

## Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Análise Estatística Regional

Carlos Eduardo de Oliveira Dantas

Serviço Geológico do Brasil, SUREG-RE, Recife/PE. [carlos.dantas@cprm.gov.br](mailto:carlos.dantas@cprm.gov.br)

José Almir Cirilo

Universidade Federal de Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru/PE. [almir.cirilo@gmail.com](mailto:almir.cirilo@gmail.com)

Alfredo Ribeiro Neto e Edilson Raimundo Silva

Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Hidráulica, Recife/PE. [alfredoribeiro@ufpe.br](mailto:alfredoribeiro@ufpe.br); [edilsonrsilva@yahoo.com.br](mailto:edilsonrsilva@yahoo.com.br)

Recebido: 10/03/14 - revisado: 06/05/14 - aceito: 05/06/14

### RESUMO

O artigo tem como objetivo realizar análise regional de frequência, identificar o padrão de ocorrência das inundações mais severas na bacia do rio Una e, a partir desse padrão, estabelecer estratégias e cenários que permitam prever e acompanhar a evolução das inundações. A partir do histórico de precipitações na bacia hidrográfica do rio Una, em Pernambuco, foi feito um estudo de regionalização (com o método do Index-Flood) e classificação das chuvas intensas (com o método Standardized Precipitation Index), buscando definir padrões da distribuição de chuvas que geram as inundações na bacia. Com base nessas abordagens, as informações espaciais são utilizadas em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, juntamente com os dados hidrológicos levantados, na composição de modelo para alerta de cheias e geração de cenários de inundação em cidades da bacia hidrográfica do rio Una. Como resultado, demonstra-se que a determinação de padrões de precipitação explica adequadamente a ocorrência dos principais eventos de cheia, possibilitando a previsão e o acompanhamento das inundações a partir da previsão meteorológica e do monitoramento pluviométrico.

**Palavras Chave:** Previsão de inundações. Análise regional de frequências. Standard precipitation index.

### INTRODUÇÃO

No Brasil, ocorreram 150 registros de desastres no período 1900-2006 conforme dados do OFDA/CRED (2012). Destes eventos registrados, 84% foram computados a partir da década de 1970, demonstrando um aumento considerável de desastres nas últimas décadas. Como consequência, foram contabilizados 8.183 vítimas fatais e um prejuízo de aproximadamente 10 bilhões de dólares. Os tipos de desastres mais frequentes foram as inundações, representadas pelas graduais e bruscas, com 59% dos registros, seguidas pelos deslizamentos (14%).

Neste contexto, é necessário o estabelecimento de medidas preventivas que possam minimizar as consequências destes fenômenos, visando sempre à diminuição do número de pessoas afetadas e vitimadas.

A redução de prejuízos e perdas de vidas decorrentes de eventos extremos de cheias passa pelo desenvolvimento de técnicas que permitam a previsão com antecedência suficiente para a tomada de ações. A previsão é particularmente importante quando a bacia hidrográfica possui rápida resposta aos eventos de precipitação. Bacias com elevadas declividades, a exemplo da bacia do rio Una, possuem tal característica (DANTAS, 2012).

Este artigo tem como objetivo realizar análise regional de frequência das precipitações diárias para diferentes durações, identificar o padrão de ocorrência das

inundações mais severas na bacia do rio Una e, a partir desse padrão, estabelecer estratégias e cenários que permitam prever e acompanhar a evolução das inundações.

Para isso, propõe-se o uso de análise estatística regional (HOSKING; WALLIS, 1997) e a classificação de eventos hidrológicos extremos por meio do *Standardized Precipitation Index* (SPI) (MCKEE et al., 1993; SANTOS et al., 2013).

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### Análise Regional de Frequência pelo Método Index-Flood

O termo index-flood (cheia-índice) foi introduzido por Dalrymple (1960) (citado por NAGHETTINI; PINTO, 2007) dentro de um contexto de regionalização de vazões de cheia. Trata-se de um expediente para adimensionalizar quaisquer dados obtidos em pontos distintos de uma região considerada homogênea, com a finalidade de utilizá-los como um conjunto amostral único. Apesar de fazer referência a cheias, o método e o termo index-flood têm uso consagrado em estudos de regionalização de frequência de diversas variáveis.

Seja o caso de se regionalizar as frequências de uma variável genérica  $X$ , cuja variabilidade espaço-temporal foi amostrada em  $N$  locais, estações ou postos de observação

de uma certa área geográfica. As observações indexadas por  $i$ , tomadas nos postos indexados por  $j$ , formam amostras de tamanho variável  $n_j$  e são denotadas por  $X_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n_j$ ;  $j = 1, \dots, N$ . Se  $F$ ,  $0 < F < 1$ , representa a função acumulada de probabilidades da distribuição de frequências da variável  $X$  no posto  $j$ , então, a função de quantis nesse local é simbolizada por  $X_j(F)$ . A hipótese básica do método index-flood é a de que os postos formam uma região homogênea, ou seja, as distribuições de frequências nos  $N$  pontos são idênticas, a menos de um fator de escala local denominado index-flood ou fator de adimensionalização. Formalmente,

$$X_j(F) = \mu_j x(F), \quad j = 1, \dots, N \quad (1)$$

onde  $\mu_j$  é o index-flood, ou fator de adimensionalização do local  $j$ , e  $x(F)$  representa a curva regional de quantis adimensionais, algumas vezes denominada curva regional de crescimento, comum a todos os postos.

O fator de escala  $\mu_j$  pode ser estimado por qualquer medida de posição ou tendência central da amostra de observações  $\{X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{n_j j}\}$ . Os dados adimensionais padronizados  $x_{ij} = X_{ij}/\mu_j$ ,  $i = 1, \dots, n_j$ ;  $j = 1, \dots, N$  formam a base para se estimar a curva regional de quantis adimensionais  $x(F)$ . A curva de frequência regional pode ser paramétrica, ou seja, obtida pelo ajuste de uma distribuição de probabilidades aos dados adimensionais regionais, ou não paramétrica. A curva regional não paramétrica é definida a partir das curvas empíricas das estações da mesma região homogênea, grafadas em papel de probabilidade.

A metodologia descrita por Hosking e Wallis (1997) baseia-se nos princípios do index-flood, e utiliza os momentos-L, quantidades deduzidas dos momentos ponderados por probabilidades, não só para estimar parâmetros e quantis da distribuição regional de probabilidade, como também para construir estatísticas capazes de tornar menos subjetivas algumas etapas da análise regional de frequência. A seguir, são relacionadas essas etapas:

#### Etapa 1: Análise regional de consistência de dados

Essa etapa refere-se à detecção e eliminação de erros grosseiros e/ou sistemáticos eventualmente existentes nas amostras individuais dos vários postos de observação. Hosking e Wallis (1997) sugerem o uso de uma estatística auxiliar, denominada medida de discordância ( $D_j$ ), a qual fundamenta-se na comparação das características estatísticas do conjunto de postos com as apresentadas pela amostra individual em questão.

#### Etapa 2: Identificação de regiões homogêneas

Uma região homogênea consiste de um agrupamento de postos de observação, cujas curvas de quantis adimensionais podem ser aproximadas por uma única curva regional. Para determinar a correta divisão dos postos em regiões homogêneas, Hosking e Wallis (1997) sugerem o emprego da técnica de análise de clusters. De acordo com essa técnica, os postos são

agrupados em regiões consonantes com a variabilidade espacial de algumas características locais, as quais devem ser selecionadas entre aquelas que supostamente podem ter influência sobre as realizações da variável a ser regionalizada. Depois dos postos terem sido convenientemente agrupados em regiões, utiliza-se a medida de heterogeneidade para testar a correção dos agrupamentos efetuados. Essa medida baseia-se na comparação da variabilidade grupal das características estatísticas dos postos de observação com a variabilidade esperada dessas mesmas características em simulações de 500 regiões homogêneas. As simulações são efetuadas com o método de Monte Carlo para regiões homogêneas com a distribuição Kappa de 4 parâmetros, os quais são estimados com os momentos-L e razões-L regionais calculados com os dados amostrais (HOSKING; WALLIS, 1997).

#### Etapa 3: Seleção da função regional de distribuição de probabilidades

Para a seleção da função regional de distribuição de probabilidades entre diversos modelos candidatos, Hosking e Wallis (1997) sugerem o emprego do teste da medida de aderência. Esse teste é construído de modo a poder comparar algumas características estatísticas regionais com aquelas que se espera obter de uma amostra aleatória simples retirada de uma população, cujas propriedades distributivas são as mesmas do modelo candidato.

#### Etapa 4: Estimativa dos parâmetros e quantis da função regional de distribuição de probabilidades

Depois que os dados dos diferentes postos da área em estudo foram submetidos às etapas descritas nos itens anteriores, tem-se como resultado a partição da área em regiões aproximadamente homogêneas, nas quais as distribuições de frequência de seus indivíduos são idênticas, a menos de um fator de escala local, e podem ser modeladas por uma única distribuição de probabilidades regional, selecionada entre diversas funções candidatas. Essa relação entre as distribuições de frequência dos diversos locais representa a própria justificativa para a análise regional de frequência, permitindo a obtenção de melhores estimativas de parâmetros e quantis a partir da combinação de dados espacialmente disseminados.

### Classificação de eventos hidrológicos extremos através do Standardized Precipitation Index (SPI)

O SPI (*Standardized Precipitation Index*) é um índice de seca desenvolvido por McKee et al. (1993) no intuito de contribuir com a definição objetiva das secas e avançar sobre os estudos de seu comportamento no tempo e no espaço. Seu cálculo é baseado em quantis da distribuição Normal Padrão (distribuição normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um) e nas probabilidades associadas a esses quantis, ou seja, nas probabilidades de superação de um determinado volume precipitado acumulado.

A partir do ajuste da distribuição de probabi-

lidades, a cada elemento da série ajustada é atribuída uma probabilidade de não superação. Cada uma dessas probabilidades de não superação é, por fim, associada ao quantil correspondente da distribuição Normal Padrão. O valor do quantil da distribuição Normal Padrão associado à probabilidade calculada no período de interesse é o valor do SPI para o mês em questão.

Segundo Santos et al. (2011), uma das vantagens do uso do SPI é o fato de ser uma função apenas da probabilidade. Sendo assim, independente da função de distribuição de probabilidade que se utilize, o SPI pode ser adequadamente calculado, adaptando-se a condições locais. Outras vantagens são o fato de o SPI ser capaz de caracterizar tanto períodos secos quanto chuvosos, bem como o fato do índice se adequar a qualquer variável hidrológica. Contudo, o uso desse índice também apresenta limitações. Mishra e Singh (2010) argumentam que a principal delas é a necessidade de longos registros históricos para seu cálculo consistente, o que nem sempre é disponível.

Neste procedimento, diversas classes de SPI podem ser definidas. A classificação da formulação original, apresentada na Tabela 1, considera também situações chuvosas. A Tabela 1 mostra as classes de precipitação, bem como as probabilidades de ocorrência em cada uma delas (Pclas). Também são apresentadas as probabilidades atribuídas à não superação dos limites inferior e superior ( $P_{inf}$  e  $P_{sup}$ ) de cada classe de SPI considerada (SANTOS et al., 2013).

**Tabela 1 - Classes de precipitações e probabilidades associadas**

Classe	SPI		$P_{inf}$	$P_{sup}$	Pclas (%)
Seca Extrema (SE)		$\leq -2$	0	0,0228	2,3
Seca Severa (SS)	-2	-1,5	0,0228	0,0668	4,4
Seca Moderada (SM)	-1,5	-1	0,0668	0,1587	9,2
Seca Leve (SL)	-1	0	0,1587	0,5000	34,1
Chuvoso Leve (CL)	0	1	0,5000	0,8413	34,1
Chuvoso Moderado (CM)	1	1,5	0,8413	0,9332	9,2
Chuvoso Severo (CS)	1,5	2	0,9332	0,9772	4,4
Chuvoso Extremo (CE)	>2		0,9772	1	2,3

Fonte: Santos et al. (2011)

A Tabela 1 foi adaptada para se estabelecer as classes para precipitações diárias acumuladas máximas anuais como apresentado na Tabela 2. A classificação de uma série histórica é realizada a partir da identificação dos limites de precipitações acumuladas máximas anuais de cada classe. Para esta análise, foram utilizadas as precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias, já que o tempo de concentração da bacia até Barreiros, cidade mais a jusante da

área contemplada pelo estudo, é um pouco maior que 5 dias.

**Tabela 2 - Classes de precipitações diárias acumuladas máximas anuais**

Classe de PMDA	SPI		$P(X \leq x)$		Tr (anos)
Chuva Fraca (CF)		0		0,5000	$\leq 2$
Chuva Leve (CL)	0	1	0,5000	0,8413	$2 < T \leq 6,3$
Chuva Moderada (CM)	1	1,5	0,8413	0,9332	$6,3 < T \leq 15$
Chuva Severa (CS)	1,5	2	0,9332	0,9772	$15 < T \leq 44$
Chuva Extrema (CE)	2		0,9772		$> 44$

Fonte: Santos et al. (2011)

O cálculo dos limiares de precipitação, de acordo com Santos et al. (2013) pode ser realizado por meio da análise regional de frequência com momentos-L. Após a definição das regiões homogêneas, é feito o ajuste da distribuição de probabilidades regional e estabelecida a função de quantis adimensionais. Os quantis adimensionais calculados são relativos às probabilidades dos limites superiores apresentadas na Tabela 2. O limiar de precipitação da classe é obtido pela multiplicação do quantil adimensional regional associado à probabilidade superior da classe pelo fator de adimensionalização da série (Equação 1).

## Dados hidrológicos

Foram utilizadas as séries diárias de precipitação de 108 estações, sendo 40 pertencentes à antiga rede da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), 66 pertencentes à Unidade de Monitoramento da Rede Hidrometeorológica de Pernambuco (HIDROMET) do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) e 2 estações pertencentes à Rede Hidrometeorológica Nacional de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e operadas pela CPRM.

Foi feita uma análise preliminar das séries para a detecção de erros grosseiros e uma análise de consistência dentro de uma visão regional, ou seja, comprovar o grau de homogeneidade dos dados disponíveis numa estação com relação às observações registradas em estações vizinhas, através do método de análise de dupla massa aplicado às séries de precipitação anual acumulada.

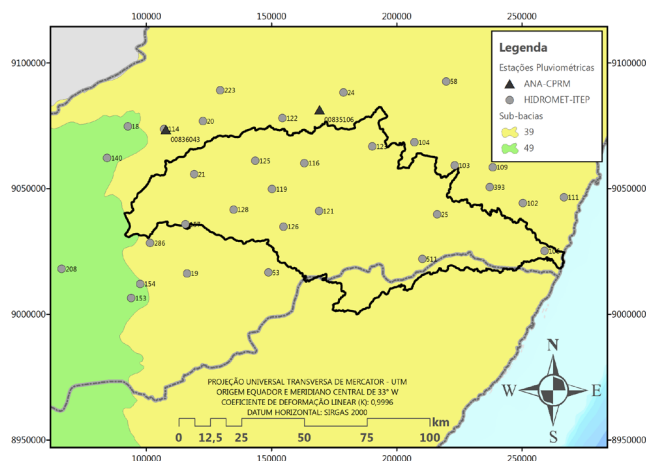
## RESULTADOS

### Análise regional de frequências de precipitações

Para realização do estudo foram utilizadas as séries de alturas diárias de precipitação organizadas por ano civil de 34 estações. Para esta análise, foram utilizadas as precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias de séries mais recentes com no mínimo 30 anos

de dados. A distribuição espacial das estações pluviométricas empregadas no estudo pode ser visualizada na Figura 1.

**Figura 1 - Localização das estações pluviométricas da análise de precipitações**



Primeiramente, foi feita uma análise regional de consistência dos dados que se baseou nas técnicas usuais de análise de consistência e no uso da estatística auxiliar de medida de discordância (D). Os resultados indicaram que as amostras não apresentam características estatísticas muito discrepantes das grupais. A seguir, buscou-se a delimitação das regiões estatisticamente homogêneas, ou seja, aquelas contendo estações que tenham séries oriundas de populações regidas pela mesma distribuição de probabilidades. Inicialmente as regiões homogêneas foram divididas de forma subjetiva, considerando as características de relevo e os processos formadores das precipitações, ou seja, foram consideradas duas regiões homogêneas, de acordo com a divisão de Mesorregiões de Pernambuco na bacia. A seguir, foram grafadas as curvas empíricas adimensionais para verificação das regiões. O fator de adimensionalização utilizado foi a média de cada série. A definição final das regiões foi realizada utilizando as sub-rotinas descritas por Hosking (1991), que permitiram o cálculo da medida de heterogeneidade (H). Assim, os resultados obtidos mostram que se pode considerar apenas uma região homogênea, dado que, segundo o critério de Hosking e Wallis (1993), esta é “aceitavelmente homogênea”. Considerou-se essa região para todas as análises de cada duração considerada.

A seleção da distribuição de frequência regional foi efetuada com as sub-rotinas descritas por Hosking (1991). Esse programa faz o ajuste das distribuições Logística Generalizada (LG), Generalizada de Valores Extremos (GEV), Log-Normal (LN-3P) ou Generalizada Normal, Pearson tipo III (P-III) e Generalizada de Pareto (GP), estimando os seus parâmetros a partir dos momentos-L regionais, além de aplicar o teste de aderência para verificar o ajuste entre a distribuição candidata e os dados regionais.

A definição da distribuição regional foi realizada a partir dos resultados das medidas de aderência (Z), que podem ser vistos na Tabela 3. Assim, a distribuição selecionada foi a GEV para todas as análises de cada duração considerada (1 a 5 dias).

## Classificação SPI dos eventos de precipitação

A distribuição Generalizada de Eventos Extremos foi ajustada para cada duração considerada para cálculo dos quantis adimensionais. A função de probabilidades acumuladas da distribuição GEV é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left(1 - \kappa\left(\frac{x - \xi}{\alpha}\right)\right)^{1/\kappa}\right), & \kappa \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{x - \xi}{\alpha}\right)\right)\right), & \kappa = 0 \end{cases} \quad (2)$$

assim, a função de quantis, a partir da inversa da GEV, é:

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{\kappa}(1 - (-\ln(F))^\kappa), & \kappa \neq 0 \\ \xi - \alpha \ln(-\ln(F)), & \kappa = 0 \end{cases} \quad (3)$$

onde  $\xi$ ,  $\alpha$ ,  $\kappa$  são, respectivamente, os parâmetros de posição, escala e forma da distribuição GEV disponíveis na Tabela 3 (NAGUETTINI; PINTO, 2007)

**Tabela 3 – Estatísticas-L e parâmetros para cada duração**

Duração	H	Z	Posição ( $\xi$ )	Escala ( $\alpha$ )	Forma ( $\kappa$ )
1 dia	0,91	0,52	0,818	0,302	-0,02282
2 dias	-0,83	0,77	0,811	0,306	-0,03961
3 dias	-1,27	-0,28	0,807	0,308	-0,04848
4 dias	-1,71	0,38	0,803	0,311	-0,05519
5 dias	0,17	0,56	0,806	0,313	-0,04114

O cálculo dos quantis absolutos é obtido multiplicando-se o quantil adimensional pelo fator de adimensionalização, ou seja, após a determinação dos parâmetros das distribuições, foram estimados os quantis regionais adimensionais associados aos períodos de retorno apresentados na Tabela 2. Estes valores para cada duração estão apresentados na Tabela 4.

Assim, a partir dos quantis regionais adimensionalizados, é possível calcular os quantis associados a vários períodos de retorno em cada estação através da Equação 1. Dessa forma, é possível estimar os limiares das classes de precipitação de qualquer posto pluviométrico inserido na região homogênea desde que se estime o fator de adimensionalização. Neste estudo adotou-se o critério de se calcular o fator de adimensionalização (index-flood) para postos pluviométricos com no mínimo 15 anos de dados na região homogênea. Assim, foi possível estimar os limiares das classes de precipitação para as 108 estações.

Foram calculados, também, para cada estação pluviométrica, os limites das classes para classificação das precipitações diárias acumuladas máximas anuais para todas as durações consideradas em Chuva Fraca (CF), Chuva Leve (CL), Chuva Moderada (CM), Chuva Severa (CS) e Chuva Extrema (CE). A Figura 2 ilustra um exemplo com a classificação SPI da série



de precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 1 dia de duração da estação Palmares, código 25, da HIDROMET-ITEP, com seus limites dispostos na Tabela 5. E a Figura 3 um exemplo da espacialização da classificação SPI das precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 5 dias de duração que geraram o evento de 2010.

### Cenários de precipitação para alerta

A partir do estudo de classificação SPI das séries de precipitação com a determinação dos limiares das classes de precipitações máximas diárias acumuladas nas durações de análise, foram gerados bancos de dados em formato de entrada

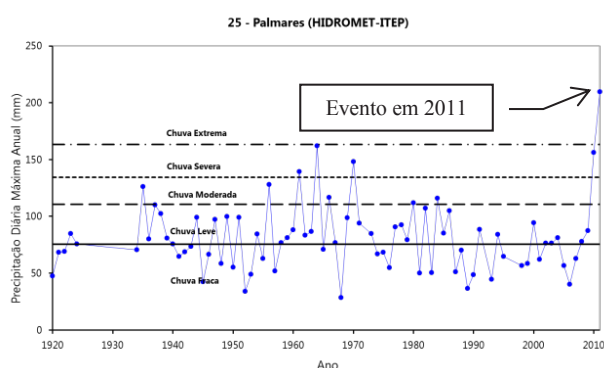
**Tabela 4 - Quantis regionais adimensionalizados na análise de precipitações**

Duração	Tempo de Retorno (anos)							
	~1	2	6,3	15	44	50	100	250 <sup>(*)</sup>
1dia	0,259496	0,929765	1,360293	1,651593	2,009717	2,052712	2,285400	2,597482
2dias	0,254899	0,923971	1,367015	1,672626	2,054759	2,101111	2,353718	2,697152
3dias	0,251077	0,920657	1,371220	1,685200	2,081331	2,129641	2,393898	2,755762
4dias	0,245058	0,917758	1,375941	1,697700	2,106401	2,156448	2,430973	2,808947
5dias	0,238419	0,921779	1,375544	1,689101	2,081777	2,129452	2,389437	2,743341

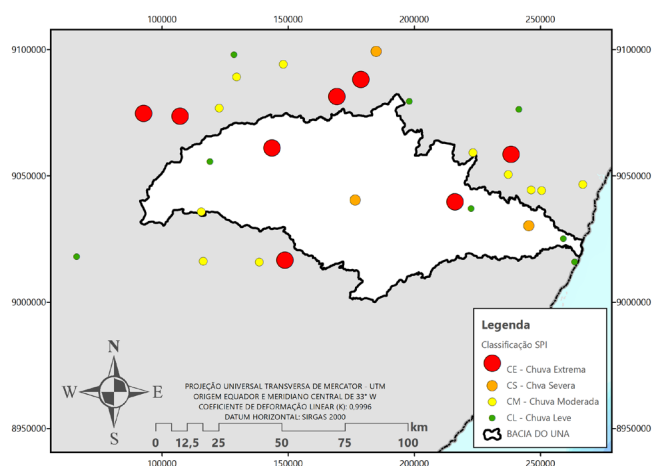
<sup>(\*)</sup>Estimativa de quantil máxima recomendada ( $\sim 3n$ ) para o tamanho da maior série utilizada (n)

**Tabela 5 - Limites das classes para duração de 1 dia da estação Palmares (25)**

	Chuva Fraca (CF)		Chuva Leve (CL)		Chuva Moderada (CM)		Chuva Severa (CS)		Chuva Extrema (CE)	
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
SPI		0,0	0,0	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	
$P(X \leq x)$		0,5000	0,5000	0,8413	0,8413	0,9332	0,9332	0,9772	0,9772	
Tr (anos)		2,0	2,0	6,3	6,3	15,0	15,0	44,0	44,0	
Precipitação (mm)		75,59	75,59	110,59	110,59	134,27	134,27	163,38	163,38	



**Figura 2 - Classificação SPI para duração de 1 dia da série da estação Palmares**



**Figura 3 - Classificação SPI para chuva de duração de 5 dias do evento de 2010**

do modelo hidrológico HEC-HMS com alturas de precipitações horárias através dos limites de classe SPI de acordo com a classificação: Chuva Fraca (CF)/Chuva Leve (CL) com período de retorno de 2 anos associado ao SPI=0; Chuva Moderada (CM) com período de retorno de 9,5 anos associado ao SPI=1,25 que é a média entre seus limites de 1 e 1,5; Chuva Extrema (CE)/Chuva Severa (CS) com período de retorno de 44 anos associado ao SPI=2; finalmente, Chuva Mínima (CZ), nova adaptação do SPI (MCKEE et al., 1993), para atender às situações em que a estação está fora do núcleo de precipitações a ser considerado como fonte principal de geração do escoamento no modelo hidrológico, com período de retorno de ~1 ano associado ao SPI=-3, que, na Tabela 1, é indicativo de Seca Extrema (SE). Assim, estes novos valores foram definidos para representar com um valor único cada classe SPI de chuva, ou seja, CZ, CF/CL, CM e CS/CE, utilizados como valores de tempos de retorno associados a totais de alturas de precipitações máximas diárias nas durações de 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias em cada estação.

Para maior detalhamento da evolução da inundação com o tempo de propagação da onda de cheia fez-se necessário desagregar os totais diários de precipitação em valores horários. A operação se fez através de uma simplificação do processo desenvolvido por Hershfield, em que é determinado um padrão de distribuição temporal da precipitação a partir de séries de eventos que representam estes regimes de precipitação registrados por três PCDs na bacia com dados horários. Para maior representação espacial destes regimes de precipitações, foi feita uma separação das estações pluviométricas de acordo com sua proximidade a cada uma das três PCDs disponíveis, classificando-as assim, nas regiões fisiográficas alto, médio e baixo Una, e identificando as estações que terão o padrão de distribuição temporal definido por cada PCD, como mostra a Figura 4.

A partir da definição do padrão de distribuição temporal para cada estação, foram gerados hietogramas horários para cada duração. Assim, foram associados a cada estação um total de 20 hietogramas horários, ou seja, 5 valores acumulados de precipitação para cada valor de classe SPI, que foi distribuído no tempo, gerando os 20 hietogramas horários.

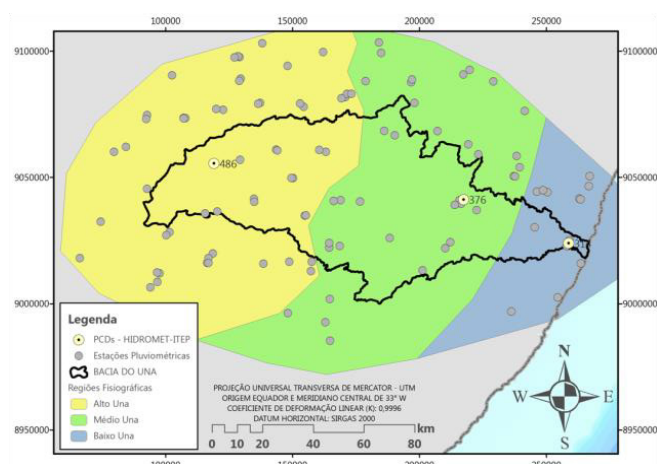


Figura 4 – Classificação da bacia em regiões fisiográficas pelas PCDs existentes

Feita a identificação do núcleo a partir de uma referência de previsão meteorológica ou até dados observados em tempo real a partir de uma rede telemétrica de PCDs, podem-se obter cenários de regime de precipitações na bacia para serem modelados no sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica montado para a previsão e o controle de inundações.

A metodologia foi verificada a partir dos dados observados de precipitações acumuladas das durações consideradas na análise, ou seja, 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias, para os eventos importantes que ocorreram na bacia do Una: em agosto de 2000 configurando o cenário 1, fevereiro de 2004 configurando o cenário 2 e junho de 2010 configurando o cenário 3.

No cenário 1, da Figura 5, o núcleo foi obtido com a geração de uma grade irregular triangular com interpolação TIN a partir da informação acumulada em 5 dias de maiores precipitações em agosto de 2000 nas 108 estações, ou seja, dos volumes pluviométricos acumulados de 31 de julho a 4 de agosto de 2000. Daí, procedeu-se o delineamento da área de maior volume precipitado, sendo determinado, dentro do núcleo o regime de precipitação de classificação SPI de CF/CL para o alto Una, de CM para o médio e de CE/CS para o baixo, ficando CZ definida para as demais estações localizadas fora do núcleo obtido.

Da mesma forma, o cenário 2, na Figura 6, obtido a partir da informação acumulada em 5 dias de maiores precipitações em fevereiro de 2004 nas 108 estações, ou seja, dos volumes pluviométricos acumulados de 4 a 8 de fevereiro de 2004, definindo CF/CL para o alto Una, CM para o médio e CM para o baixo. E o cenário 3, na Figura 7, obtido a partir da informação acumulada em 5 dias de maiores precipitações em junho de 2010 nas 108 estações, ou seja, dos volumes pluviométricos acumulados de 17 a 21 de junho de 2010, definindo CF/CL para o alto Una, CE/CS para o médio e CM para o baixo.

A partir dos padrões de precipitação citados, foram geradas as vazões nas sub-bacias que compõem o sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica do rio Una e, em sequência, a propagação das vazões na calha fluvial. Considerando as simulações a partir da precipitação acumulada registrada nos

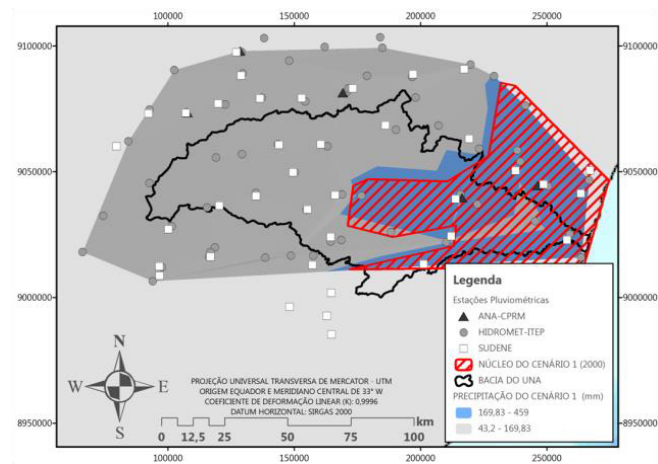
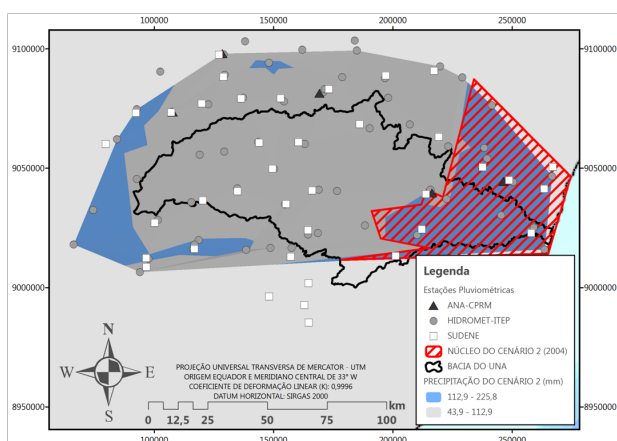


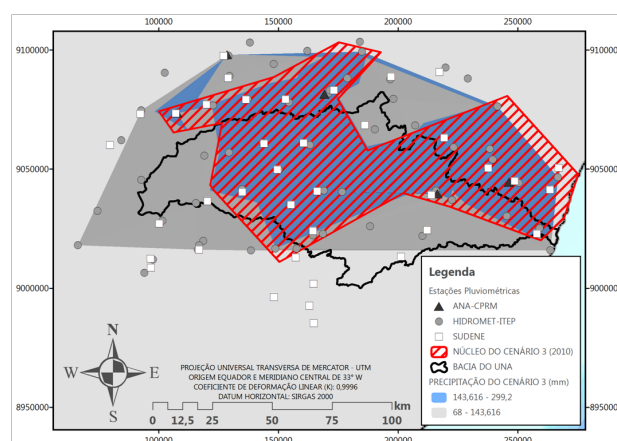
Figura 5 - Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em agosto de 2000 configurando o cenário 1 modelado



**Figura 6 - Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em fevereiro de 2004 configurando o cenário 2 modelado**

diversos postos da bacia nas fases de calibração e verificação do sistema, bem como as linhas máximas de inundação registradas em campo, constata-se que os cenários definidos reproduzem bem os três eventos de inundação ocorridos nas cidades observadas na bacia. Os cenários ajustados praticamente levaram à mesma superfície de inundação gerada com as chuvas efetivamente registradas, o que mostra a adequação do processo de regionalização das áreas que efetivamente contribuíram para a ocorrência das cheias.

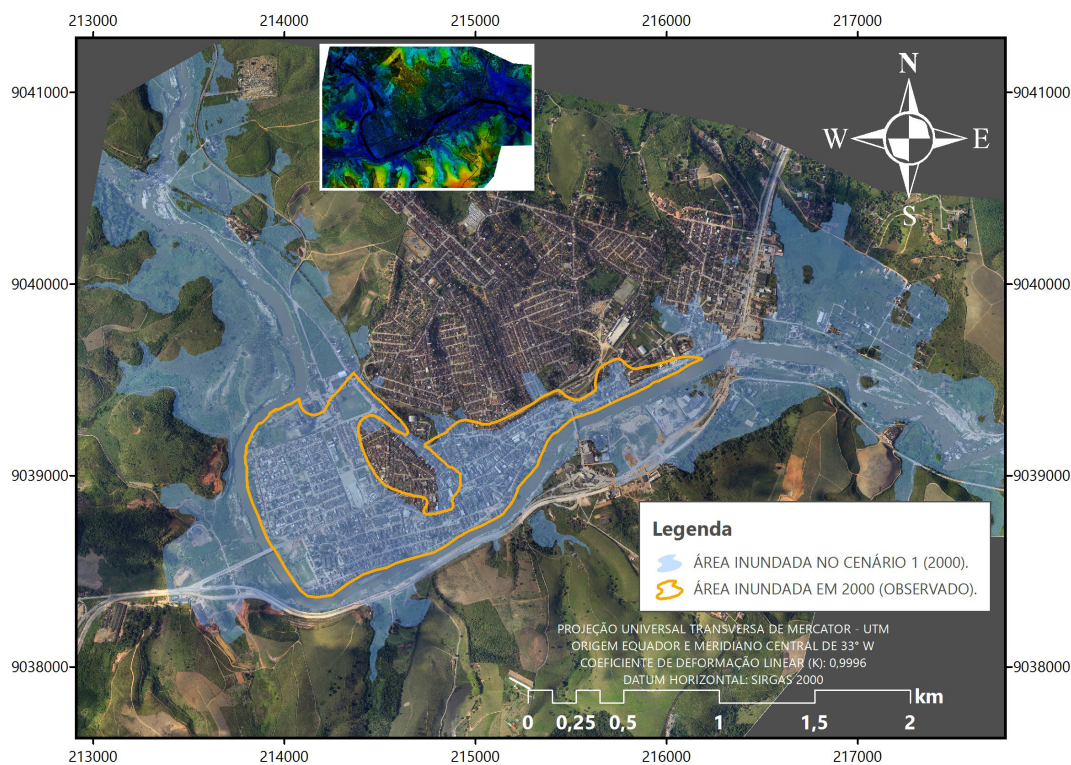
Assim, o resultado da modelagem dos cenários pelo sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica foi avaliado



**Figura 7 - Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em junho de 2010 configurando o cenário 3 modelado**

através da identificação da vazão de pico alcançada na cidade de Palmares pela previsão e por dados observados para a mesma seção, como também através da verificação do alcance das manchas de inundação recuperadas a partir das marcas de cheias obtidas em levantamentos de campo.

No cenário 1, a seção de controle do modelo hidrodinâmico, equivalente a estação fluviométrica Palmares (39560000) da ANA-CPRM, calculou-se na simulação a vazão de pico de  $1.222 \text{ m}^3/\text{s}$ , associada a um tempo de retorno  $Tr=75,66$  anos. A análise desenvolvida em Pernambuco (2002) estima uma vazão de pico de  $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Tr=70,84$  anos) nesta seção. A



**Figura 8 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 1 em Palmares (detalhe para a comparação da previsão com o levantamento na margem esquerda)**



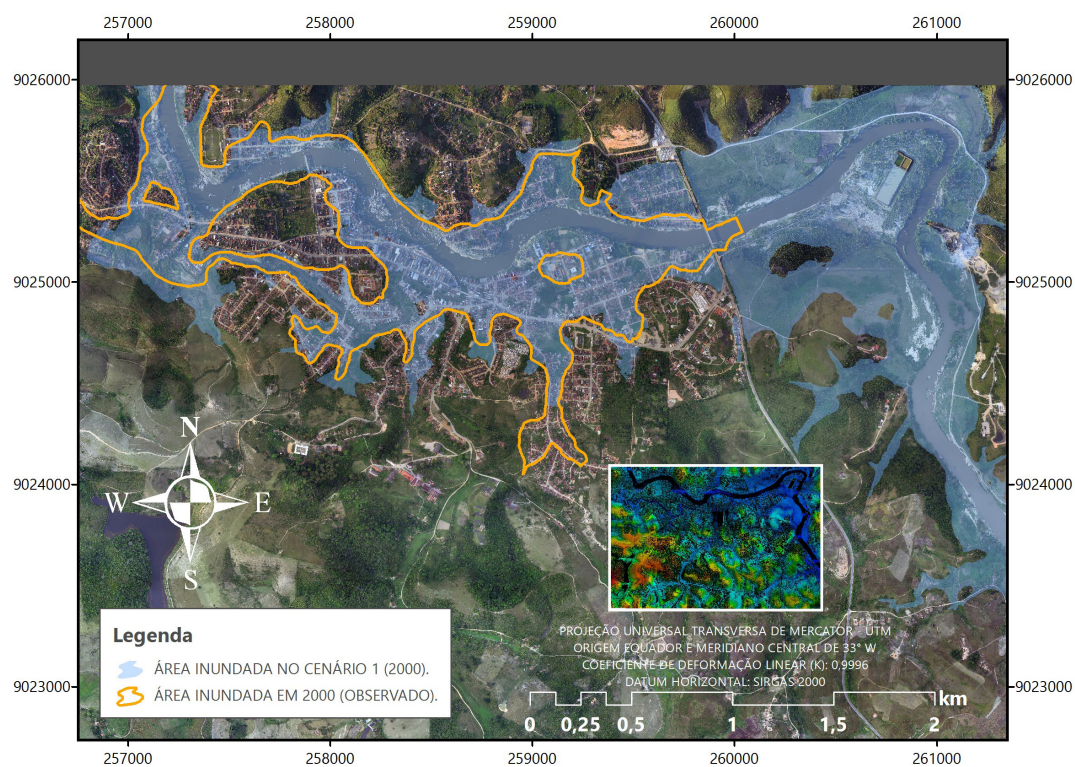


Figura 9 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 1 em Barreiros (detalhe para a comparação da previsão com o levantamento)

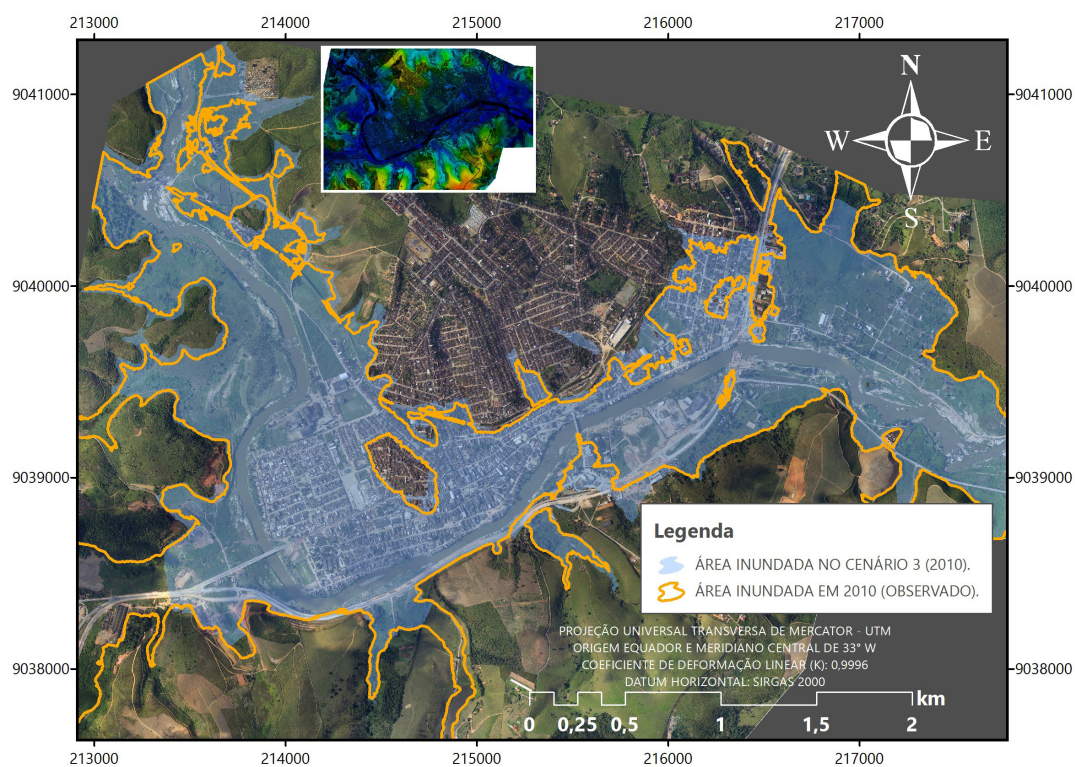


Figura 10 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 3 em Palmares (comparação com a estimativa decorrente do levantamento dos Bombeiros)



seguir, compara-se o alcance da mancha de inundação gerada com a modelagem do cenário com o levantamento realizado pela UFPE logo após à cheia ocorrida no ano de 2000 para a Fundação de Desenvolvimento Municipal (FIDEM) da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Social do Estado de Pernambuco, levantamento esse representado na Figura 8 para a cidade de Palmares e na Figura 9 para a cidade de Barreiros. É necessário registrar que o levantamento da mancha de inundação à época se fez somente em parte das cidades e, no caso de Palmares, apenas na margem esquerda. Assim, não há como comparar a simulação da área inundada nas partes das cidades onde o levantamento das marcas de inundação não ocorreu. Constatou-se o ajuste bastante razoável entre a observação e a simulação da mancha de inundação onde houve o levantamento.

No cenário 2, para a mesma seção de Palmares foi calculada a vazão de pico de  $557 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $T_r=7,21$  anos) que se aproxima da vazão de  $571 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $T_r=7,66$  anos) obtida da curva-chave da estação da Palmares (39560000) com dados observados de régua nesta estação. Para o evento de fevereiro de 2004, não há levantamento da mancha de inundação.

Finalmente, para o cenário 3, a vazão de pico calculada em Palmares foi  $2.121 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $T_r=748,06$  anos). Para este evento, pode-se comparar o alcance da mancha de inundação gerada pelo modelo com os limites extrapolados do levantamento do Corpo de Bombeiros em Palmares, comparação essa indicada na Figura 10.

## CONCLUSÕES

O uso da análise de frequência regional para a definição dos limiares das classes permite a utilização de séries com tamanhos menores do que as preconizadas para a aplicação do SPI, pois a análise regional de frequência representa uma alternativa que procura compensar a insuficiente caracterização temporal do comportamento de eventos extremos por uma coerente caracterização espacial da variável hidrológica em questão.

A adaptação do SPI (MCKEE et al., 1993), utilizando os resultados da análise de frequência regional, como proposto por Santos et al. (2013), para a determinação dos limiares de chuva para diferentes classes para a classificação das precipitações diárias se apresenta como uma boa ferramenta de informação sobre as alturas de chuva ocorridas, uma vez que possibilita uma classificação qualitativa e probabilística simultaneamente. Assim, a informação qualitativa pode atender as necessidades de divulgação da informação para diferentes públicos e, ao mesmo tempo está associada às probabilidades de ocorrência, que atende aos profissionais de Hidrologia e Meteorologia.

A análise estatística possibilitou identificar adequadamente o processo de formação das chuvas intensas e determinar padrões de comportamento das precipitações que geram cheias de diferentes magnitudes. Daí, quantificando as precipitações por faixas de magnitudes, tornou-se possível estabelecer critérios e cenários para previsão de inundações que reproduziram adequadamente os eventos adotados como referência.

Alguns pontos relativos aos resultados devem ser ressaltados:

- A implementação de um sistema de alerta de cheias eficaz depende da capacidade de identificação das cotas de inundação com antecedência suficiente para garantir a desocupação das áreas inundáveis. Para tal, modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, associados a sistemas de monitoramento meteorológico, aparecem como importantes ferramentas em previsões de enchentes, como apresentado neste trabalho. Isso pode ser obtido a partir do padrão de precipitação detectado pelos modelos meteorológicos e daí simulados os seus possíveis impactos a partir das ferramentas apresentadas; e

- Diversos resultados parciais deste trabalho foram incorporados para ações de controle de cheias na bacia do rio Una, como os projetos de barragens, ampliação da calha fluvial e desocupação das margens.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à Rede Clima, à Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos e ao Corpo de Bombeiros do Governo do Estado de Pernambuco, assim como à CPRM, pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa. Ao Prof. Mariano Aragão e à equipe por ele coordenada, da UFPE, pelas informações fornecidas do levantamento realizado da mancha de inundação após as cheias do ano 2000. Ao Prof. Eber José de Andrade Pinto, pesquisador da CPRM e professor do EHR/UFGM, pelo apoio na análise estatística.

## REFERÊNCIAS

- DANTAS, C. E. O. *Previsão e Controle de Inundações em Meio Urbano com Suporte de Informações Espaciais de Alta Resolução*. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- HOSKING, J. R. M. *Fortran routines for use with the method of L-moments*. Version 2. Yorktown Heights, New York: [s.n.], 1991. IBM Research Report RC 17097
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. *Regional Frequency Analysis: an approach based on L-Moments*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim, California, USA. *Proceedings...* Boston: American Meteorological Society, 1993.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, v. 391, n. 1-2, p. 202-216, Sept. 2010.

NAGHETTINI, M. C.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

OFDA/CRED. *EM-DAT: The OFDA/CRED International Disasters Database*. Brussels, Belgium: Université Catholique de Louvain, 2012.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos (SRH). *Relatório Técnico Preliminar (Anteprojeto) de 03 (três) Barramentos para o Controle de Cheias na bacia do rio Una – PE*. Recife: SRH, 2002. 8 v.

SANTOS, M. S.; PINTO, E. J. A.; MARTINS, L. K. L. A.; PINTO, J. A. O. Definição de limiares de secas e cálculo do índice de precipitação padronizada por meio de análise regional de frequências na bacia do alto São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 95-105, abr./jun. 2013.

***Characterization of the flood formation in the Una River Basin in Pernambuco: regional statistical analysis***

***ABSTRACT***

*The objective of the paper is to accomplish regional frequency analysis, to identify the pattern of occurrence of the most severe floods in the Una River basin and, using this pattern, to establish strategies and scenarios that allow forecasting and monitoring the evolution of the inundations. Based on the history of precipitation in the Una River basin, in Pernambuco, a regionalization study was performed (using the Index-Flood method) and a classification of rainstorms (using the Standardized Precipitation Index method), which aims to define patterns of rainfall distribution that generate floods in the basin. Based on these approaches, the spatial information is used in hydrological and hydrodynamic models, along with the hydrological data in the composition of a flood warning model and the generation of flood scenarios in cities in the Una River basin. As a result, it is demonstrated that the determination of precipitation patterns adequately explains the occurrence of the main flood events, which enables following and forecasting of floods based on weather forecasting and monitoring rainfall.*

**Keywords:** Flood forecasting; Regional frequency analysis; Standard precipitation index.