

## MONITORIZACIÓN DE LA INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN EN MONTAÑA MEDIANTE DISDRÓMETRO ÓPTICO

Marta ANGULO-MARTÍNEZ<sup>1</sup>, Roberto SERRANO NOTIVOLI<sup>1,2</sup>,  
José Luis Collado<sup>3</sup>, Javier ALASTRUÉ<sup>3</sup>, Samuel BUISÁN<sup>3</sup>, Santiago BEGUERÍA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Zaragoza.

<sup>2</sup> Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón (IUCA), Universidad de Zaragoza.

<sup>3</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Zaragoza.

[marta.angulo@eead.csic.es](mailto:marta.angulo@eead.csic.es), [rserrano@eead.csic.es](mailto:rserrano@eead.csic.es), [jcolladoa@aemet.es](mailto:jcolladoa@aemet.es), [jalastruet@aemet.es](mailto:jalastruet@aemet.es),  
[sbuisans@aemet.es](mailto:sbuisans@aemet.es), [santiago.begueria@csic.es](mailto:santiago.begueria@csic.es)

### RESUMEN

Los disdrómetros ópticos son aparatos capaces de caracterizar la distribución de frecuencias del tamaño y velocidad de los hidrometeoros, abriendo nuevas posibilidades en el estudio de la precipitación. Se presentan las primeras mediciones disdrométricas tomadas por OTT Parsivel de la precipitación en el Pirineo Central, a 1.800 msnm. La instalación cuenta con dos disdrómetros ubicados a 3 metros sobre el suelo, separados entre sí 2 m. y en orientaciones N-S y E-O. La estructura se ubica en un área experimental de monitorización hidro-meteorológica situada en la estación de esquí Aramon-Formigal y enmarcada en el proyecto internacional SPICE (Solid Precipitation InterComparison Experiment). Las mediciones de los disdrómetros se han comparado con las registradas por un pluviómetro de pesada ubicado a 20 metros de distancia y calibrado según el Patrón Internacional de Medida (doble vallado de madera + pluviómetro de pesada). El presente trabajo evalúa las medidas de intensidad y volumen acumulado de precipitación obtenidas con los disdrómetros en comparación con las del pluviómetro de referencia, con el fin de determinar el efecto del viento en eventos de diferentes intensidades y tipos de meteoro (nieve y lluvia).

**Palabras clave:** disdrómetro; pluviómetro; precipitación; viento; proyecto SPICE.

### ABSTRACT

Optical disdrometers are meteorological devices designed for characterizing the size and velocity characteristics of hydrometeors. This information opens new possibilities for precipitation research. In this article we present initial OTT Parsivel disdrometric records taken in the Pyrenees, at 1800 m.a.s.l. The monitoring site includes two disdrometers, installed 3m over the ground. The disdrometers are 2 m apart from each other covering all cardinal points (N-S, E-W). The monitoring site, placed at the ski station Aramon-Formigal, is included in an experimental hydrometeorological monitoring area installed for the international project SPICE (Solid Precipitation InterComparison Experiment). Disdrometer measurements have been compared with pluvio measurements taken 20 m. apart and calibrated according to the International

Measurement design (double-fenced wood enclosure + weighing rain gauge). Here we evaluate different disdrometer measurements in comparison with the pluviometer ones, in order to evaluate the effect of wind during events of different intensities and type of meteor (snow and rain).

**Key words:** disdrometer; pluviometer; precipitation; wind; SPICE project.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los disdrómetros ofrecen información sobre la distribución de tamaños y velocidades, la forma, y la energía cinética de las partículas correspondientes a los distintos hidrometeoros, tales como gotas de lluvia, copos de nieve, granizo, etc. Esta información tan completa sobre la precipitación es muy importante y transversal para varios campos científicos así como para aplicaciones comerciales e industriales. Algunos ejemplos incluyen: la teledetección de la precipitación, la meteorología y climatología, los modelos climáticos, modelos numéricos y de incertidumbre aplicados al radar meteorológico y/o la detección de la precipitación por satélite, así como aplicaciones dentro del ámbito agronómico y de erosión y conservación del suelo.

La medición precisa de la precipitación es, sin duda, un objetivo compartido por varios campos científicos, debido a que de ello depende una buena determinación y evaluación del balance hídrico de los diferentes sistemas, así como de las posibilidades de abastecimiento. Por ello, las técnicas instrumentales avanzan al servicio de mejorar la medición de esta variable tan importante. En el caso de los disdrómetros, su diseño conceptual responde a varios objetivos científicos. En primer lugar se trata de responder a la curiosidad científica acerca de cómo se distribuyen los tamaños de las gotas dependiendo del tipo de lluvia. En este sentido, Lowe (1892) publicó un trabajo seminal, seguido por otros más centrados en el potencial erosivo de la precipitación (Ellison, 1945) o en la relación entre hidrometeoros y las observaciones del radar meteorológico (Marshall *et al.*, 1947). Ambos objetivos científicos fueron de la mano, confluyendo en las primeras publicaciones sobre la distribución de los tamaños de gota en relación con la intensidad de la precipitación (Laws and Parsons, 1943). En el ámbito de la erosión del suelo resulta necesario determinar la capacidad de la precipitación para desagregar y movilizar partículas de suelo, a través de la energía cinética de las gotas. En este aspecto se unen los campos meteorológico, climatológico, edafológico, agronómico y ambiental.

A partir del desarrollo de la teledetección de la precipitación, en primer lugar por la aplicación del radar con fines meteorológicos y más tarde a partir de estimación de la precipitación por satélite, se hizo necesario determinar la relación existente entre la intensidad de la precipitación en superficie ( $R$ ) y la reflectividad de la señal del radar ( $Z$ ) debida a los hidrometeoros suspendidos en la atmósfera. En este sentido interesa también el carácter discreto de la precipitación, en especial la forma, tamaño y velocidad de los meteoros. Mientras que el radar es una medida indirecta, los disdrómetros proporcionan una medida directa de la distribución del tamaño y velocidad de los meteoros, a partir de la cual se puede clasificar el tipo de meteoros y derivar cantidades integradas como la intensidad de la precipitación. Con este objetivo se han desarrollado los modernos disdrómetros, especialmente los de tipo óptico, haciéndolos además relativamente accesibles como sistemas de medición meteorológica estandarizados.

Los disdrómetros no están exentos de errores asociados a su medición, siendo el viento uno de los principales factores que influyen en la precisión de la medición (Nespor *et al.*, 2000). La influencia del viento es también conocida en otros dispositivos como los pluviómetros de balancín o de pesada, resultando generalmente en una subestimación de la precipitación, en especial en eventos de nieve (Tapiador *et al.*, 2012; New *et al.*; 2000). Existe, pues, gran incertidumbre y sesgo en la medición de la precipitación, particularmente en forma de nieve, que debe ser cuantificada adecuadamente con el fin de evitar que afecte a la determinación del balance hídrico, al análisis de cambio climático, la calibración de algoritmos de teledetección, etc. En este sentido, la Organización Meteorológica Mundial puso en marcha una serie de experimentos de inter-comparación a nivel internacional, en especial para la precipitación sólida, entre los que destaca el [proyecto SPICE](#) (Goodison *et al.*, 1988; 1992). Se establece así un método de medición de referencia consistente en un pluviómetro de pesada colocado dentro un doble vallado de madera que lo aísla del efecto del viento (Golubev, 1985; Golubev *et al.*, 1989). Existen en la actualidad unas 25 estaciones de este tipo en 13 países.

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) se unió a este proyecto durante el invierno 2013-2014 a través del Departamento de Infraestructura, el Servicio de Observación y Sistemas Básicos de la Delegación Territorial de Aragón y con la ayuda del personal de la estación de esquí de Aramón-Formigal, instalándose una estación experimental de inter-comparación de sistemas de medida en la zona de Formigal-Sarrios. En el invierno 2014-2015 la estación ya contaba con el patrón internacional de medida de referencia (DFAR), junto con la estructura de doble vallado (Fig. 1). Actualmente la instalación cuenta con varios sensores de diversos fabricantes con el fin de cuantificar el error de medición asociado a varios parámetros, entre ellos el viento y la temperatura. Recientemente, el grupo de Erosión y Evaluación de Suelo y Agua de la Estación Experimental de Aula Dei (EEAD-CSIC) ha instalado dos disdrómetros OTT Parsivel (Fig. 1).

Este trabajo presenta las mediciones obtenidas con los disdrómetros OTT Parsivel durante 4 eventos de precipitación recogidos durante el mes de marzo de 2016, en comparación con la medida de referencia (DFAR).



Fig. 1: Instalación de los disdrómetros OTT Parsivel en la estación de esquí de ARAMON-Formigal, con el doble vallado del patrón internacional de medida de la precipitación al fondo.

## 2. MÉTODOS

Se utilizaron datos de 4 eventos de precipitación ocurridos en marzo de 2016, muestreados con una frecuencia minutar. Como valores de referencia se utilizaron los datos registrados mediante un pluviómetro totalizador de pesada (OTT Pluvio<sup>2</sup>) ubicado en el interior del doble vallado (patrón internacional de referencia DFAR). Este pluviómetro reduce las fuentes de error como la saturación en momentos de elevada intensidad de precipitación y tiene mejor capacidad para cuantificar la precipitación sólida (nieve). Se utilizaron asimismo los datos de dos disdrómetros OTT Parsivel orientados en direcciones E-O (P1) y N-S (P2) con el fin de evaluar el efecto de la intensidad y la dirección del viento en la precisión de la medida. Estos disdrómetros están dotados de dos cabezales, uno de los cuales es un emisor láser infrarrojo y el otro un receptor que mide la atenuación producida en el haz lumínico por las partículas que lo atraviesan (Löffler-Mang y Joss, 2000). A partir de esta información deriva el tamaño, velocidad y tipología de los metoros, basándose en la relación diámetro-velocidad de Gunn y Kinzer (1949). De estas medidas se derivan a su vez otras como la intensidad de la precipitación, el volumen de agua por volumen de aire, la visibilidad o la reflectividad de radar, entre otras. La velocidad y dirección del viento se registraron a una altura de 10 m mediante una anemo-veleta.

Se evaluó la influencia cuantitativa del viento, tanto en dirección como velocidad, a través de gráficos de dirección e intensidad para cada fase del evento. Se realizó un análisis descriptivo seleccionando un total de cuatro eventos acaecidos durante el mes de marzo de 2016, correspondiendo tres de ellos a precipitación en forma de nieve y uno a lluvia. En el último caso registraron datos ambos disdrómetros, mientras que en los restantes solo uno de ellos (P1) fue operativo. La selección de los eventos, así como su inicio y final, se determinó a partir de los datos del pluviómetro. Finalmente, se utilizó un modelo de regresión lineal para determinar el efecto del viento (dirección y velocidad) en la medición de la intensidad de la precipitación. La variable dirección de viento, se ha expresado con el valor absoluto de la función del seno aplicada al ángulo de la dirección del viento. Los valores -1 y 1 corresponden a la dirección W-E del disdrómetro.

## 3. RESULTADOS

Los eventos de precipitación analizados y su tipología, caracterizada por el disdrómetro, se muestran en la Tabla 1:

Evento	Inicio	Fin	Tipo
1	02/03/2016 7:00	03/03/2016 19:30	Nieve
2	05/03/2016 1:00	06/03/2016 6:00	Nieve
3	09/03/2016 8:00	10/03/2016 13:00	Nieve
4	26/03/2016 22:30	27/03/2016 05:30	Lluvia

*Tabla 1: Eventos de precipitación analizados.*

Las figuras 2 y 3 muestran las series temporales de intensidad de precipitación y la precipitación acumulada durante los eventos 1 (precipitación en forma de nieve) y 4 (precipitación líquida). Los eventos se dividieron en fases en función de puntos de ruptura en la correspondencia o diferencia de la medición, así como en función de cambios en la velocidad del viento.

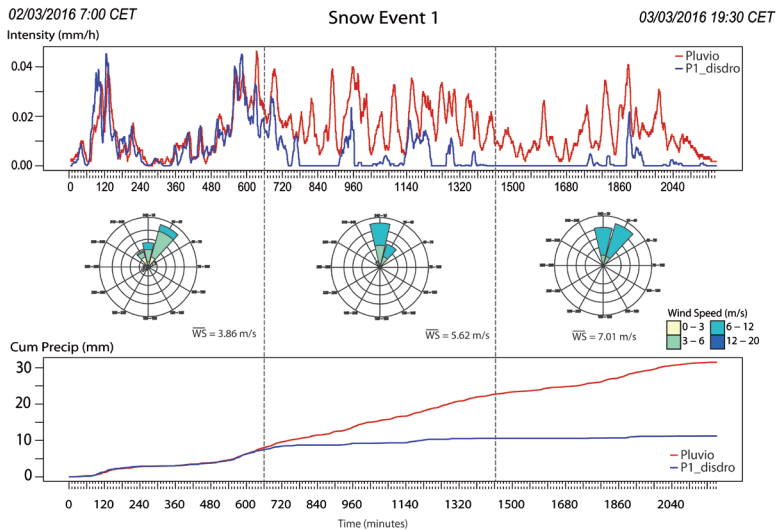


Fig. 2: Series temporales de intensidad de precipitación y precipitación acumulada, junto con las rosas de los vientos que muestran la dinámica del mismo durante el evento 1 (nieve).

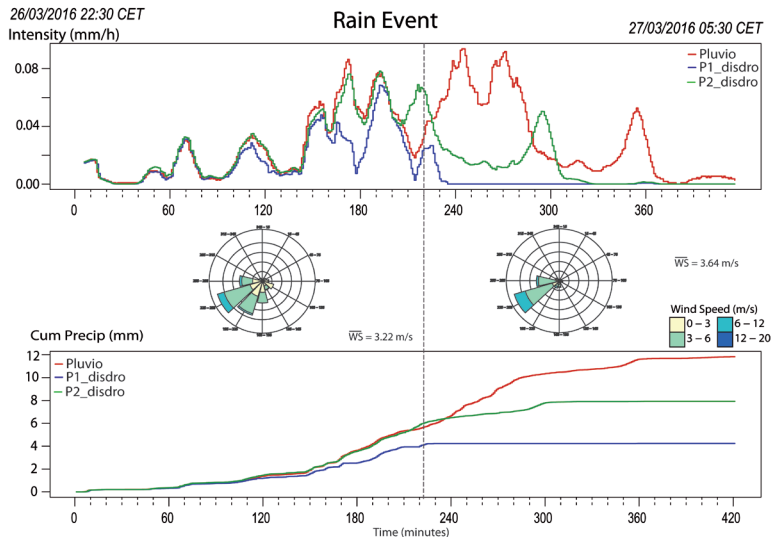


Fig. 3: Como la Figura 2, para el evento 4 (lluvia).

En los cuatro eventos se constató una subestimación de la intensidad y volumen total de la precipitación por parte del disdrómetro, proporcional a la intensidad del viento (Figura 2). La influencia de la dirección del viento se comprueba en el evento 4 (Figura 3), en el que el disdrómetro con orientación N-S (P2), más perpendicular a la dirección del viento SO-NE, registra más precipitación que el orientado E-O (P1).

Con el fin de cuantificar la influencia del viento en la medida de intensidad de la precipitación y proporcionar unos coeficientes que permitan una corrección se ajustó un modelo lineal entre los datos minutales de precipitación recogida con ambos sensores (N=2130) introduciendo en el modelo el tipo de precipitación (lluvia o nieve). La variable respuesta es el pluviómetro de referencia (Pluvio, mm h<sup>-1</sup>) y las variables independientes descriptivas son la precipitación, en forma de lluvia o nieve, registrada por el disdrómetro (P1, mm h<sup>-1</sup>), la velocidad del viento (WVEL, m s<sup>-1</sup>), y la dirección del viento (WDIR) expresada con el valor absoluto a partir de una función seno en la que los valores -1 y 1 coinciden con W-E, que es la dirección del disdrómetro. Esta transformación de la variable, recogida en grados, equivale a expresar la dirección del viento en relación con la orientación del sensor, cuando el viento es paralelo = 1 y vale 0 cuando es perpendicular. Asimismo, como variable independiente, se introdujo también la interacción entre la velocidad y la dirección del viento. El modelo tiene un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> = 0.70, una significación global de p-value = 0.001, siendo todas las variables significativas. El error medio es  $\varepsilon \sim N(0, \sigma = 0.01711)$ . Al haber introducido el tipo de precipitación resulta en 2 modelos que tienen la siguiente forma:

$$\text{Pluvio\_nieve} = 0.4616829 * P1 + 0.0036459 * WVEL + 0.0206645 * WDIR - 0.0046527 * (WVEL * WDIR) + \varepsilon$$

$$\text{Pluvio\_lluvia} = 0.7799376 * P1 + 0.0036459 * WVEL + 0.0206645 * WDIR - 0.0046527 * (WVEL * WDIR) + \varepsilon$$

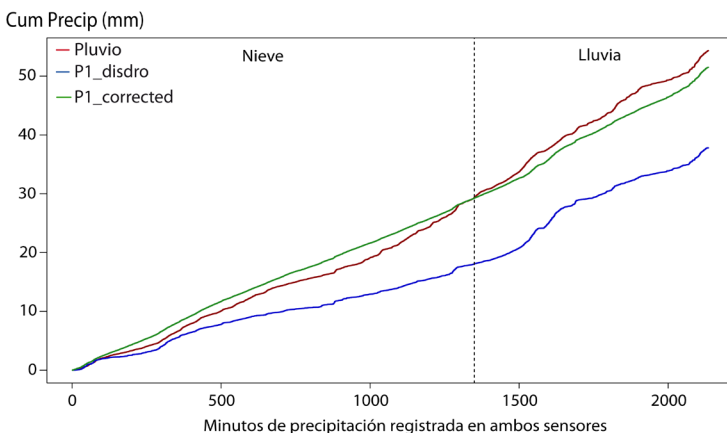


Fig. 4: Precipitación acumulada durante los cuatro eventos de precipitación, por sensor. Las líneas muestran la evolución del pluviómetro de pesada (Pluvio, en rojo), el disdrómetro 1 (P1\_disdro, en azul) y la serie corregida a partir de los coeficientes del modelo lineal (P1\_corrected, en verde).

La figura 4 muestra la evolución de la precipitación acumulada de la serie combinada con todos los eventos cuando ambos sensores recogieron precipitación. Durante los 2130 minutos de precipitación analizados, el pluviómetro registró un total de 54.34 mm, mientras que el disdrómetro , P1, recogió 37.80 mm. La serie corregida muestra una precipitación acumulada de 51.50 mm, muy próxima al valor del pluviómetro de referencia.

La figura muestra como el modelo sobreestima ligeramente la precipitación en forma de nieve y subestima la precipitación en forma de lluvia. Esto explica el valor de los coeficientes, más alto para lluvia que para nieve.

#### 4. DISCUSIÓN

La medición de la intensidad y volumen de precipitación mediante disdrómetros ópticos se ve afectada de manera importante por el efecto del viento, que produce un sesgo (subestimación) muy relevante. Este sesgo es proporcional a la velocidad del viento y a su dirección en relación con la orientación del sensor. El análisis presentado en este estudio es preliminar e introductorio, debido a la escasez de datos, como consecuencia de la reciente instalación de los sensores así como fallos técnicos que solo han permitido seleccionar unos pocos eventos. Este hecho limita los resultados, y será necesaria una mayor cantidad de eventos para inferir resultados más concluyentes. Aun así resulta evidente la subestimación registrada por el disdrómetro, que es de un 59% sobre el total de precipitación medida por el pluviómetro. Cuando ambos sensores registran precipitación la subestimación del disdrómetro es de un 30%. La subestimación de la precipitación por efecto del viento es conocida (Tapiador *et al.*, 2012; Nespor *et al.*, 2000), y por ese motivo resulta necesaria la utilización de protectores de viento.

En este estudio no se ha analizado cómo afecta el viento a la distribución de los tamaños de gota y por qué existe una mayor correspondencia entre sensores al inicio del evento de precipitación que según se avanza en el mismo. Las observaciones de la distribución de los tamaños de gota revelan que al comienzo de los eventos las partículas son de mayor tamaño en general (Van Dijk *et al.*, 2002), y según avanza se tiende a tamaños más pequeños. Las partículas más pequeñas se ven más afectadas por flujos de turbulencia y viento, pudiendo explicar la diferencia en los valores observados a lo largo del evento.

La distancia entre los sensores y las leves diferencias en altura influyen en las diferencias de medición, ya demostrado por Heberden (1769) y más recientemente por Ciach (2003), quien encontró diferencias en las mediciones obtenidas por 15 pluviómetros colocados en una matriz cuadrada con distancias de 8 m entre los sensores. La subestimación depende también del tipo de sensor y su calibración (New *et al.*, 2000), a lo que hay que añadir la variabilidad natural asociada a la precipitación y los flujos atmosféricos.

En cualquier caso, el esfuerzo por cuantificar y corregir las mediciones de precipitación permitirá una mejora, no solo del conocimiento de la variable, sino también de la estimación de los balances hídricos y modelos de cambio climático, entre otras muchas aplicaciones.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo agradecen a la AEMET el habernos permitido instalar sensores en el campo de pruebas Formigal-Sarrios, los datos de referencia utilizados en este trabajo, y la ayuda prestada. También agradecemos la colaboración de la estación de esquí ARAMÓN-Formigal. Este trabajo ha contado con financiación del proyecto DISDROPEC: CGL2011-24185. El trabajo de M. Angulo-Martínez ha sido posible gracias a un contrato postdoctoral del programa Juan de la Cierva del Ministerio Español de Economía y Competitividad.

## REFERENCIAS

- Ciach, G.J., 2003. Local random errors in tipping-bucket rain gauge measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 752–759.
- Ellison, W.D., 1945. Some effects of raindrops and surface-flow on soil erosion and infiltration. *Transactions American Geophysical Union*, 26(3), 415-429.
- Golubev, V.S. On the problem of actual precipitation measurements at the observations site, in *Proceeding of the International Workshop on the Correction of Precipitation measurements WMO/TD 104*, pp. 61-64, World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland, 1985.
- Golubev, V.S., Assessment of accuracy characteristics of the reference precipitation gauge with a double-fence shelter. In, *Final Report of the Fourth Session of the International Organizing Committee for the WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison*, St.Moritz, Switzerland. WMO, Geneva. 1989.
- Goodison, B.E. and Metcalfe, J.R., The WMO solid precipitation intercomparison: Canadian assessment. In, *WMO Technical Conference on Instruments and Method of Observation*, WMO/TD, No. 462, 221-225, 1992.
- Goodison, B.E., S. Klemm and B. Sevruk, WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison. *TECO-1988 WMO/TD-No. 222*, Leipzig, Germany, 255-262, 1988.
- Gunn, R., Kinzer, G. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *Journal of Meteorology*, 6, 243-248.
- Heberden W. 1769. Of the quantities of rain which appear to fall at different heights over the same spot of ground. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 59: 359.
- Laws, J.O., Parsons, D.A. 1943. The relation of raindrop size to intensity. *American Geophysical Union Transactions*, 26, 452-460
- Löffler-Mang, M., Joss, J. 2000. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors., *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(2), 130-139.
- Lowe, E.J. 1892. Raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 18 (84), 242-245.
- Marshall, J.S., Langille, R.C., Palmer, W.M.K. 1947. Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology*, 4, 186-192.



- Nespor, V., Krajewski, W.F., Kruger, A., 2000. Wind-induced error of raindrop size distribution measurement using a two-dimensional video disdrometer. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 17 (11), 1483–1492.
- New, M., Hulme, M., Jones, P., 2000. Representing twentieth-century space–time climate variability. Part II: development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate* 13, 2217–2238.
- SPICE project: WMO SOLID PRECIPITATION INTERCOMPARISON EXPERIMENT (2012-2015). Retrieved from <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/intercomparisons/SPICE/SPICE.html>
- Tapiador, F.J., Turk, F.J., Petersen, W., Hou, A. Y., García-Ortega, E., Machado, L.A., Angelis, C.F., Salio, P., Kidd, C., Huffman, G.J., de Castro, M. 2012. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, 104–105, 70–97.
- Van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A., Rosewell, C.J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *J Hydrol* 2002; 261: 1-23.