

# Previsão de precipitações extremas em regiões com escassez de dados hidrometeorológicos terrestres, com base em informação de satélite. Aplicação ao caso de Angola

## *Forecast of extreme rainfall in regions with a shortage of terrestrial hydrometeorological data, based on satellite information. Application to Angola*

*Eduardo SOUSA COSTA*

*Doutor em Engenharia Civil (IST)*

**RESUMO:** O presente artigo propõe a utilização de métodos de previsão de precipitações intensas recorrendo à junção de registos terrestres e de estimativas de precipitação baseadas em medições em satélite, com vista à sua utilização em países com escassez de dados hidrometeorológicos.

Para muitas regiões, não existem registos terrestres de precipitação para durações inferiores à diária, havendo quando muito um ou dois locais com registos de duração horária. É o caso de Angola, onde apenas existem dados com duração horária e sub-horária em Luanda.

Por outro lado, desde o final do século XX, têm vindo a ser disponibilizados dados relativos a estimativas de precipitação com base em algoritmos aplicados a medições resultantes de sensores instalados em satélites (PERSIANN, GSMaP, CMORPH, TRMM). Destes dados, apenas a CMORPH disponibiliza estimativas para valores sub-horários (30min), sendo os dados da GSMaP relativos a durações de 1h, e os dados da PERSIANN e da TRMM relativos a durações de 3h.

Costa (2015), após a análise prévia dos 4 produtos de precipitação de satélite, propõe a utilização combinada das estimativas da TRMM, dos registos terrestres, e do método apresentado por Chen (1983), alterado para se ajustar aos dados de precipitação disponíveis. Os resultados obtidos validam a aplicação destes métodos num contexto de escassez de informação hidrometeorológica, permitindo obter intensidades de precipitação para várias durações e períodos de retorno.

Apresentam-se fórmulas expeditas para previsão de precipitações intensas em Angola.

Palavras-chave: Precipitações intensas; Precipitação Estimada Baseada em Satélite; Curvas IDF; Fórmulas Regionais; Angola.

**ABSTRACT:** *The present article proposes the use of methods of forecasting intense rainfall using the combination of terrestrial records and precipitation estimates based on satellite measurements, with a view to their use in countries with a lack of hydrometeorological data.*

*For many regions, there are no terrestrial rainfall records for durations lower than the daily, with at most one or two locations with hourly and sub-hourly records. This is the case in Angola, where there is only data with hourly time in Luanda.*

*On the other hand, since the end of the 20th century, data on precipitation estimates have been made available based on algorithms applied to satellite measurements (PERSIANN, GSMaP, CMORPH, TRMM). Of these data, only CMORPH provides estimates for sub-hourly values (30min) - GSMaP has data for durations of 1h, and PERSIANN and TRMM for durations of 3h.*

*According to Costa (2015), and after the analysis of the four satellite precipitation products, it is proposed the combined use: of the TRMM estimates; of land records; and the method presented by Chen (1983), modified to fit the available precipitation data.*

*The results validate the application of these methods in a context of scarce hydrometeorological information, allowing obtaining precipitation intensities for several durations and return periods.*

*In the particular case of Angola, easy-to-use formulas to forecast rainfall intensities are presented and systematized.*

Keywords: Maximum annual rainfall intensity; Satellite-derived Precipitation Estimates; IDF Curves; Regional Formulas; Angola.

## 1. INTRODUÇÃO

Em várias regiões do globo, devido quer à falta de condições económicas e técnicas quer a conflitos armados relacionados com guerras civis ou guerras entre estados, não foi dada prioridade à recolha de dados de precipitação nos respectivos territórios.

Em muitos casos, existem registos, embora escassos, relativos a períodos que abrangem algumas décadas de meados do século XX, decorrentes de investimentos efectuados em períodos de colonização.

Com o fim do processo de descolonização e posterior fim dos conflitos armados, algumas dessas regiões, quer devido a proveitos associados à exploração mineral ou a movimentos de capital oriundos de grupos económicos de poder global quer devido à indústria crescente do turismo, encontram-se sujeitas a muito fortes pressões urbanísticas, sem contudo disporem de estudos relativos a cheias, capazes de suportar o adequado ordenamento do território e a construção ou reconstrução de infra-estruturas.

Dada a inexistência de séries amostrais longas e com densidade territorial adequada, tornam-se pois necessários métodos científicos recentes e solidamente sustentados, que permitam estimar precipitações intensas.

As precipitações estimadas com recurso aos sensores de satélite têm sido utilizadas para obter valores médios mensais ou anuais relativos a recursos hídricos, mas são também uma fonte muito potente para o estudo de intensidades máximas de precipitação, que tem sido descurada. O estudo estatístico deste tipo de precipitações só por si, no entanto, não permite caracterizar adequadamente as intensidades de precipitação para todas as durações.

A análise de precipitações intensas pode no entanto ser melhorada procedendo, por um lado, à fusão das precipitações estimadas via satélite com as precipitações terrestres disponíveis, mediante análise dos *ratios* das precipitações relativas às durações de 24h e de 1h, e, por outro lado, à adaptação e alteração do método de Chen (1983) para descrever adequadamente o comportamento das precipitações que resultam da fusão já referida.

A análise dos extremos adoptada foi baseada no paradigma frequencista, tendo-se procedido ao ajustamento de modelos de distribuição de probabilidade às amostras consideradas aleatórias.

Angola é um país para o qual não se conhecem estudos aprofundados sobre as intensidades máximas de precipitação, existindo alguns estudos sumários para precipitações com duração diária, nomeadamente S.M.N. (1965) e Rocha Faria (1974), e relativamente às intensidades máximas para várias durações, o estudo de S.M.A. (1968).

Os métodos apresentados neste artigo foram desenvolvidos em Costa (2015) e são aplicados ao caso particular de Angola. Apesar disso, podem ser ajustados a qualquer outro país ou região onde as séries amostrais são de pequena dimensão e/ou onde os postos de medição são esparsos e com poucos registos.

## 2. ANÁLISE DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS DE REGISTOS EM POSTOS TERRESTRES

### 2.1. Selecção prévia dos postos de medição a considerar

Em muitas regiões, existem (ou existiram) postos de medição de precipitação em que a leitura era executada uma vez por dia, normalmente ao início da manhã. São portanto valores medidos em 24h mas relativos a registos diários.

Os valores máximos relativos a 24h seguidas não são necessariamente iguais aos valores máximos diários, mas com esses registos é possível proceder ao estudo da distribuição da precipitação máxima com duração de 24h. Com efeito, para se obter os valores de precipitação máxima com duração de 24h, é corrente afectar os valores diários com um coeficiente superior à unidade:  $P_{24h} = C \cdot P_{dia}$ . Adoptou-se o valor  $C = 1.13$ , tal como indicado em W.M.O. (2009) e em Hershfield e Wilson (1958).

Munidos do coeficiente  $C$  e da duração, podem converter-se todas as precipitações para intensidades de precipitação máxima com duração 24h (*Imáx24h*).

Foi o que se efectuou no caso de Angola. Nas publicações consultadas e relativas a

registos de precipitação, os valores máximos de precipitação em Angola dizem respeito a precipitações máximas ocorridas diariamente, com medições efectuadas às 9h locais.

Depois de obtidas as séries correspondentes a todos os postos de medição encontrados, procedeu-se à selecção das amostras, recorrendo a testes de aleatoriedade, eliminando as amostras consideradas não aleatórias.

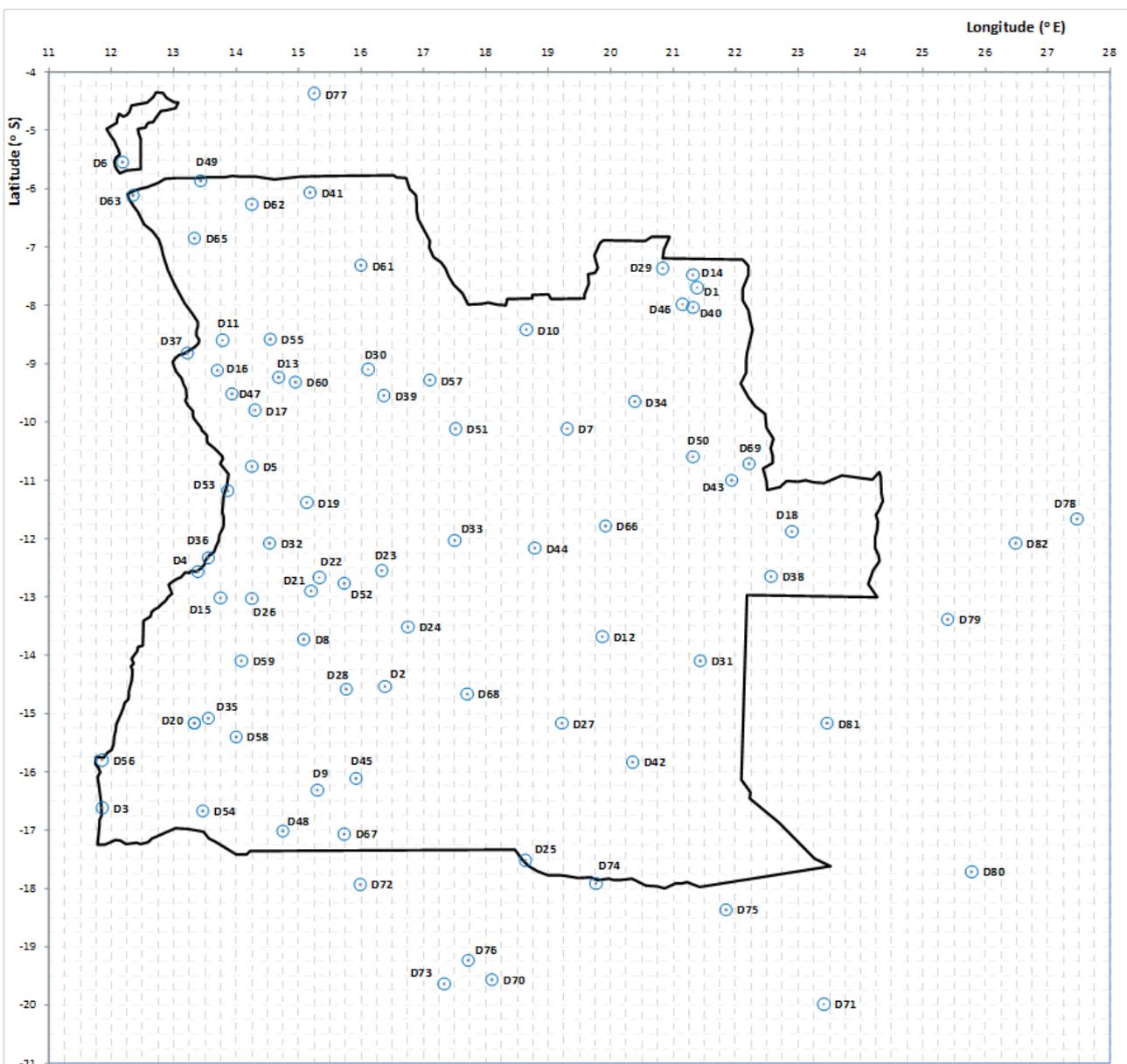
Na **Figura 1** apresenta-se a distribuição dos postos que serviram de base para a caracterização da distribuição da precipitação com duração de 24h.

## 2.2 Aplicação de modelos de distribuição às amostras. Selecção e aplicação do modelo

Para caracterizar a intensidade máxima de precipitação pode recorrer-se a diversos modelos de distribuição de probabilidades.

E em cada região em estudo deve sempre verificar-se qual o melhor modelo que se ajusta às amostras disponíveis.

No caso de Angola, foi estudado o ajustamento a modelos baseados na distribuição assintótica de extremos - *generalizada de extremos (GEV*, do inglês *generalized extreme value*) e *extremos tipo 1* ou Gumbel (*EV1*, do inglês *extreme value type 1*).



**Figura 1.** Disposição espacial dos postos correspondentes a Angola e a países limítrofes.

1) -, a modelos baseados na distribuição gama - (*P3*, *Pearson tipo 3*) e *gama de dois parâmetros* (*GM2*) -, e a modelos baseados na distribuição normal - *lognormal de 3 parâmetros* (*LN3*) e *lognormal de 2 parâmetros* (*LN2*).

Após proceder ao ajustamento das distribuições **EV1**, **GEV**, **LN2**, **LN3**, **GM2** e **P3** às séries amostrais seleccionadas, recorrendo a testes de adaptabilidade, concluiu-se que a distribuição **EV1**, com parâmetros dados pelo método dos momentos ponderados de probabilidade, assim como as distribuições **GEV** e **GM2** com parâmetros respectivamente dados pelo método dos momentos ponderados de probabilidade e pelo método dos momentos, poderão ser usadas nas previsões associadas a precipitações máximas com duração de 24h, em território angolano e região adjacente. No entanto, face à análise efectuada aos resultados obtidos, seleccionou-se a distribuição **EV1** como sendo a que melhor caracteriza a precipitação máxima com duração de 24h.

Na **Figura 2** apresenta-se o resultado de

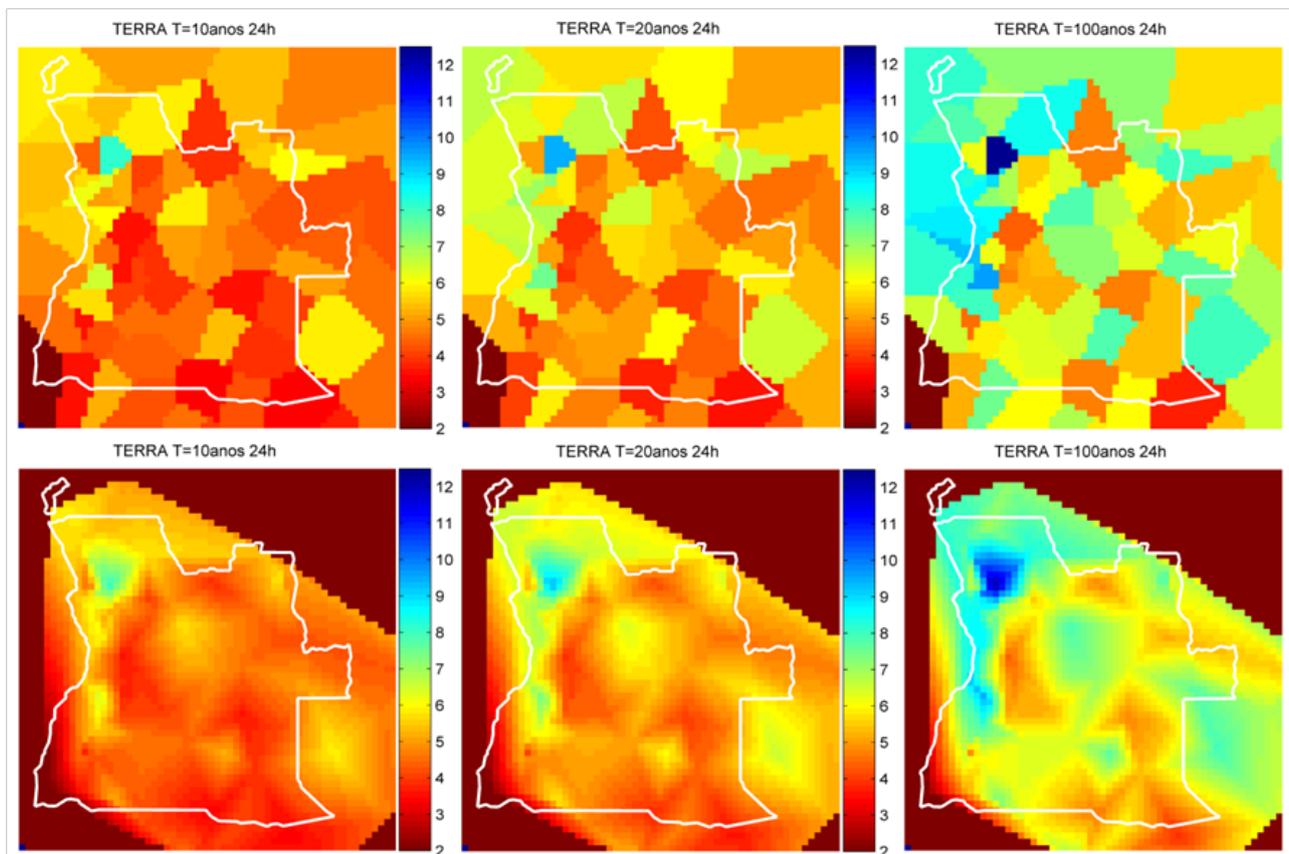
algumas estimativas de intensidade máxima de precipitação com duração de 24h para a região de Angola, recorrendo à triangulação de Delaunay.

### 3. ANÁLISE DAS SÉRIES DE PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS ANUAIS ESTIMADAS POR REGISTOS DE SATÉLITE

#### 3.1 Introdução

A precipitação é a base da modelação hidrológica. A sua variação em termos espaciais e temporais é sobejamente conhecida, sendo que uma das mais importantes tarefas em hidrologia passa por obter dados que sejam fiáveis e caracterizadores dessa variabilidade.

Efectivamente, para se conseguir uma boa precisão na simulação de cheias num modelo hidrológico, é necessário ter como base uma medição precisa da precipitação. No entanto, não existe nenhum método de medição que forneça dados de precipitação bastante precisos sobre áreas extensas.



**Figura 2.** Previsões de  $I_{máx}$ (mm/h) para a duração 24h e para os períodos de retorno  $T=\{10, 20, 100\}$ anos, correspondentes à interpolação dos postos em terra (Angola e países circundantes). Em cima, o resultado da triangulação de Delaunay, com os polígonos de Thiessen; em baixo o resultado de interpolação linear.

Em termos genéricos, a rede de postos de medição em terra fornece a medição mais precisa (pontual) mas apenas em localizações discretas, que não representam os processos de variabilidade espacial da precipitação sobre domínios mais abrangentes, e em particular em terrenos mais complexos do ponto de vista orográfico.

Por exemplo, Tsindikis *et al.* (2002) e Chintalapudi *et al.* (2012) mostraram que, quando a rede de postos de medição pontual terrestre está esparsamente distribuída sobre uma bacia, não se consegue capturar a variabilidade espacial da precipitação que é necessária para a modelação hidrológica.

Em muitas aplicações práticas em hidrologia, os postos estão desigualmente distribuídos sobre as bacias hidrográficas, tornando-se necessário proceder a interpolação, para se conseguir uma razoável distribuição espacial da precipitação (Shariff *et al.* 2006, Curtis 2007, Sarann Ly *et al.* 2013). E, nesses casos, a precisão dos valores de precipitação em locais situados entre postos de medição depende apenas das técnicas de interpolação, podendo conduzir a estimativas muito pouco fiáveis.

Isto é especialmente importante nas regiões tropicais, onde a chuva tem uma origem convectiva e uma grande variabilidade espacial a nível diário.

Há que acrescentar que em muitas regiões do globo, incluindo os EUA, está a assistir-se, recentemente, ao desaparecimento de muitas estações de medição terrestres (Stokstad 1999), restando apenas os registos históricos dessas estações. Por exemplo, antes de 2004 existiam cerca de 18000 postos de medição diária de precipitação sobre os Estados Unidos, mas passaram a existir menos de 10000 desde 2004 (Chen *et al.* 2008). E na China, deixaram de funcionar os 700 postos udométricos que existiam até então (Xie *et al.* 2007). Claro que em Angola a situação é ainda pior, pois os registos pararam em 1974-1975.

A precipitação estimada com base em sensores instalados em satélite cobre grandes regiões a nível global, mas ainda não é a ideal: a medição por satélite traz consigo os seus próprios erros na estimação de informação relativa à precipitação, uma vez que as observações são frequentemente influenciadas por factores

atmosféricos e topográficos e outros factores técnicos.

Por outro lado, avanços recentes e o desenvolvimento da tecnologia têm levado a melhorias significativas nos produtos de estimação de precipitação por satélite.

Uma vez que cada um dos produtos de precipitação (postos de medição pontual terrestre e satélite) tem as suas vantagens e deficiências, é possível combinar diferentes tipos de estimativas de precipitação com o propósito de obter dados com maior precisão. Em Angola, foi instalada uma rede de postos de medição, e alguns funcionaram durante dezenas de anos, tendo sido no entanto abandonados ou destruídos, na sequência do processo de independência e de guerra civil (após 1974). Neste momento, na prática, não existe qualquer infra-estrutura de medição de precipitação.

E os produtos de satélite trazem consigo a consistência que os produtos em terra dificilmente fornecem, permitindo caracterizar áreas inabitadas e/ou sem infra-estruturas de medição de precipitação, tal como em Angola. Os produtos de estimação de precipitação por satélite que foram analisados foram os seguintes: PERSIANN, GSMaP v5.0, CMORPH v1.0 e TRMM 3B42 v7.0.

Relembrando os resultados obtidos no ajustamento às séries amostrais terrestres, estudou-se o ajustamento apenas às distribuições EV1, GEV e GM2.

### 3.2. Análise das séries amostrais dos produtos de satélite

Procedeu-se à aplicação de testes de aleatoriedade a todas as séries de precipitação máxima anual de cada um dos produtos de satélite, tendo também sido analisada a adaptabilidade dos modelos de distribuição a cada um dos produtos.

Tudo somado, constatou-se que são a CMORPH (nas séries amostrais que se consideraram e relativas às durações de 0.5h, 1h, 1.5h, 2h, 2.5h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h e 24h) e a TRMM (nas séries amostrais relativas às durações de 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h, 21h e 24h) que revelam em média melhor comportamento em termos dos indicadores analisados. Curiosamente, no entanto, observou-se que as previsões de intensidade de precipitação com base na

CMORPH para durações mais curtas (0.5h) são pouco maiores do que as que se obtêm com base na TRMM para durações de 3h; isto apesar de as previsões para a duração de 24h serem da mesma ordem de grandeza.

E, relativamente aos modelos de distribuição, verificou-se que a distribuição EV1 é a que, em geral, melhor se adapta às séries amostrais de todos os produtos, pelo que este modelo foi selecionado para se obter os valores de intensidade de precipitação para as várias durações e períodos de retorno.

### 3.3. Ratios para as precipitações de satélite

É importante calcular os ratios entre a precipitação máxima para uma dada duração inferior a 24h e a precipitação máxima relativa a 24h de duração, para se ter a noção de como varia a precipitação máxima com a duração da chuvada.

Costa (2015) efectuou os cálculos necessários para a CMORPH e para a TRMM.

Comparando os resultados da CMORPH com algumas estimativas que se fizeram para Luanda, baseadas em dados de medição terrestre do Observatório João Capelo, constatou-se, no primeiro impacto, que os valores dos ratios P1h/P24h e P2h/P24h são substancialmente inferiores aos valores terrestres registados em Luanda (onde se tem  $P1h/24h=0.60$  e  $P2h/24h=0.84$ ). Os valores são também muito inferiores aos que constam dos estudos de Mohymont et al. (2004), relativo a Kinshaza-Binza ( $P1h/P24h=0.52$ ), e de De Vyver, H.V. e Demarée, G.R. (2010), relativo a Lubumbashi ( $P1h/P24h=0.512$  e  $P2h/24h=0.609$ ). Por outro lado, comparando simultaneamente os resultados relativos à CMORPH e à TRMM, é notório, conforme esperado, que os ratios mantêm bastante regularidade para os vários períodos de retorno, notando-se no entanto que a largura da mancha das linhas de ratios tem uma tendência ligeira para aumentar à medida que aumenta o período de retorno. Nota-se, por outro lado, que as linhas revelam visualmente uma forma que sugere equações do tipo  $R(d) = (d/24)^c$ , onde  $R(d)$  é o ratio da precipitação,  $d$  é a duração (em h) de uma precipitação qualquer e  $c$  é um valor característico de cada linha.

Também se notou que, no período comum à CMORPH e à TRMM, existem diferenças entre as linhas de ratios, sendo que as manchas relativas às linhas de ratios da TRMM estão puxadas para cima, em relação às da CMORPH, ou seja, em

média, os ratios da TRMM são superiores aos da CMORPH, para durações até cerca das 12h.

Para melhor comparar a CMORPH, a TRMM e os postos terrestres, estimaram-se os valores dos ratios P1h/P24h e P2h/P24h para a TRMM, para os períodos de retorno  $T=\{5, 10, 20, 50, 100\}$ anos. Para o efeito, ajustou-se às durações 3h a 24h uma equação do tipo potencial, uma vez que este tipo de equação ajusta-se bastante bem a séries de precipitações que não envolvam durações inferiores a 1h.

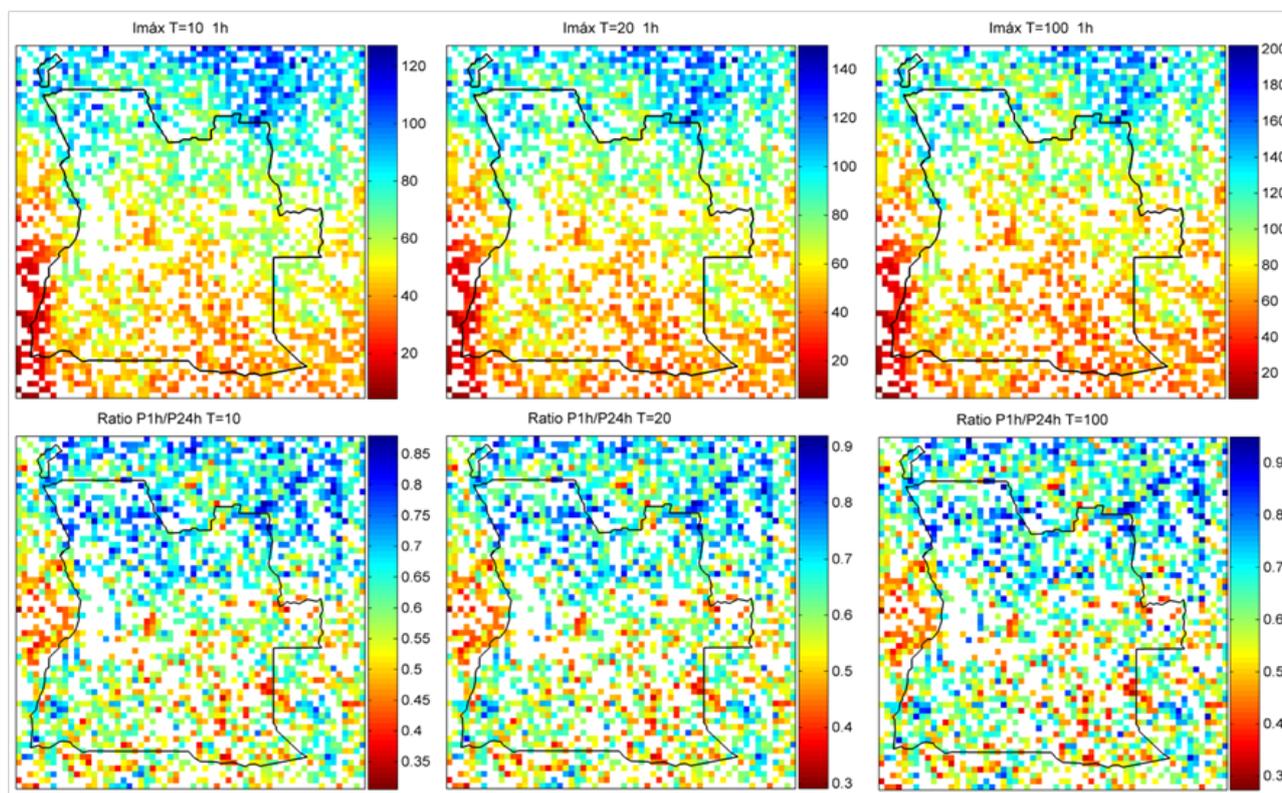
Por extrapolação, aplicando as curvas potenciais para 1h, obtiveram-se os valores de  $Imax(1h)$  e os ratios P1h/P24h para vários períodos de retorno. Na **Figura 3** apresenta-se o resultado da extrapolação para  $T=\{10, 20, 100\}$ anos.

Fazendo seguidamente a comparação entre a totalidade dos ratios relativos à TRMM e à CMORPH, com os dados relativos a postos terrestres (Observatório João Capelo em Luanda, e Kinshaza-Binza no Congo-Brazaville), verificou-se que:

- os valores dos ratios da CMORPH são muito inferiores aos dos postos terrestres de Luanda e Kinshaza-Binza;
- os valores dos ratios da TRMM, para durações maiores ou iguais a 1h, apresentam-se como compatíveis (da mesma ordem de grandeza) com os ratios das precipitações registadas em terra, podendo constituir-se aproximadamente como sequência lógica destes;
- e, finalmente, que os ratios da TRMM para os períodos de retorno de 10 e de 100 anos são da mesma ordem de grandeza.

Em face da análise efectuada, optou-se por prosseguir apenas com as séries de valores máximos de precipitação da TRMM, correspondentes às várias durações.

Porque os ratios da TRMM são da mesma ordem de grandeza para qualquer período de  $T$ , no sentido da sua standardização espacial tomou-se, em cada ponto, o valor médio dos ratios correspondente aos períodos de retorno  $T=10$  e  $T=100$ anos.



**Figura 3.** Valores estimados de  $I_{m\acute{a}x}$ (mm/h) com duração de 1h, e dos consequentes ratios P1h/P24h, correspondentes aos períodos de retorno  $T=\{10, 20, 100\}$ anos, para a TRMM 3B42v.7.

## 4. ANÁLISE CONJUNTA DAS INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITAÇÃO REGISTRADAS EM POSTOS TERRESTRES E DAS DERIVADAS DE REGISTOS DE SATÉLITE

### 4.1. Ratios sub-horários

Têm sido apresentados por diversos autores valores dos ratios de precipitações máximas sub-horárias, para vários locais do globo.

Por exemplo, para os EUA, Hershfield (1961) apresenta valores na publicação Technical Paper nº 40 (TP40) de onde se podem derivar os ratios que se apresentam no **Quadro 1** (faz-se notar que os resultados da TP40 tiveram por base a análise de séries parciais.

E do método de Bell (1969), referido por Chen (1983) e por Manley (1992), podem extrair-se os ratios que se apresentam no **Quadro 2**.

Fez-se uma análise mais cuidada recorrendo a dados de Luanda e em locais mais próximos de Angola, nomeadamente Kinshaza-Binza, Kinshaza-Ddjili e Yangambi, com valores extraídos de Mohymont *et al* (2004) e Lubumbashi, com valores extraídos de De Vyver e Demarée (2010), acrescentando-se

**Quadro 1.** Ratios Médios entre Precipitações com Durações Sub-horárias e a Precipitação de 60min, para o mesmo Período de Retorno, extraídos da TP40 e relativos aos EUA.

| Duração (min) | $P_i/P_{60}$ | $I_i/I_{60}$ |
|---------------|--------------|--------------|
| 5             | 0.292        | 3.510        |
| 10            | 0.450        | 2.700        |
| 15            | 0.569        | 2.276        |
| 30            | 0.790        | 1.580        |
| 60            | 1.000        | 1.000        |

**Quadro 2.** Ratios entre Precipitações com várias durações e a Precipitação de 60min, para o mesmo Período de Retorno, extraídos do método de Bell.

| Duração (min) | $P_i/P_{60}$ | $I_i/I_{60}$ |
|---------------|--------------|--------------|
| 5             | 0.307        | 3.679        |
| 10            | 0.459        | 2.754        |
| 15            | 0.561        | 2.244        |
| 30            | 0.762        | 1.523        |
| 60            | 1.000        | 1.000        |

ainda locais que dizem respeito a zonas do globo mais próximas do equador e em latitudes semelhantes à latitude de Angola (Brasil e Venezuela) (Quadro 3).

**Quadro 3.** Comparação entre os ratios entre Precipitações com várias durações e a Precipitação de 60min, para vários locais.

| Duração (min) | K-Binza | K-Djili | Yangambi | Lubumbashi | Brasil <sup>(1)</sup> | Venezuela <sup>(2)</sup> | Luanda       |
|---------------|---------|---------|----------|------------|-----------------------|--------------------------|--------------|
| 5             | 0.243   | 0.254   | 0.195    | -          | 0.246                 | 0.249                    | <b>0.230</b> |
| 10            | 0.410   | 0.420   | 0.348    | -          | 0.422                 | 0.402                    | <b>0.380</b> |
| 15            | 0.533   | 0.541   | 0.470    | 0.559      | 0.538                 | 0.512                    | <b>0.490</b> |
| 30            | 0.767   | 0.769   | 0.726    | 0.785      | 0.757                 | 0.735                    | <b>0.750</b> |
| 40            | 0.866   | 0.865   | 0.841    | -          | 0.855                 | 0.840                    | <b>0.850</b> |
| 60            | 1.000   | 1.000   | 1.000    | 1.000      | 1.000                 | 1.000                    | <b>1.000</b> |

(1) Segundo DAE/CETESB (1979) e Silveira (2000), relativos a todo o Brasil;

(2) Segundo Guevara e Márquez (2008).

Face aos valores apresentados no **Quadro 3**, adoptaram-se como ratios sub-horários caracterizadores da região de Angola, as médias dos valores dos ratios sub-horários entre Kinshaza-Binza e Kinshaza-Djili (postos localizados mais perto de Luanda) e Luanda.

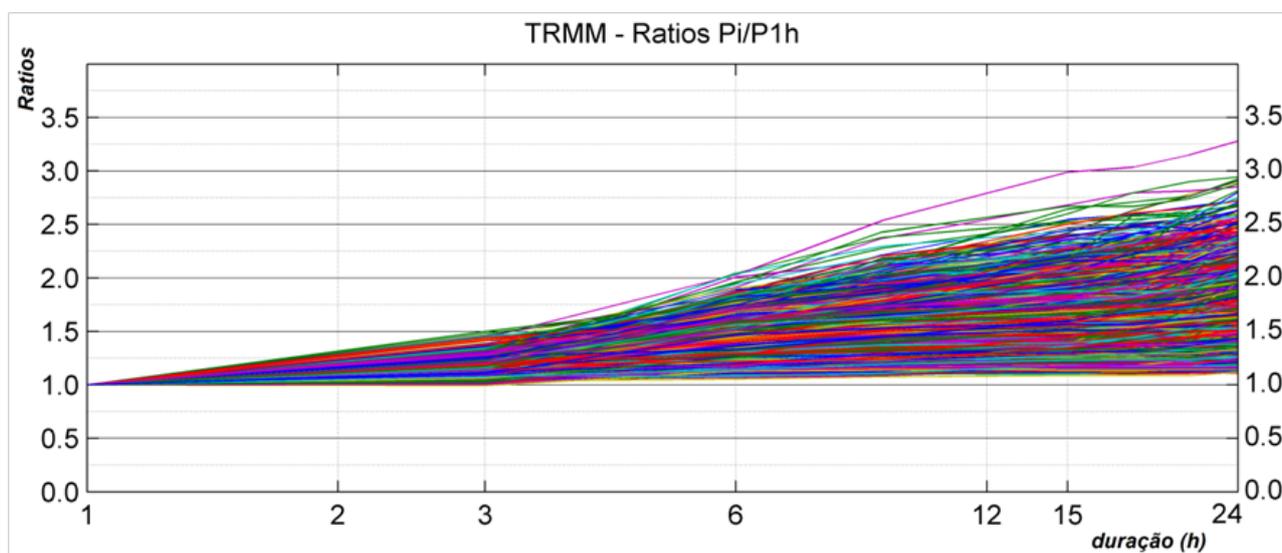
#### 4.2. Ratios sub-diários relativos a durações superiores ou iguais a 1h

Para estabelecer estes ratios, fez-se uma análise semelhante à descrita em Chen (1976 e 1983). Considerando o produto TRMM, no território de Angola e países circundantes, os ratios entre as precipitações com durações de 1h e de 24h variam entre o mínimo de cerca de 30% (29.9%) e o máximo de cerca de 90% (91.5%).

Acrescentamos que, por análise dos resultados, o ratio médio é de cerca de 60% (61.6%).

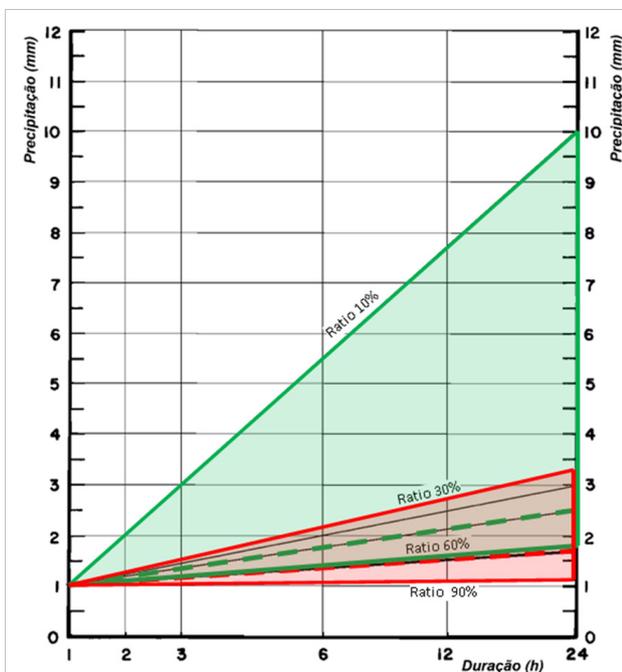
Se tomarmos como referência para os ratios não a precipitação em 24h mas sim a precipitação em 1h, obtemos o conjunto de linhas de ratios supra-horários que constam na **Figura 4**.

Hershfield (1961), na TP40, mais tarde reafirmado por Chen, sugere que, numa figura cuja escala do eixo das durações foi construída de forma empírica, é possível colocar os valores de precipitação para as durações de 1h e de 24h, e ligá-las por uma recta, obtendo os valores de precipitação para qualquer duração entre as duas durações mencionadas. Segundo Hershfield, tal figura empírica foi construída com base em registos de 200 estações de medição de precipitação.



**Figura 4.** Linhas de ratios médios  $P_i/P_{1h}$  para as durações de 1h a 24h, com escala logarítmica nas durações.

De forma semelhante, adoptou-se a figura mencionada na TP40, colocando-se sobre a mesma os valores da envolvente que constam na **Figura 4**, onde os ratios P24h/P1h máximo e mínimo são, respectivamente, 3.34 e 1.09. A figura adaptada (**Figura 5**) contém também os valores dos limites máximos e mínimos, bem como os valores médios dos ratios, tanto para os E.U.A como para Angola e países circundantes. Note-se que os valores do eixo das ordenadas, embora sejam valores de precipitação, referem-se concretamente a valores de precipitação  $P$  (em mm) com determinada duração  $d$  (em h), por cada 1mm de precipitação com duração de 1h.



**Figura 5.** Linhas de ratios médios  $P_i/P_{1h}$ , segundo a TP40 e Chen (1976 e 1983).

(A verde) as linhas contínuas representam os limites superior (10%) e inferior (60%) dos ratios e a linha descontínua o valor médio (40%) dos mesmos ratios referidos por Chen para a TP40.

(A vermelho) as linhas representam, de forma semelhante, os ratios calculados no presente estudo para Angola e zonas adjacentes (respectivamente 30%, 90% e 60%).

Nota: os ratios da Figura referem-se a ratios  $P_{1h}/P_{24h}$ .

E verificou-se que, pese embora a gama de valores de ratios seja bastante distinta da que é referenciada para os E.U.A., quer por Hershfield (1961), na TP40, quer por

Chen (1976 e 1983), na verdade os valores determinados por Costa (2015) acabam por se encaixar muito satisfatoriamente na escala empírica das durações. Com efeito, os valores são praticamente coincidentes, o que sugere a universalidade da **Figura 5**.

A **Figura 5** revela-se de grande utilidade para obter uma primeira estimativa, para qualquer local em Angola, das precipitações de várias durações correspondentes a um determinado período de retorno, conhecidas que sejam as precipitações com duração de 24h e de 1h para o mesmo período de retorno.

### 4.3. Método de Chen.

Chen (1976 e 1983) apresentou uma extensão ao método de Bell (1969) que permite estimar intensidade de precipitação desde durações sub-horárias até à duração de 24h.

Tendo obtido os valores da intensidade de precipitação correspondentes às várias durações, para cada um dos *ratios* analisados, e tendo verificado que (também para os E.U.A), o quociente entre duas precipitações (ou intensidades de precipitação) de durações diferentes podia ser considerado independente do período de retorno, Chen considerou que a relação entre a intensidade e a duração que é praticamente independente do período de retorno pode ser descrita como:

O mesmo é dizer:

$$\frac{I_t^T}{I_{1h}^T} = \frac{a_1}{(t + c_1)^{b_1}} \quad (1)$$

$$I_t^T = \frac{a_1 \cdot I_{1h}^T}{(t + c_1)^{b_1}} \quad (2)$$

Ou seja, já que  $I_t^T = a / (t + c)^b$ , tem-se:

$$a = a_1 \cdot I_{1h}^T; b = b_1; c = c_1. \quad (3)$$

No método original de Chen, as precipitações consideradas (designadas de âncoras em Costa 2015) foram  $P_{1h}^{10}$  e  $P_{1h}^{100}$ , para além dos

ratios  $P_{1h}^T / P_{24h}^T$ , considerados independentes do período de retorno  $T$ , usados na definição das curvas estandardizadas de precipitação  $I(t) = I_t^T / I_{1h}^T = \frac{a_1}{(t + c_1)^{b_1}}$ .

Como se apresenta mais à frente neste artigo, a incorporação das precipitações com duração de 3h revelou ser o mais adequado face às estimativas de precipitação resultantes de sensores instalados em satélite que foram adoptadas (TRMM). Por esse motivo, optou-se por considerar as âncoras  $P_{1h}^{10}$ ,  $P_{3h}^{10}$  e  $P_{3h}^{100}$ , e adicionalmente os ratios  $P_{1h}^T / P_{24h}^T$ .

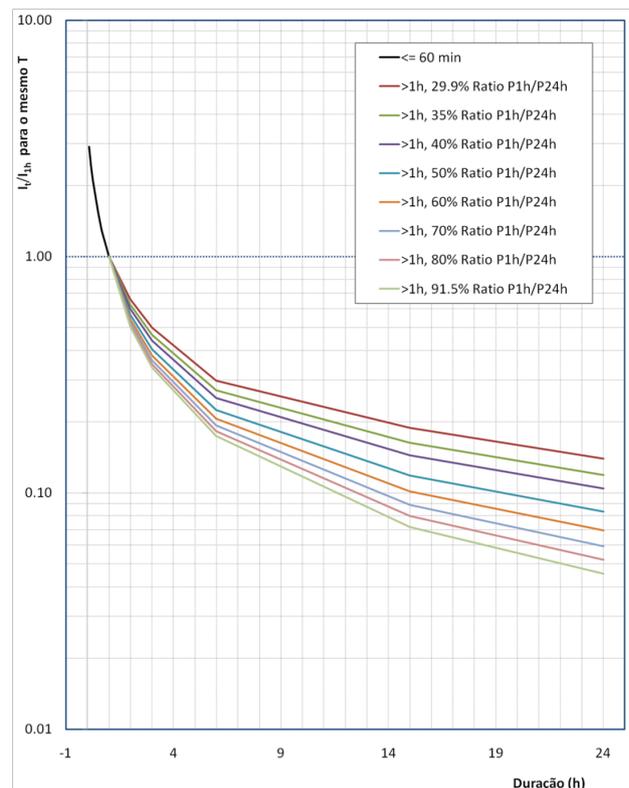
A expressão para o método de Chen, alterada, resultou pois:

$$I_t^T = \frac{a_1 \cdot I_{1h}^{10} \cdot \log \left\{ 10^{2-z} \cdot \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]^{-(z-1)} \right\}}{(t + c_1)^{b_1}} \quad (4)$$

onde  $z = P_{3h}^{100} / P_{3h}^{10}$ .

As curvas estandardizadas  $I(t) = I_t^T / I_{1h}^T = \frac{a_1}{(t + c_1)^{b_1}}$  que dependem da região de análise, foram definidas para a região de Angola, de acordo com os ratios  $P_{1h}^T / P_{24h}^T$  calculados para toda a região, conforme se apresenta na **Figura 6**. Os ratios correspondem às médias dos valores dos ratios entre os períodos de retorno de 10 e de 100 anos.

Procedeu-se seguidamente ao ajustamento de uma função não linear, sendo os valores dos parâmetros  $a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$  calculados mediante programação em *Matlab*, utilizando algoritmos de regressão não linear.



**Figura 6.** Curvas estandardizadas para várias durações.

Os resultados são apresentados no **Quadro 4**, em termos numéricos. Na **Figura 7** são apresentados graficamente os mesmos valores. O coeficiente de determinação  $R^2$ , resultado da regressão não linear do cálculo dos valores de  $a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$ , situou-se acima de 0.99.

Apenas como esclarecimento para os técnicos e investigadores portugueses, cujo hábito de há décadas os condiciona a usar expressões do tipo  $I = \alpha \cdot t^\beta$ , surgirá talvez uma questão imediata sobre o parâmetro  $b_1$ ; para muitos casos, assume valores superiores a 1.

**Quadro 4.** Valores dos Parâmetros, e das Curvas Estandarizadas, com t em minutos, para vários ratios P1h/P24h.

| Parâmetros | Ratios P1h/P24h |        |        |        |        |        |         |         |
|------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|            | 29.9%           | 35.0%  | 40.0%  | 50.0%  | 60.0%  | 70.0%  | 80.0%   | 91.5%   |
| $a_1$      | 22.312          | 28.891 | 36.101 | 52.089 | 69.941 | 88.795 | 108.060 | 130.300 |
| $b_1$      | 0.7214          | 0.7801 | 0.8297 | 0.9097 | 0.9727 | 1.0230 | 1.0639  | 1.1026  |
| $c_1$      | 11.805          | 13.989 | 15.877 | 18.993 | 21.496 | 23.522 | 25.188  | 26.774  |

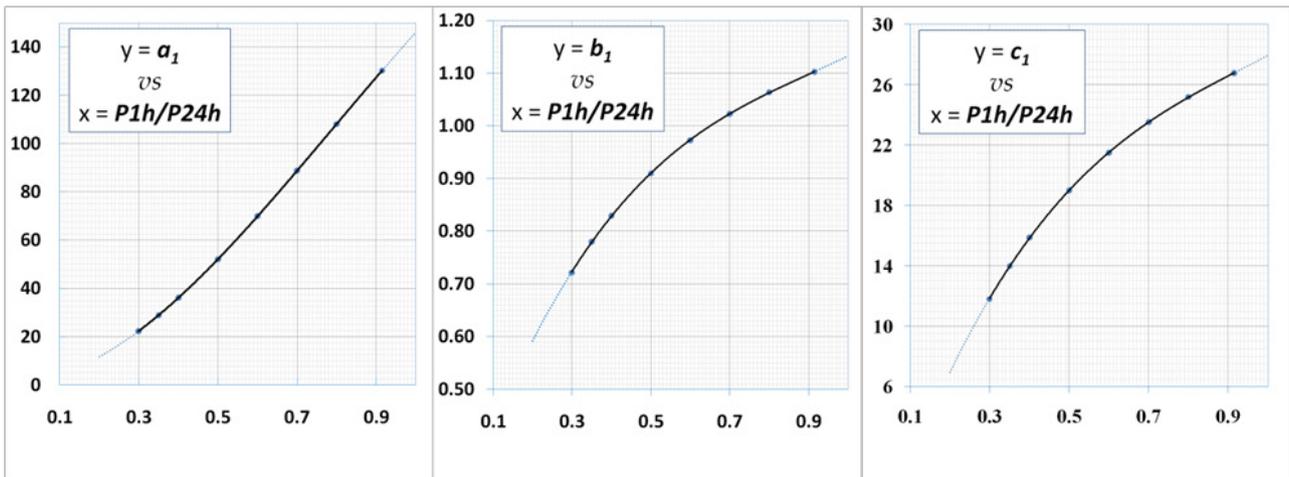


Figura 7. Curvas dos parâmetros  $a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$  em função dos ratios  $P1h/P24h$ .

Mas tal é perfeitamente natural, e é consequência da utilização de expressões do tipo  $I = \frac{a}{(t+c)^b}$  e não de expressões do tipo  $I = \alpha.t^\beta$ . No **Quadro 5** exibem-se os valores do parâmetro  $\beta$  para os mesmos ratios do **Quadro 4**, ajustando uma equação do tipo  $I = \alpha.t^\beta$  às curvas estandardizadas.

Uma vez que a expressão da variação dos parâmetros com o ratio =  $P1h/P24h$  é muito útil na forma de equação, procedeu-se a regressões polinomiais do 3º grau, cujas equações são as seguintes:

$$a_1 = 1.396 + 7.703x + 238.147x^2 - 101.236x^3 \quad (4)$$

$$b_1 = 0.225 + 2.215x - 2.067x^2 + 0.760x^3 \quad (5)$$

$$c_1 = -6.325 + 79.328x - 69.556x^2 + 24.489x^3 \quad (6)$$

Neste caso, o coeficiente de determinação  $R^2$  tem valores acima de 0.99.

Dada a semelhança das curvas relativas aos valores de  $b_1$  e  $c_1$ , estabeleceu-se uma relação polinomial entre ambos; tal foi possível, podendo os valores de  $c_1$  ser calculados em função dos valores de  $b_1$ , mediante uma regressão linear do 1º grau:

$$c_1 = 39.329 b_1 - 16.689; \text{ com } R^2 \text{ acima de } 0.99. \quad (7)$$

A relação linear é muito boa e pode ser utilizada na maioria dos casos. Esta relação *quasi-linear* entre os parâmetros  $b_1$  e  $c_1$  indica que a sua distribuição espacial relativa será muito semelhante, apenas se notando a diferença nas escalas respectivas.

Por definição, os ratios médios  $P1h/P24h$  adoptados são independentes do período de retorno  $T$  e são característicos de cada ponto  $Q$  do território, definido por  $Q(lat., long.)$ . Como se recorreu aos ratios médios para a determinação dos parâmetros  $a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$  isso significa que, para o mesmo ponto do território, os valores de  $a_1$ ,  $b_1$  e  $c_1$  das curvas estandardizadas são também uma característica de cada ponto  $Q$ , e independentes de  $T$ .

**Quadro 5.** Valor do Parâmetro se, nas Curvas Estandarizadas se optasse por expressões do tipo  $I = \alpha.t^\beta$ , para vários ratios  $P1h/P24h$

| Parâmetros | Ratios $P1h/P24h$ |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 29.9%             | 35.0% | 40.0% | 50.0% | 60.0% | 70.0% | 80.0% | 91.5% |
| $\beta$    | 0.566             | 0.597 | 0.623 | 0.665 | 0.699 | 0.725 | 0.749 | 0.772 |

Esta característica tem como consequência que a distribuição espacial de  $b_1$  seja igual para qualquer valor de  $T$ , e semelhantemente o mesmo aconteça com os parâmetros  $a_1$  e  $c_1$ . Note-se, no entanto, que a estandardização, ao assentar nos parâmetros  $a_1$ ,  $b = b_1$  e  $c = c_1$ , implica que o valor final do parâmetro  $a$  - que depende de  $a_1$  e também de  $T$  - varia com  $T$ .

## 5. CÁLCULO DE CURVAS IDF

### 5.1. Considerações prévias

Para se poderem determinar equações correspondentes às curvas IDF serão necessárias, de acordo com as alterações que se fizeram ao método de Chen, algumas distribuições espaciais da precipitação (com durações de 1h, de 3h e de 24h) para períodos de retorno de 10 e 100anos.

Estas distribuições espaciais (matrizes de valores), apelidadas de âncoras, servem exactamente de ancoragem no cálculo das precipitações para qualquer duração ou período de retorno.

Analysaram-se conjuntamente as distribuições espaciais de precipitações máximas com duração de 24h, para os períodos de retorno de 10 e de 100 anos, correspondentes aos postos terrestres e à TRMM.

Dessa análise concluiu-se que os valores correspondentes aos dois produtos são muito semelhantes, quer devido à escala de valores quer devido à semelhança entre as duas distribuições espaciais das precipitações máximas.

Para uma completa interpretação dos dois resultados não podemos no entanto deixar de recordar o seguinte:

1. Os dois resultados foram estimados a partir de amostras de dimensão diferente: variável pontualmente, no caso dos postos terrestres, de 8 a 49 (em território angolano) e de 8 a 37 (em países circundantes de Angola); e igual a 16 para todos os pontos do quadrado, no caso da TRMM.
2. Mais importante ainda é o facto de as amostras dizerem respeito a períodos de tempo diferentes, com um intervalo de cerca de 25 anos entre o último registo

dos postos terrestres e o primeiro registo da TRMM.

Qualquer dos dois resultados é, no entanto, de utilidade elevada na caracterização das precipitações máximas na zona em estudo. Por esse motivo, optou-se pela junção dos dois resultados num só, que incorpora os máximos entre as duas em períodos comuns, e que adopta os valores estimados para a TRMM onde não foi possível proceder a interpolação linear dos valores registados nos postos terrestres.

Com o ajustamento do modelo EV1 às séries amostrais da TRMM obtiveram-se também as intensidades máximas de precipitação com durações de 3h e de 1h.

Tendo no entanto em vista o uso das precipitações com duração de 24h adoptadas atrás, não podemos olvidar o facto de que parte do leque dessas precipitações corresponde a previsões resultantes de postos terrestres, enquanto as previsões com duração de 1h e de 3h resultam tão-somente da TRMM.

Houve pois necessidade de proceder à correcção das precipitações com durações de 1h e de 3h, recorrendo aos ratios P1h/P24h e P3h/P24h da TRMM.

Esses ratios foram multiplicados pelas precipitações de duração 24h da matriz-junção, obtendo-se dessa forma as precipitações máximas ajustadas, com durações de 1h e de 3h.

### 5.2. Curvas IDF para qualquer local em Angola

Como resultado directo da aplicação da alteração ao método de Chen, resultam as curvas IDF para qualquer local.

Em primeiro lugar, retoma-se a equação base do método. Como se viu, a equação geral pode ser expressa na forma

$$I_t^T = f_1(t) \cdot g_1(T) \cdot I_{60}^{10} \quad (7)$$

onde:

$$f_1(t) = \frac{a_1}{t + c} \quad (8)$$

$$e \quad g_1(T) = A(z) \cdot \ln \left[ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right]^{-1} + B(z) \quad (9)$$

$$\text{sendo: } A(z) = \frac{z-1}{\ln(10)} \quad (10)$$

$$\text{e: } B(z) = (2-z) \quad (11)$$

A variável  $z$  é dada pela expressão  $z = P_{3h}^{100} / P_{3h}^{10}$ .

Os procedimentos para a obtenção de  $I_t^T$  resumem-se no seguinte:

- 1) Leitura da variável  $z = P_{3h}^{100} / P_{3h}^{10}$  no gráfico da **Figura 8**;
- 2) Cálculo de  $A(z)$  e  $B(z)$  e definição de  $g_1(T)$ ;
- 3) Leitura do valor  $I_{60}^{10} = P_{60}^{10}$  no gráfico da **Figura 9**;
- 4) Leitura do valor  $a_1$  no gráfico da **Figura 10**;
- 5) Leitura do valor  $b$  no gráfico da **Figura 11**;
- 6) Cálculo do valor  $c = 39.329 b - 16.689$ ;
- 7) Substituição dos valores  $a_1$ ,  $b$  e  $c$  para definir  $f_1(t)$ ;
- 8) E, finalmente, multiplicar os 3 termos para obter  $I_t^T = f_1(t) \cdot g_1(T) \cdot I_{60}^{10}$

Nas Figuras 8, 9, 10 e 11 apresentam-se os gráficos com isolinhas relativas, respectivamente, a  $z = P_{3h}^{100} / P_{3h}^{10}$ ,  $I_{60}^{10} = P_{60}^{10}$ ,  $a_1$  e  $b$ .

Todos os procedimentos que se efectuaram relativamente a Angola podem ser facilmente utilizados em outras regiões, obtendo-se dessa forma curvas IDF adaptadas às regiões estudadas.

## BIBLIOGRAFIA

Bell, F.C. (1969). Generalized rainfall depth-duration-frequency relationships, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 95(1), 331-327.

Chen, C.I. (1976). Urban Storm Runoff Inlet Hydrograph Study Volume 4, Synthetic Storms for Design of Urban Highway Drainage Facilities. *Reports*. Paper 561.

Chen, C.I. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12): 1603-1621.

Chen, M. *et al.* (2008). Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global

daily precipitation. *J. Geophys. Res.*, 113, D04110.

Chintalapudi, S. *et al.* (2012). Physically-based, hydrologic model results based on three precipitation products. *J. Am. Water Resour. Assoc.* JAWRA 2012, 48, 1191-1203.

Costa, E.S. (2015). *Análise de Precipitações Intensas e de Caudais Extremos em Países com Economias Emergentes de Rápido Desenvolvimento. Aplicação a Angola*. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.

Curtis, S.; Crawford, T.W. e Lecce, S.A. (2007). A comparison of TRMM to other basin-scale estimates of rainfall during the 1999 Hurricane Floyd flood. *Nat. Hazards* 2007, 43, 187-198.

De Vyver, H. V. e Demarée G. R. (2010), Construction of Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for precipitation at Lubumbashi, Congo, under the hypothesis of inadequate data, *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(4), pp 555-564.

Hershfield, D. M. e Wilson, W. T. (1958). Generalizing of Rainfall-Intensity-Frequency Data. *IAHS Publication N° 43*, pp 499-506, Toronto (Ontario).

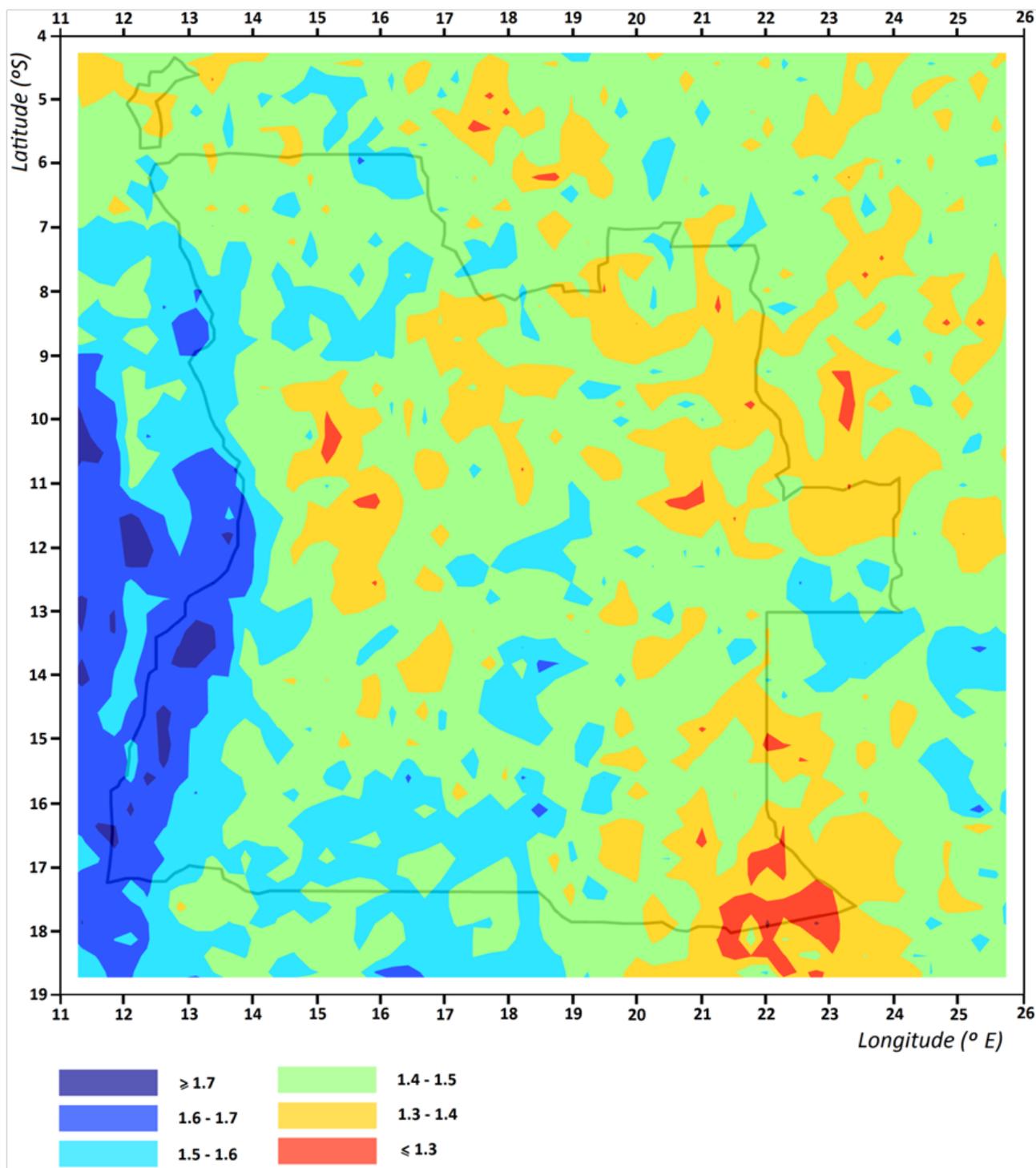
Hershfield, D. M. (1961). Rainfall frequency atlas of the U.S. for duration from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1-100 years. *Tech. Paper No. 40*, 61 p. Weather Bureau, U.S. Dept. of Commerce.

Manley, R. E. (1992). Bell's Formula – A Reappraisal. *VIII<sup>e</sup> journées hydrologiques*, Orstom, Septembre 1992.

Mohymont, B., Demarée, G. R. e Faka, D. N. (2004). Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa – comparison of techniques and results. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 375-387.

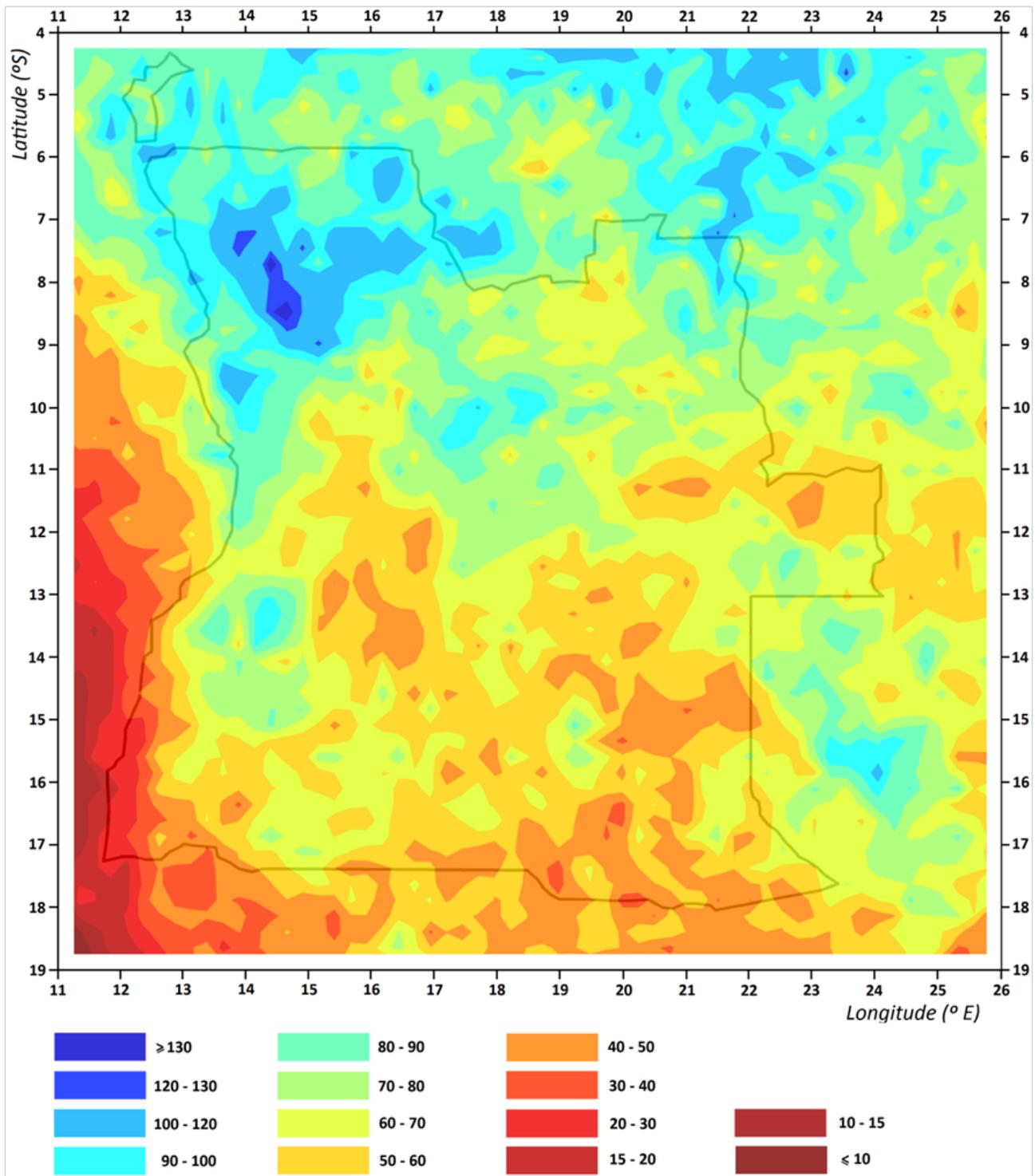
Rocha Faria, J. M. da (1974). Análise da frequência dos maiores valores anuais da quantidade de precipitação diária em alguns locais do Ultramar, in *Colectânea de estudos hidrológicos*, Direcção-Geral de Obras Públicas e Comunicações, introdução José Luiz Abecasis. Lisboa, Grupo de Trabalho para o Decénio Hidrológico Internacional, p. 359-392.

- S.M.A.- Serviços Meteorológicos de Angola (1968). Chuvadas críticas observadas no território de Angola, Memória 39, in *Memórias* Vol. 4, Luanda.
- S.M.N.- Serviço Meteorológico Nacional (1965). Normais Climatológicas dos Territórios do Ultramar, correspondentes a 1931-1960, *O Clima de Portugal*, fascículo XIV, elaborado sob direcção de H. Amorim Ferreira, Lisboa.
- Sarann Ly, Catherine Charles e Aurore Degré (2013). Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale: a review, *Base [En ligne]*, Volume 17, número 2.
- Sharif, H.O. *et al.* (2006). The use of an automated now-casting system to forecast flash floods in an urban watershed. *J. Hydrometeorol.*, 7, 190–202.
- Stokstad, E. (1999). Scarcity of rain, stream gages threatens forecasts. *Science* 20 August 1999: Vol. 285 no. 5431 pp. 1199-1200.
- Tsintikidis, D. *et al.* (2002). Precipitation uncertainty and rain gauge network design within Folsom Lake watershed. *J. Hydrol. Eng.*, 7, 175–184.
- W.M.O.- World Meteorological Organization (2009). Guide to Hydrological Practices, Vol. II – *Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices*, WMO n.º 168, 6<sup>th</sup> Ed.
- Xie, P. *et al.* (2007). A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *J. Hydrometeorol.*, 8, 607–626.



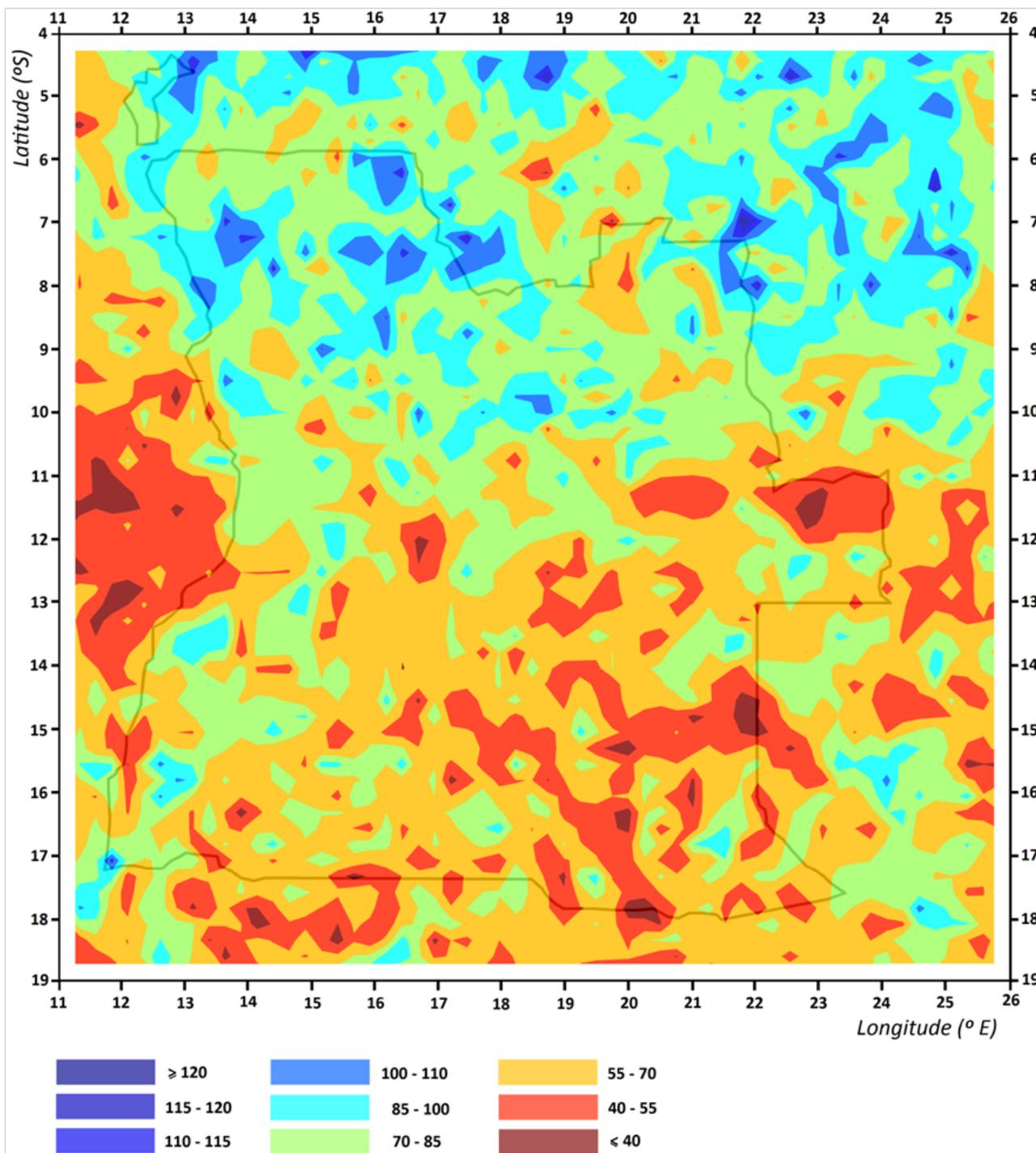
**Figura 8.** Representação gráfica da variação do quociente  $P_{3h}^{100} / P_{3h}^{10}$ .

Nota: para os casos em que não é possível interpolar, por não existirem valores superiores (ou inferiores) pode assumir-se, por aproximação, que existem valores centrais iguais ao valor da mancha em análise adicionados (ou subtraídos) de metade do intervalo imediatamente adjacente. Por exemplo, para as maiores manchas  $P_{3h}^{100} / P_{3h}^{10} \geq 1.7$  ou  $P_{3h}^{100} / P_{3h}^{10} \leq 1.3$ , pode assumir-se um valor central de 1.75 e 1.25, respectivamente.



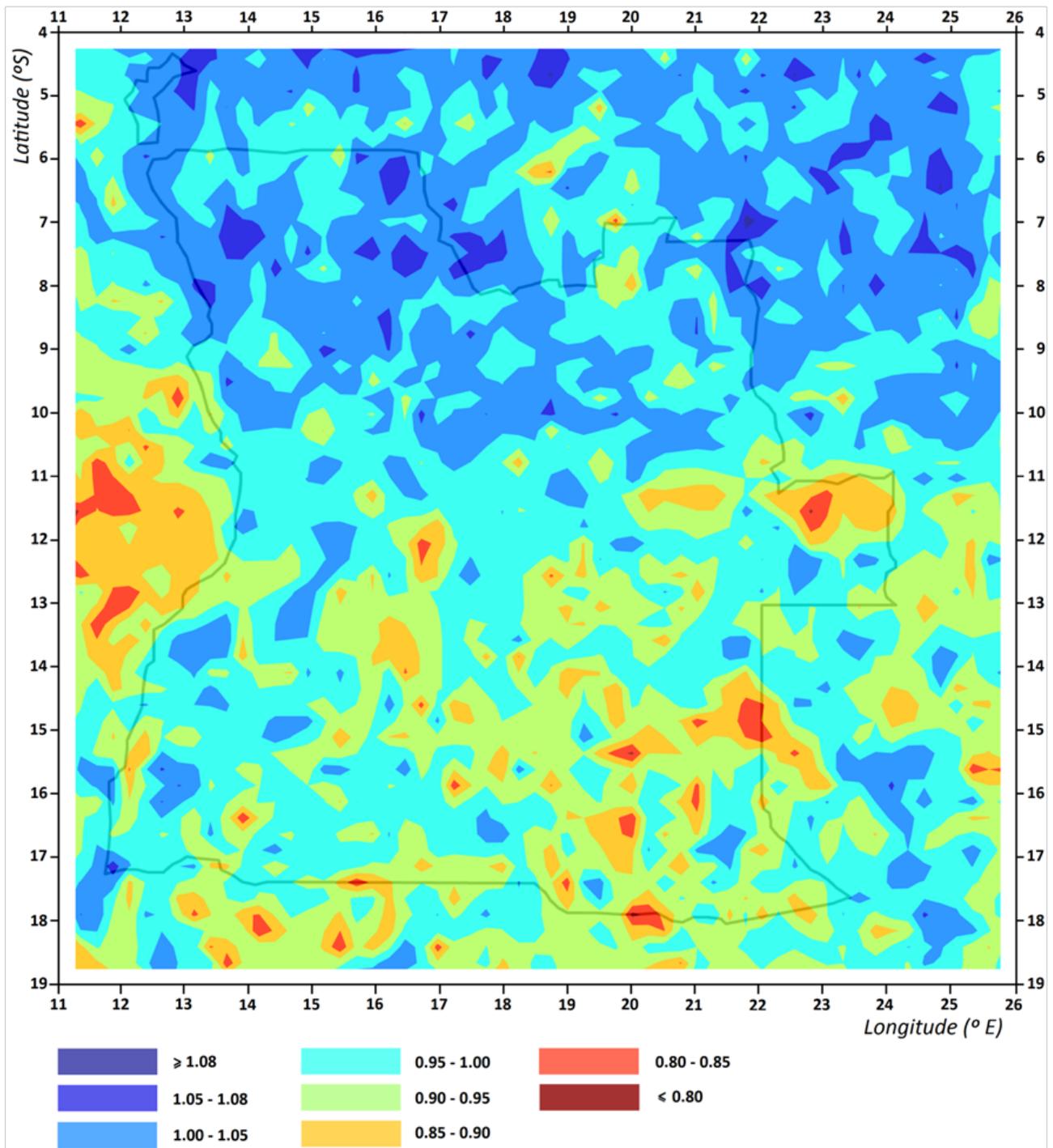
**Figura 9.** Representação gráfica da variação de  $P_{60}^{10}$ .

Nota: para os casos em que não é possível interpolar, por não existirem valores superiores (ou inferiores) pode assumir-se, por aproximação, que existem valores centrais iguais ao valor da mancha em análise adicionados (ou subtraídos) de metade do intervalo imediatamente adjacente. Por exemplo, para as maiores manchas  $P_{60}^{10} \geq 130$  ou  $P_{60}^{10} \leq 10$ , pode assumir-se um valor central de 135 e 7.5.



**Figura 10.** Representação gráfica da variação de  $a_1$ .

Nota: para os casos em que não é possível interpolar, por não existirem valores superiores (ou inferiores) pode assumir-se, por aproximação, que existem valores centrais iguais ao valor da mancha em análise adicionados (ou subtraídos) de metade do intervalo imediatamente adjacente. Por exemplo, para as maiores manchas  $a_1 \geq 120$  ou  $a_1 \leq 40$ , pode assumir-se um valor central de 122.5 e 32.5.



**Figura 11.** Representação gráfica da variação de  $b$ .

Nota: para os casos em que não é possível interpolar, por não existirem valores superiores (ou inferiores) pode assumir-se, por aproximação, que existem valores centrais iguais ao valor da mancha em análise adicionados (ou subtraídos) de metade do intervalo imediatamente adjacente. Por exemplo, para as maiores manchas  $0.80 \leq b \leq 0.85$  ou  $1.00 \leq b \leq 1.05$ , pode assumir-se um valor central de 0.825 e 1.025.