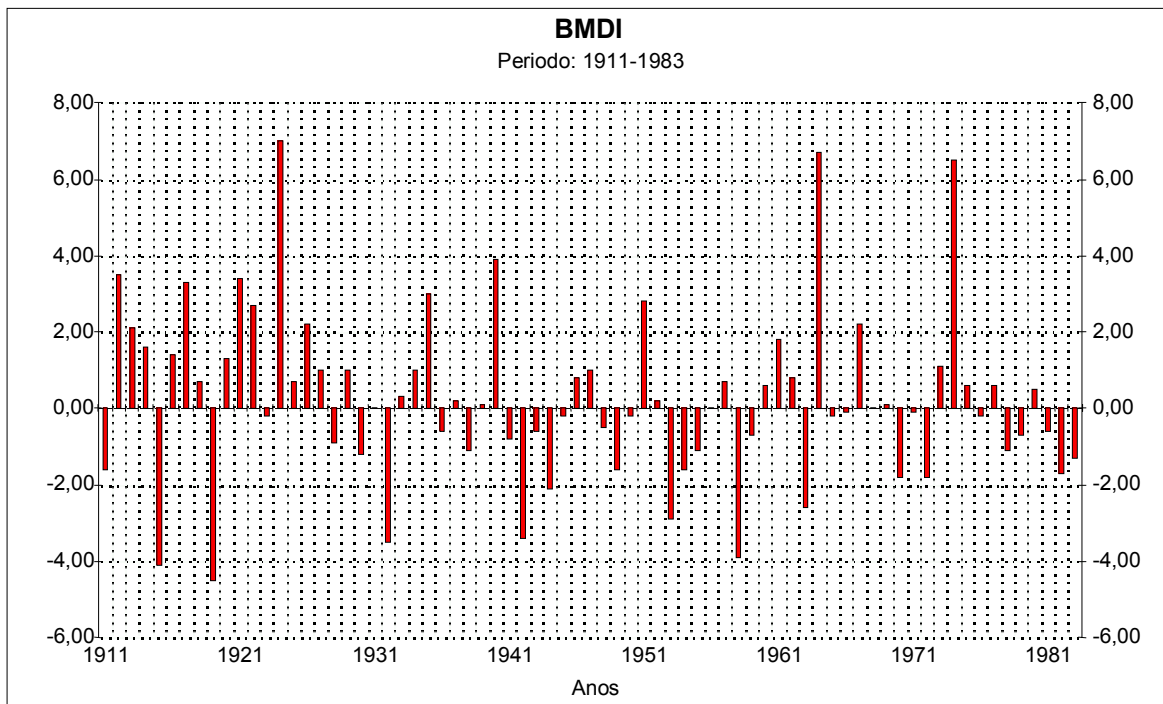


Figura 5: Valores do BMDI para o Posto de Mombaça (Estado do Ceará)

2.3 Herbst Severity Index (HSI)

É fácil verificar, que os períodos de secas históricas no Nordeste do Brasil estendem-se por uma vasta região e duram, via de regra, vários anos. Necessário faz-se, portanto, um diagnóstico completo e preciso dos períodos históricos de secas, de forma a se ter uma estimativa tanto da frequência de ocorrência desses eventos, quanto de seus

parâmetros característicos (duração, severidade e magnitude). Particularmente, para a análise de secas históricas HERBST et al. (1966) desenvolveram um índice, posteriormente, conhecido como **Herbst Severity Index (HSI)**. Para cada posto são computados os parâmetros característicos dos períodos de secas. A aplicação desse método em um sistema de monitoramento realiza-se através da comparação dos valores atuais de determinada característica com os correspondentes valores históricos. O HSI baseia-se na análise da série de precipitação mensal, de modo que a duração e a severidade, bem como o mês do início e fim de um período seco possam ser calculados. Uma premissa básica desse método é que a agricultura praticada em uma determinada região é, de certa maneira, adaptada às condições climáticas vingentes na área. Embora o total precipitado em mês varie de ano a ano, supõe-se que, as culturas típicas sejam ajustadas à variabilidade média da chuva. Por isso, somente os meses, nos quais o déficit de precipitação permanece acima do déficit médio daquele mês, são classificados como meses secos. O cálculo desse índice pode ser melhor ilustrado por meio do algoritmo apresentado a seguir:

1) O cálculo inicia-se com a subtração da precipitação média de um dado mês (por exemplo, janeiro) da precipitação atual do mês, de modo que resulte em um déficit ou excesso. Este valor é, então, multiplicado por um peso correspondente ao mês seguinte (por exemplo, fevereiro) e o produto resultante, o qual será positivo ou negativo, é adicionado a precipitação atual do mês em questão. Essa soma final é denominada precipitação efetiva, ou seja:

$$NEF_{i,j} = (N_{i,j-1} - \bar{N}_{j-1}) \cdot W_j + N_{i,j} \quad (13)$$

$NEF_{i,j}$ = precipitação efetiva no ano i, mês j;

$N_{i,j-1}$ = precipitação no ano i, mês j-1;

\bar{N}_{j-1} = precipitação média do mês j-1;

W_j = peso do mês j;

$N_{i,j}$ = precipitação no ano i, mês j.

O peso pode ser expresso através da seguinte expressão:

$$W_j = 0.1 \cdot \left(1 + \frac{N_j}{\frac{1}{12} \cdot MJN} \right) \quad (14)$$

sendo

MJN = precipitação média anual.

Essa formulação empírica baseia-se no fato de que o efeito de transferência ou retardo, em meses importantes do ponto de vista agrícola são meses com elevado nível pluviométrico comparado aos meses normalmente secos.

2) A determinação do déficit mesal médio para cada mês é estabelecido através da diferença entre a precipitação efetiva e a precipitação média mensal.

3) Para a determinação do início de uma seca foi introduzido um teste o qual faz uma comparação entre a soma de todas as diferenças negativas com os doze valores determinados por meio de interpolação entre a precipitação mensal máxima média (MMMN) da série e do déficit anual médio (MJD). O cálculo desses doze volumes pode ser expresso através da taxa de crescimento x , dada por:

$$x = \frac{MJD - MMMN}{11} \quad (15)$$

O primeiro dos doze valores corresponde exatamente ao valor de MMMN. O segundo valor resulta da soma de MMMN com a taxa de crescimento x . O terceiro corresponde a soma de MMMN com duas vezes o valor x , e assim por diante. O último valor corresponde exatamente à MJD.

4) O início potencial de uma seca é confirmado caso em um determinado mês ocorra um déficit (diferença entre a precipitação média e a atual). Após a confirmação de um início potencial de seca é então iniciado, para os próximos doze meses de precipitação da série, um teste seqüencial por meio da taxa de crescimento x , para se estabelecer um início real de seca.

5) Após a determinação de um início real de seca, inicia-se, imediatamente, o teste das condições relativas a um fim potencial deste período seco: caso um ou mais meses, depois de um mês inicial com diferenças positivas, apresentem diferenças positivas, então caracteriza-se um fim potencial de uma seca. Este fim potencial é comprovado por meio de dois outros testes: o primeiro teste é empregado para se certificar se essa precipitação acima da média representa apenas uma interrupção do período seco ou se realmente corresponde a um final de seca. Este teste inicia-se pelo cálculo da soma de todas as diferenças algébricas do mês inicial até o n -ésimo mês. Caso essa soma torne-se negativa, esse período seco é visto apenas como uma pequena interrupção da precipitação. Esse teste é repetido para o próximo mês com diferença positiva que segue o mês em questão. O segundo teste engloba na realidade dez testes sucessivos. De início é computada a soma dos três primeiros meses testados. Depois, compara-se essa soma com a soma dos três maiores valores da série de precipitação mensal. Caso a primeira soma seja a maior, então é constatado um fim de seca. Caso contrário, compara-se a soma dos quatro primeiros meses com a soma dos quatro maiores valores de precipitação mensal, e assim por diante. Caso o fim da seca seja comprovado, inicia-se o teste para a determinação de início de um novo período de seca, a partir do mês seguinte ao fim da seca.

6) Nesse item são calculados os parâmetros característicos dos períodos de seca, quais sejam: a duração (D) em meses, o déficit acumulado ou a severidade e o déficit mensal médio, também denominado de magnitude (M).

Na tabela 1 é apresentado, à guisa de exemplificação, o resultado do cálculo desse índice para o posto de Mombaça, no Estado do Ceará. A aplicação desse método a todos

os postos de uma determinada bacia dá uma idéia de distribuição espacial dos parâmetros característicos das secas históricas ocorridas nessa bacia.

O conceito estatístico de decil foi aplicado em séries de precipitação por GIBBS & MAHER (1967) na investigação e classificação de períodos secos na Austrália. Totais mensais e anuais de precipitação podem ser classificados em ordem decrescente e divididos em dez classes (decil) com auxílio de uma distribuição de probabilidade acumulada. O primeiro decil representa o total precipitado dos 10% menores. À segunda classe corresponde a precipitação correspondente ao intervalo 10-20%, e assim por diante. À décima classe pertencem os 10% maiores valores de precipitação. Essa classificação é a chave do sistema de alerta de seca australiano. Uma seca é, por exemplo, denominada extrema quando o total precipitado da quinta classe não é ultrapassado durante um período de três ou mais meses.

Tabela 1: Aplicação do HSI ao posto de Mombaça (3810574), Estado do Ceará.

Seca	Período	Duração (mês)	Índice de magnitude	Índice de severidade
01	09.1914 até 10.1916	26	1.636	42.548
02	01.1919 até 06.1919	06	0.238	1.427
03	12.1931 até 06.1932	07	0.285	1.996
04	04.1941 até 11.1943	32	0.676	21.622
05	02.1944 até 01.1945	12	1.311	15.737
06	01.1951 até 02.1952	14	0.455	6.375
07	01.1958 até 06.1958	06	0.221	1.327
08	02.1963 até 12.1963	11	0.470	5.174
09	05.1976 até 03.1977	11	0.501	5.511
10	07.1977 até 04.1978	10	0.599	5.989
11	04.1981 até 10.1982	19	0.627	11.905

Pode-se adotar, ao invés do decil, os quantis 0.15 e 0.33 para a classificação em anos muitos secos e secos, respectivamente, e os quantis 0.67 e 0.85 para a classificação em anos úmidos e muito úmidos. Caso a precipitação anual encontre-se entre os quantis 0.33 e 0.67 diz-se que o ano é normal. Pode-se ainda transformar essas classes em séries binárias por meio da técnica da filtragem binária (XAVIER & XAVIER, 1987). Um exemplo de aplicação desses quantis, para três categorias (seco, normal e úmido) pode ser visto em FREITAS (1996a e b; 1997a e b).

2.4 Lamb Rainfall Departure Index (LRDI):

O cálculo desse índice (LAMB et al., 1986) consiste de um procedimento de normalização, através do qual os desvios médios da precipitação de diversos postos de uma dada região são agrupados na determinação de um índice único, dado por:

$$LRDI = \frac{1}{t_j} \cdot \sum_{i=1}^{t_i} \frac{N_{i,j} - \bar{N}_i}{S_i} \quad (16)$$

- $N_{i,j}$ = precipitação no ano j do posto i;
 \bar{N}_i = precipitação média anual do posto i;
 S_i = desvio padrão da precipitação anual do posto i;
 t_j = número de postos com precipitação no ano j.

Uma vantagem capital desse método é que todas as séries de precipitação, as quais normalmente apresentam muitas falhas, podem ser assim mesmas usadas na determinação de um índice regional. A figura 6 apresenta o resultado da precipitação dessa metodologia aos 30 postos pluviométricos analisados, no período de 1911-88, no Estado do Ceará.

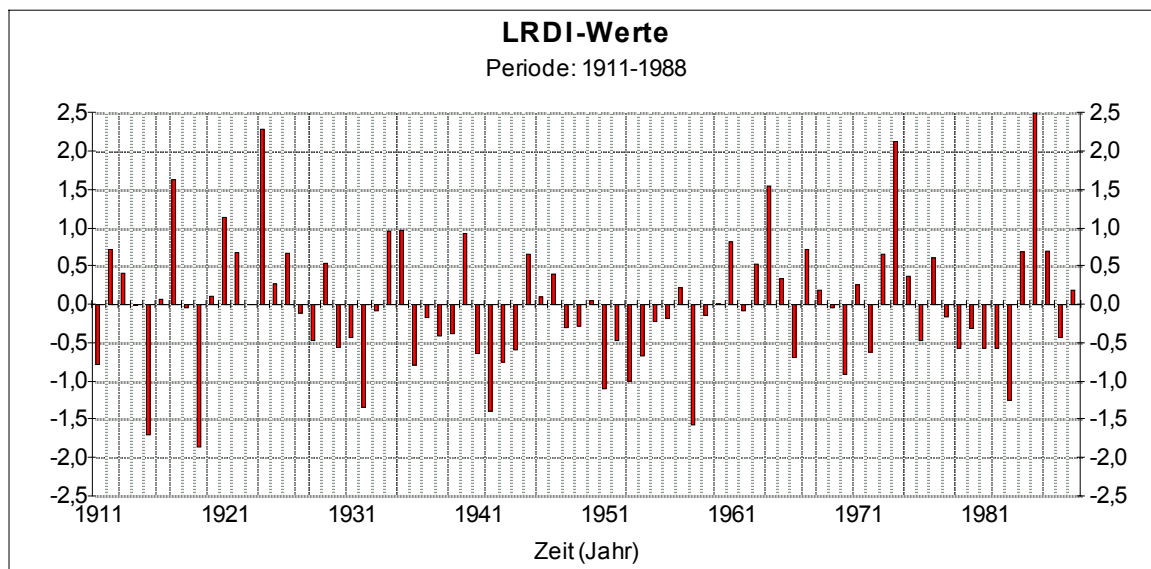


Figura 6: Valores de LRDI para o estado do Ceará (1º semestre: janeiro-junho).

3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diversos índices meteorológicos - RAI (Rainfall Anomaly Index), BMDI (Bhalme & Mooley Drought Index), HSI (Herbst Severity Index) e LRDI (Lamb Rainfall Departure Index) - foram modificados e incorporados a um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para o acompanhamento das características básicas dos períodos de seca, quais sejam, duração, severidade e intensidade, de modo que diferenciadas ações mitigadoras pudessem ser de fato implementadas, de acordo com os valores atingidos por esses parâmetros. Uma vantagem crucial no uso desses índices é o acompanhamento quase simultâneo do grau de severidade e duração dos períodos secos, permitindo, que se tomem medidas efetivas e em tempo hábil, objetivando minorar os impactos ocasionados por uma

seca. Recomenda-se a aplicação dessa metodologia a todos os postos pluviométricos do Estado do Ceará resultando, com isso, numa melhor distribuição espacial desses valores.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEY, W.M., 1984: The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 1100-1109.
- ALLEY, W.M., 1985: The Palmer Drought Severity Index as a Measure of Hydrologic Drought, *Water Resources Bulletin*, 21(1), 105-114.
- BHALME, H.N., D.A. MOOLEY, 1979: On the Performance of Modified Palmer Index, *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, Ser. B, 27, 281-295.
- BHALME, H.N., D.A. MOOLEY, 1980: Large-Scale Drought/Floods and Monsoon Circulation, *Monthly Weather Review*, 108, 1197-1211.
- BRYANT, E., 1991: *Natural Hazards*, Cambridge University Press, 294 pag.
- CHAGNON, S.A., 1980: Removing the Confusion over Droughts and Floods: The Interface between Scientists and Policy Makers, *Water International*, 10-18.
- FREITAS, M.A.S., 1996a: Aspectos a Serem Considerados Quando de uma Análise Regional Integrada de Secas, *Revista Tecnologia - UNIFOR*, vol. 17, 9-17.
- FREITAS, M.A.S., 1996b: Previsão de Secas por Meio de Métodos Estatísticos e Redes Neurais e Análise de Suas Características Através de Diversos Índices (Ceará - Nordeste do Brasil), IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campos do Jordão, 6 a 13 de novembro de 1996.
- FREITAS, M.A.S., 1997a: Regionale Dürreanalyse anhand statistischer Methoden und Neuro-Fuzzy-Systemen mit Anwendung für Nordost-Brasilien, *Doctoral Dissertation*, University Hannover, Germany.
- FREITAS, M. A.S., 1997b: Análise Estatística da Relação entre o Fenômeno do El-Niño e a Seca no Estado do Ceará, III Encontro de Iniciação à Pesquisa, de 15 a 17 de setembro de 1997, Resumos, Universidade de Fortaleza - UNIFOR.
- FREITAS, M.A.S. & M.H.A. BILLIB, 1997: Drought Prediction and Characteristic Analysis in Semi-Arid Ceará / Northeast Brazil, Symposium "Sustainability of Water Resources Under Increasing Uncertainty", IAHS Publ. No. 240, 105-112, Rabat, Marrocos.
- GHOSE, S.K., 1971: *Hyrometeorological Studies in Northeastern Brazil*, Report No 2, SUDENE/DEMETS/WMO.
- GIBBS, W.J., J.V. MAHER, 1967: Rainfall Deciles as Drought Indicators, *Commonwealth Bureau of Meteorology Bulletin*, 48, Melbourne.
- GUTTMAN, N.B., 1991: A Sensitivity Analysis of the Palmer Hydrologic Drought Index, *Water Resources Bulletin*, 27(5), 797-807.
- GUTTMAN, N.B., J.R.WALLIS, & J.R.M.HOSKING, 1992: Spatial Comparability of the Palmer Drought Severity Index, *Water Resources Bulletin*, 28(6), 1111-1119.
- HAVENS, A. V., 1969: *Economic Impact of Drought on Water Systems in Passaic River Basin*, n. J., New Brunswick, New Jersey Agricultural Experiment Station.
- HERBST, P.H.; D.B. BREDEKAMP & H.M.G. BARKER, 1966: A Technique for the Evaluation of Drought from Rainfall Data, *Journal of Hydrology*, 4, 264-272.
- HUTCHINSON, M.F.; R. MacARTHUR; D.I. SMITH, 1992: Short Summary of Analysis of Climatic Drought, In: *Bureau of Resource Sciences, Drought and Decision Support*.

- LAMB, P.J., R. A. PEPPLER & S. HASTENRATH, 1986: Interannual Variability in the Atlantic, *Nature*, 322, 238-240.
- LI, K., A. MAKARAU, 1994: Drought and Desertification, Reports to the Eleventh Session of the Commission for Climatology, WCASP-28, WMO.
- MCDONALD, N.S., 1989: Decision Making using a Drought Severity Index, Proc. United Nations University Workshop, Need for Climate and Hydrologic Data in Agriculture in Southeast Asia, CSIRO Division of Water Research, Technical Memo 89/5.
- McMAHON, T.A., 1993: Hydrologic Design for Water Use. In: *Handbook of Hydrology*, D. R. Maidment (ed.), McGraw-Hill, Inc.
- PALMER, W.C., 1965: Meteorological Drought, Weather Bureau, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., Research Paper n° 45, 1-58.
- ROOY, M.P. van, 1965: A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space, *Notos*, 14, 43.
- STEILA, D., 1971: Drought Analysis in Four Southern States by a New Index, PhD Diss., Athens, Ga., The University of Georgia.
- THORNTHWAITE, C.W., 1948: Na Approach towards a Rational Classification of Climate, *Geogr. Ver.*, 38, 55-94.
- TRANSEAU, E.N., 1905: Forest Center of Eastern America, *Amer. Naturalist*, 39, 875-889.
- XAVIER, T.M.B.S., A. F.S. XAVIER, 1987: Application of Binary Filtering on the Analysis of the Occurrence of Dry and Wet Periods in Northeast-Brazil, VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 2, 618-629.