



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO E DO DIÂMETRO DAS GOTAS DA CHUVA UTILIZANDO TERMOGRAFIA POR INFRAVERMELHOS

Valdemir de Paula e Silva Junior¹ ; João L. M. P. de Lima^{2,6}; Maria Isabel Pedroso de Lima^{3,6}; Abelardo Antônio de Assunção Montenegro⁴ & João Rafael Cardoso de Brito Abrantes^{5,6}

RESUMO – Termografia por infravermelhos tem sido aplicada com sucesso em diferentes estudos hidrológicos. O objetivo deste estudo foi avaliar a utilização de termografia por infravermelhos na determinação do diâmetro médio e histograma de distribuição do diâmetro das gotas da chuva. Comparam-se os diâmetros das gotas estimados usando termografia com os medidos com um disdrômetro a laser. Os resultados foram avaliados recorrendo ao coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.

ABSTRACT– Infrared thermography has been applied successfully in different hydrological studies. The aim of this study was to evaluate the use of infrared thermography to determine the mean diameter and distribution histogram of rain drops diameter. Rain drops diameters estimated using thermography were compared to the ones measured by a laser distrometer. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient was used to analyse the results.

Palavras-Chave – Termografia por infravermelhos, precipitação, distribuição e diâmetro das gotas

1) Universidade Federal Rural de Pernambuco. Av. Dom Manuel de Medeiros, Dois Irmãos, Recife-PE, s/n, 52171-900, E-mail: depaulajr22@yahoo.com.br, Fone:+558133206264.

2) Universidade de Coimbra (DEC). Pólo II-Rua Luís Reis Santos, 3030-788, Coimbra-PT, E-mail: plima@dec.uc.pt, Fone: +351239797183

3) Universidade de Coimbra (DEC). Pólo II-Rua Luís Reis Santos, 3030-788, Coimbra-PT, E-mail: iplima@uc.pt, Fone: +351239797119

4) Universidade Federal Rural de Pernambuco. Av. Dom Manuel de Medeiros, Dois Irmãos, Recife-PE, s/n, 52171-900, E-mail:

Abelardo.montenegro@yahoo.com.br, Fone:+558133206273.

5) Universidade de Coimbra (DEC). Pólo II-Rua Luís Reis Santos, 3030-788, Coimbra-PT, E-mail: jrcbrito@msn.com, Fone: +351915051391

6) IMAR, Instituto do Mar, Coimbra-PT.

1 - INTRODUÇÃO

O poder erosivo de uma chuva não é somente função da quantidade precipitada, mas também de sua intensidade e característica física, nomeadamente a distribuição do tamanho das gotas, que interfere na energia do impacto da gota no solo, provocando o desprendimento e o salpicamento das partículas de solo, e assim dando início ao processo erosão.

O tamanho das gotas e a sua distribuição podem ser determinados utilizando várias metodologias e equipamentos disponíveis. Podem ser citados o método da mancha e.g. Hall (1970), o da farinha e.g. Hudson (1964) e o disdrômetro [e.g. Gonçalves e Massambani (2010), dentre outros. Vale destacar o monitor de precipitação a laser, disdrômetro, que permite detetar o tamanho e a velocidade de queda das gotas da chuva, bem como determinar a intensidade, quantidade e tipo de precipitação.

Este trabalho, essencialmente experimental, teve como objetivo avaliar o potencial de utilização da termografia por infravermelhos na determinação do diâmetro médio de gotas de chuvas naturais em comparação ao disdrômetro a laser.

A termografia por infravermelhos tem sido aplicada com sucesso na obtenção de imagens de alta resolução em diferentes estudos hidrológicos e.g. Schuetz *et al.* (2012); Pfister *et al.* (2010); de Lima e Abrantes (2014a e 2014b). Esta tecnologia permite visualizar e medir a temperatura superficial de objetos. A utilização de câmeras termográficas portáteis tem ganho popularidade devido ao seu fácil manuseio e ajuste do campo de visão da câmara à área de estudo.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Instalação laboratorial

A instalação laboratorial é constituída por: i) sistema de formação de gotas para calibração da técnica termográfica proposta, constituído de haste, formador de gotas (agulhas hipodérmicas) e placa de coleta (acrílico); ii) sistema de captação de chuva natural, com placa de coleta e disdrômetro a laser; e iii) sistema de registro de imagens, constituído por câmara termográfica, câmara de vídeo ótica, computador e placa de coleta (das gotas calibradas e da chuva natural).

Na coleta das gotas, foram usadas placas retangulares de acrílico com 300×150 mm² de área e 3 mm de espessura. As placas foram pré-aquecidas numa estufa de aeração forçada, a uma temperatura de 70 °C, e as mesmas eram retiradas imediatamente antes da realização de cada coleta, que era feita movimentando a placa de acrílico de forma a evitar o acúmulo de gotas no mesmo local (Figura 1).

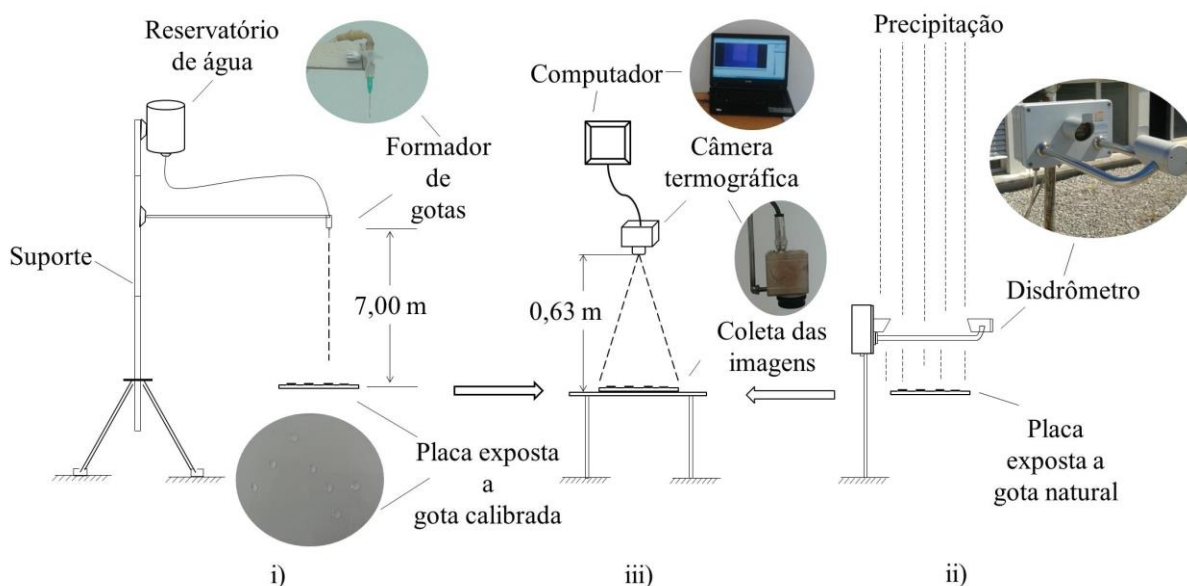


Figura 1 – Esboço do procedimento experimental utilizado: i) fase de calibração; ii) amostragem da chuva natural; e iii) registro das imagens termográficas.

Como todo corpo emite radiação infravermelha, a termografia permite distinguir a temperatura da superfície das placas e da água da chuva coletada.

Os registros térmicos da superfície das placas foram obtidos com uma câmara de infravermelho portátil PI160 (Optris GmbH) com resolução ótica de 160×120 pixels, resolução térmica de $0,1^\circ\text{C}$, precisão térmica de $\pm 2\%$ e frequência de captação de imagens de 100 Hz

Os registros correspondem a valores de temperatura observada nos vários pixels, onde cada pixel, representa uma mancha termográfica com área de $6,47 \text{ mm}^2$. Essa área está relacionada com o número de pixels definido, relativamente às dimensões da placa de acrílico ($300 \times 150 \text{ mm}^2$).

2.2 - Calibração termográfica

Para calibração da técnica termográfica é necessário relacionar o diâmetro das gotas com a área das manchas térmicas “assinaturas” formadas pelo impacto dessas gotas nas placas de coleta. O impacto das gotas (temperatura ambiente) nas placas de coleta pré aquecidas origina a formação de manchas térmicas, que podem ser registradas utilizando a câmara termográfica e medidas através da visualização dos registros térmicos com *software* próprio (PI Connect da Optris GmbH).

Esta relação foi estabelecida utilizando gotas calibradas (diâmetro conhecido), formadas utilizando o sistema apresentado na Figura 1-i), que consiste no gotejamento de água através de agulhas hipodérmicas com diâmetros de abertura de 2,0 mm, 1,2 mm, 0,9 mm e 0,8 mm.

Para calcular os diâmetros das gotas calibradas utilizou-se o método volumétrico. Foram recolhidas e pesadas amostras de cem gotas formadas por cada agulha e, assumindo a esfericidade das gotas, calculou-se o seu diâmetro de acordo com:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \times m}{\pi \times \rho}}$$

(1)

onde D é o diâmetro médio das gotas (mm), m é a massa média das gotas (mg) e ρ é a massa específica da água (mg/mm³).

2.3 – Coleta e análise da precipitação natural

No âmbito da validação da técnica termográfica, foram coletadas, nas placas de acrílico pré-aquecidas, 6 amostra de chuva natural, do tipo frontal. As coletas foram realizadas no exterior do Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Universidade de Coimbra, durante o dia 24 de Abril de 2014.

A validação da técnica termográfica foi feita comparando os diâmetros das gotas estimados usando a termografia com os medidos no mesmo instante pelo disdrômetro a laser. A coleta com as placas pré-aquecidas foi realizada próxima do disdrômetro, com um tempo de exposição à chuva de, aproximadamente, dois segundos. O disdrômetro possui registos contínuos com resolução temporal de um minuto e identifica o número de gotas por intervalos de diâmetro, entre 0,16 e 7,00 mm.

Por sofrerem uma redução de temperatura ao serem expostas ao ambiente externo, as placas de coleta de chuva natural apresentaram temperaturas médias inferiores às das placas de coleta usadas na calibração em ambiente de laboratório. Assim, foi necessário corrigir os registos de temperatura obtidos nas placas de coleta das chuvas naturais. Essa correção correspondeu à diferença entre a média da temperatura registada nas placas usadas na calibração (aproximadamente 50 °C) e a média da temperatura de cada placa usada na amostragem das gotas das chuvas naturais (variou de amostra para amostra). Desta forma foi possível utilizar para a chuva natural a mesma relação entre o diâmetro das gotas e a área das manchas térmicas determinada na calibração.

2.4 - Avaliação de desempenho da técnica termográfica

Para avaliar a eficiência da técnica termográfica e a pertinência da curva de calibração, foi utilizado o Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970), adotado por e.g. Montenegro e Ragab (2010), de acordo com:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (d_{sim(i)} - d_{obs(i)})^2}{\sum_{i=1}^N (d_{obs}^* - d_{obs(i)})^2} \quad (2)$$

onde $d_{sim(i)}$ é a frequência relativa das gotas obtidas pela técnica termográfica, para cada intervalo de diâmetro (i) , $d_{obs(i)}$ é a frequência relativa das gotas obtidas pelo disdrômetro, nos mesmos intervalos de diâmetro e d_{obs}^* é frequência relativa média das gotas obtidas pelo disdrômetro.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode variar de $-\infty$ a 1. Uma eficiência de 1 ($NSE=1$) corresponde a um ajuste perfeito dos dados modelados aos dados de referência.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos termogramas é claramente perceptível a identificação de manchas térmicas com cores diferentes, que são a “assinatura” das gotas com diâmetros diferentes, coletadas nas placas pré-aquecidas. Isto observa-se tanto para as manchas originadas pelas gotas geradas com as agulhas, como para as oriundas da precipitação natural (Figura 2). As manchas térmicas identificam temperaturas mais baixas do que as observadas no restante da superfície das placas.

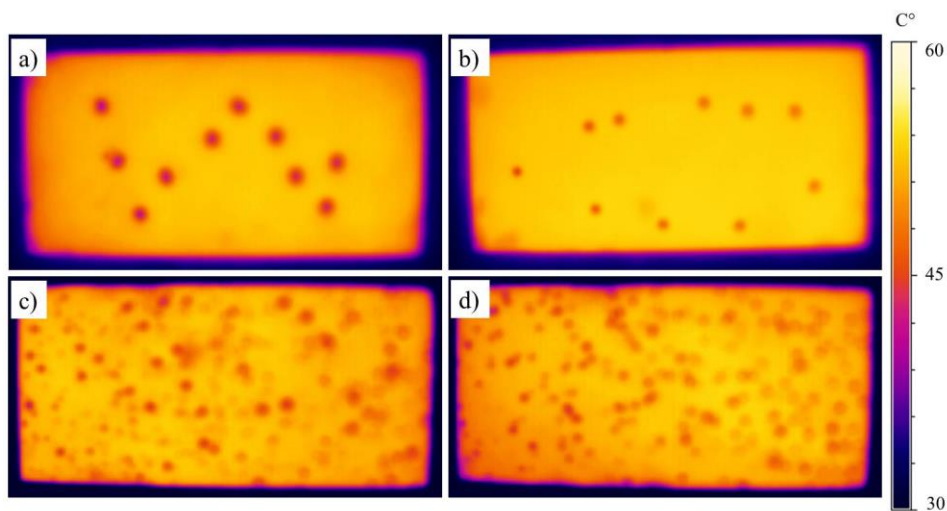


Figura 2 – Termogramas da superfície das placas para dois cenários de calibração, com a utilização das agulhas hipodérmicas e dois com coleta de chuva natural: a) gotas formadas pela agulha de 2,0 mm de diâmetro; b) gotas

formadas pela agulha de 0,8 mm de diâmetro; c) gotas formadas pela chuva natural da primeira coleta; e d) gotas formadas pela chuva natural (segunda coleta).

A Figura 3 apresenta uma representação em 3D da temperatura das placas em acrílico com as manchas térmicas criadas pelo impacto das gotas geradas pelas agulhas (Fig. 3a) e das gotas da chuva natural (Fig. 3b). Pode-se notar que a técnica termográfica permite uma adequada visualização da distribuição espacial das manchas térmicas na superfície das placas de acrílico.

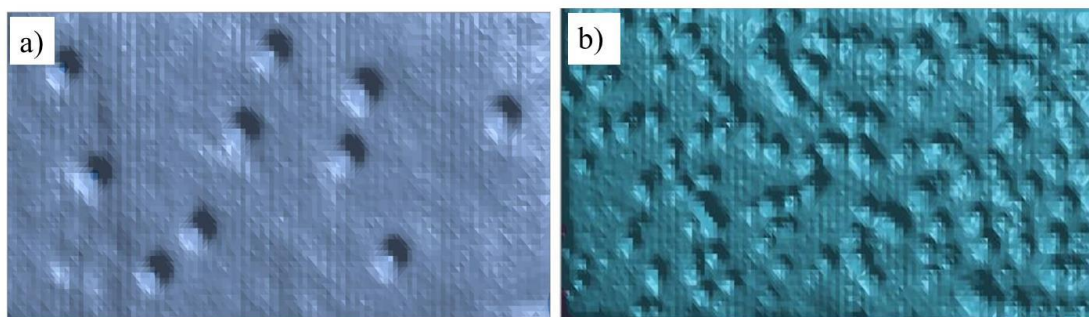


Figura 3 – Visualização em 3D dos termogramas da superfície das placas aquecidas após as coletas de gotas: a) gotas formadas por agulhas de 1,2 mm; e b) gotas de chuva natural, provenientes da amostra representada na Fig. 3b.

Na Figura 4 é apresentada a relação entre os diâmetros médios das gotas geradas com as agulhas, calculados pelo método volumétrico, e a área da mancha térmica gerada pelo impacto das gotas nas placas de coleta pré-aquecidas.

Verifica-se um bom ajuste linear dos valores das manchas termográficas e dos valores dos diâmetros médios das gotas, com $R^2 = 0,97$.

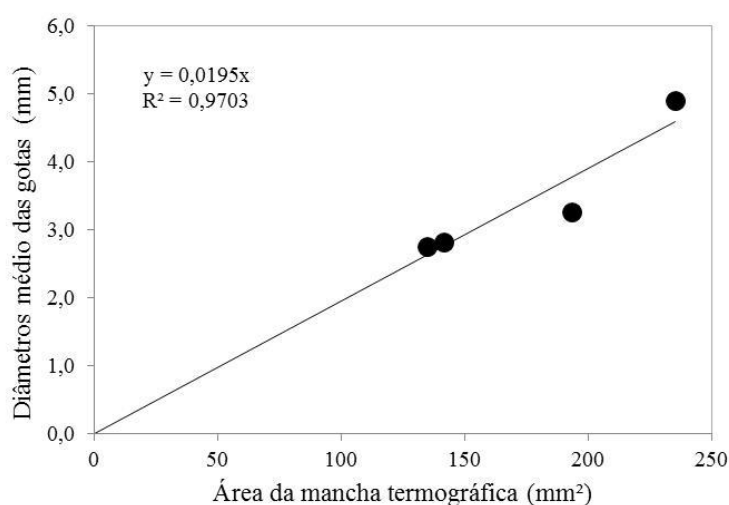


Figura 4 – Relação entre a área das manchas termográficas e o diâmetro médio das gotas, para as chuvas simuladas com agulhas hipodérmicas: modelo linear, equação de regressão linear e coeficiente de determinação de ajuste (R^2).

A equação de calibração apresentada na Figura 4 permitiu transformar os valores das áreas das manchas térmicas originadas pela chuva natural nas placas de coleta, em diâmetros de gotas da chuva. Os valores de diâmetros foram agrupados em classes, de acordo com as classes identificadas pelo disdrômetro, e os resultados foram analisados com base na frequência relativa.

Os histogramas de distribuição dos diâmetros das gotas determinados pelo disdrômetro e pela técnica termográfica, de seis amostras de chuva natural coletadas em diferentes instantes de tempo, são apresentados e comparados na Figura 5.

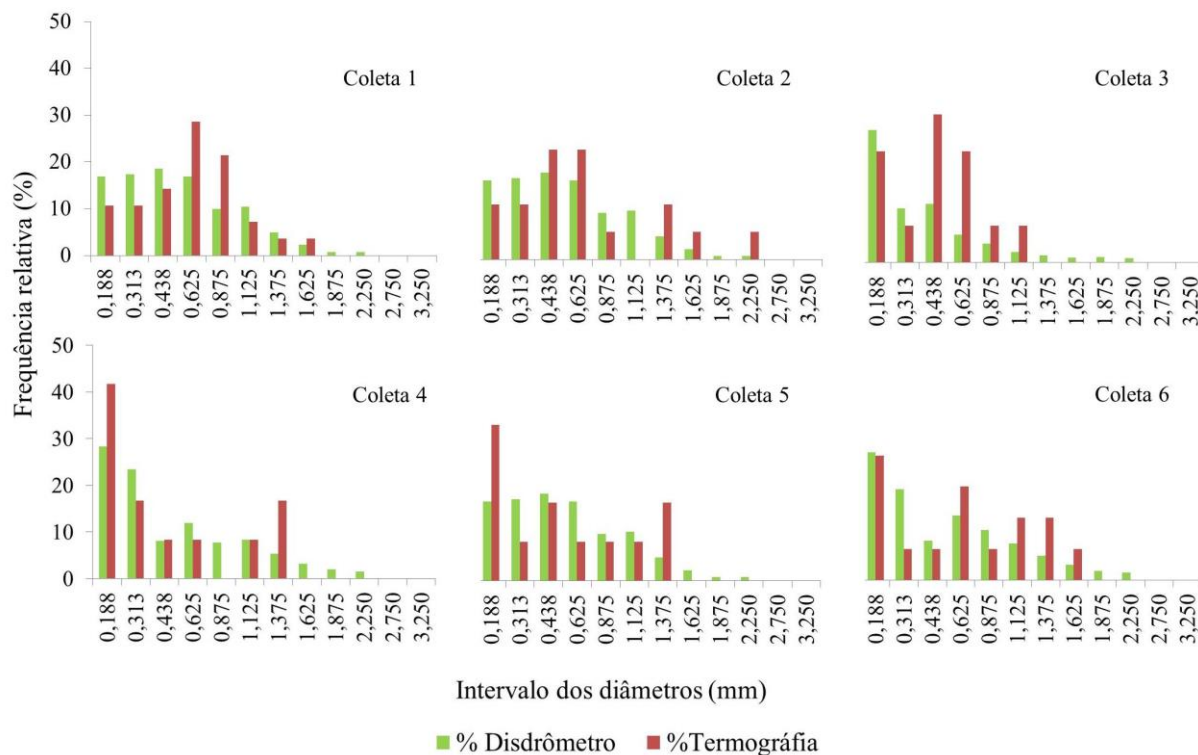


Figura 5 – Frequências relativas das classes dos diâmetros das gotas, para seis amostras de chuva natural, fornecidos pelo disdrômetro e pela termografia.

Na Tabela 1 são apresentados os valores dos diâmetros médios registrados pelo disdrômetro e pela técnica termográfica, bem como os valores obtidos pelo modelo de Nash-Sutcliffe (*NSE*). Na avaliação do desempenho da técnica termográfica, na determinação do diâmetro e distribuição das gotas das coletas 1, 2, 4 e 6 de chuva natural, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (*NSE*), apresentou valores superiores a 0,6, o que indica um bom desempenho da termografia. A aplicação da técnica termográfica ao estudo das coletas 3 e 5 apresentou um desempenho inferior, com valores de *NSE* inferiores a 0,4.

Tabela 1 – Diâmetro médio das seis amostras da precipitação natural (ver Figura 5) obtidas pelo disdrômetro e termografia e valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe.

Amostras	DDL	DT	NSE
1	0,65	0,67	0,61
2	0,66	0,75	0,66
3	0,56	0,50	0,17
4	0,60	0,54	0,63
5	0,61	0,60	0,39
6	0,67	0,76	0,70

DDL – diâmetro médio medido com o disdrômetro; DT – diâmetro médio estimado com a técnica termográfica; NSE – Coeficiente de Nash-Sutcliffe, tendo-se analisado a frequência relativa para cada classe dos diâmetros obtidos pelos dois métodos (Fig. 5).

Na Figura 6 apresenta-se o resultado da análise de frequência baseada em uma amostra composta pelas seis amostras individuais referidas anteriormente (ver Fig. 5). O desempenho da técnica termográfica na estimativa dos diâmetros das gotas de chuva coletadas foi adequado, obtendo-se um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,77.

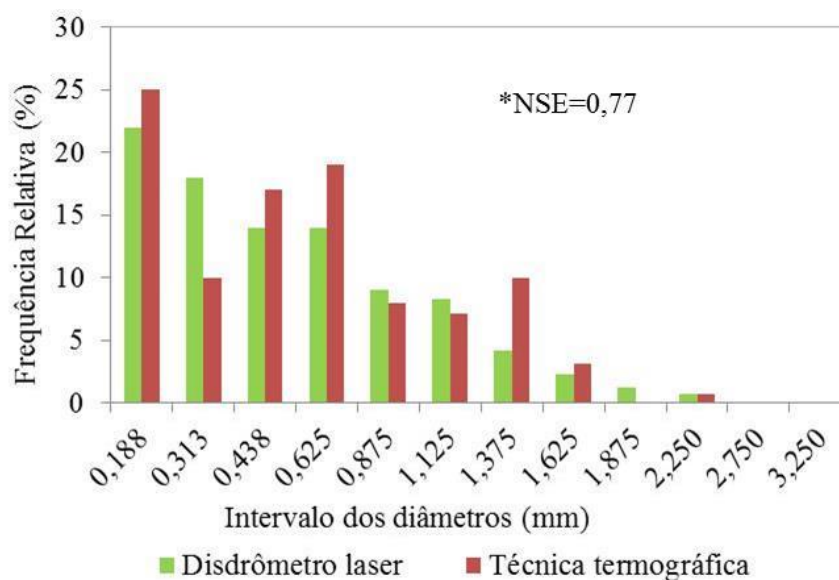


Figura 6. Frequências relativas das classes de diâmetros das gotas de chuva natural, para a amostra composta pelas seis amostragens individuais analisadas na Fig. 5. (*) Obteve-se NSE=0.77 estimado pela técnica termográfica e pelo disdrômetro.

4 - CONCLUSÕES

- A aplicação da técnica da termografia por infravermelho ao estudo do tamanho de gotas de chuva natural permitiu estimar o diâmetro médio e os histogramas das gotas, mediante a comparação com valores do diâmetro médio das gotas obtidos com formadores de gotas, no âmbito do processo de calibração da técnica;
- O modelo de Nash-Sutcliffe foi usado para avaliar o desempenho da técnica termográfica proposta na estimativa do diâmetro das gotas, relativamente ao disdrômetro no estudo de seis amostras de chuva obtiveram-se valores de Nash-Sutcliffe superiores a 0,6 para as amostras 1, 2, 4 e 6 e inferiores a 0,4 para as amostras 3 e 5.
- A técnica termográfica, que carece de calibração, mostrou ser de aplicação rápida e fácil. A relativa maior facilidade de manuseio do equipamento necessário e o menor tempo despendido na análise em comparação com outras técnicas fazem deste procedimento uma alternativa interessante.

5 - AGRADECIMENTOS

O trabalho experimental descrito neste estudo foi realizado no Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Portugal). O primeiro autor agradece a CAPES pela concessão da Bolsa de PDSE (1156-10-3). Esta pesquisa foi apoiada pelo programa de bolsas para Pesquisador Visitante Especial do programa brasileiro de mobilidade científica, Ciência sem Fronteiras, financiado pelo CNPq, de que usufrui o segundo autor.

6 - BIBLIOGRAFIA

DE LIMA, J.L.M.P. & ABRANTES, J.R.C.B. (2014a). “*Can infrared thermography be used to estimate soil surface microrelief and rill morphology?*”. *Catena*, v. 113, pp. 314 - 322

DE LIMA J.L.M.P. & ABRANTES J.R.C.B. (2014b). “*Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities*”. *Earth Surface Processes and Landforms* DOI: 10.1002/esp.3523

GONÇALVES, F. L. T.; MASSAMBANI, O. (2010). “*Uma análise do coeficiente de remoção de poluentes em função do espectro de gotas de chuva em diferentes localidades no Brasil e Alemanha*”. *Quim. Nova* v. 33, n. 5, 1027 – 1033

HALL, M. J. (1970). *Use of the stain method in determining the drop- size distribution of coarse liquid spray*. Transaction of the ASAE, v. 13, n. 1, p. 33-37.

HUDSON, N. W. (1964). “*The flour pellet method for measuring the size of raindrops, Department of conservation,*” Research Bulletin, Salisbury, n.4.

MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. (2010). “*Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios:a modelling study.*” Hydrol. Process v.24, pp. 2705 – 2723

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). “*River flow forecasting through conceptual models, Part I—a discussion of principles*”. Journal of Hydrology v 10(3): p. 282 – 290.

PFISTER, L.; MCDONNELL, J.J.; HISSLER, C. & HOFFMAN, L. (2010). “*Ground-based thermal imagery as a simple, practical tool for mapping saturated area connectivity and dynamics*”. Hydrological Processes v. 24, n. 21, pp.3123 - 3132

SCHUETZ, T.; WEILER, M.; LANGE, J. & STOELZLE, M. (2012). “*Two-dimensional assessment of solute transport in shallow waters with thermal imaging and heated water.*” Advances in Water Resources v. 43, p 67 - 75