



COMPARACIÓN ENTRE PLUVIÓMETROS CUANTIFICA DIFERENCIAS EN EL MONITOREO DE LA PRECIPITACIÓN

RAIN GAUGE INTER-COMPARISON QUANTIFIES DIFFERENCES IN PRECIPITATION MONITORING

Ryan S. Padrón¹ , Jan Feyen² , Mario Córdova² , Patricio Crespo²  y
Rolando Célleri^{*2} 

¹ Department of Environmental Systems Science. ETH Zurich, Switzerland.

² Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales. Universidad de Cuenca. Av 12 de Abril, Cuenca, 10150, Ecuador.

*Autor para correspondencia: rolando.celleri@ucuenca.edu.ec

Manuscrito recibido el 5 de junio de 2019. Aceptado, tras revisión, el 9 de diciembre de 2019. Publicado el 1 de marzo de 2020.

Resumen

Por décadas se ha trabajado para corregir las medidas de precipitación, sin embargo estos esfuerzos han sido escasos en zonas tropicales montañosas. Cuatro pluviómetros de balancín (TB), con distinta resolución y comúnmente utilizados en las montañas de los Andes, fueron comparados en este estudio: un DAVIS-RC-II, un HOBO-RG3-M, y dos TE525MM (con y sin una pantalla Alter contra el viento). El desempeño de estos pluviómetros, instalados en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, sur del Ecuador, a 3780 m s.n.m., se evaluó en relación al sensor de mejor resolución (0,1 mm), el TE525MM. El efecto de la intensidad de precipitación y condiciones del viento también se analizó utilizando 2 años de datos. Los resultados revelan que (i) la precipitación medida por el TB de referencia es 5,6% y 7,2% mayor que la de pluviómetros con resolución de 0,2 mm y 0.254 mm, respectivamente; (ii) la subestimación de los sensores de menor resolución es mayor durante eventos de baja intensidad—una máxima diferencia de 11% para intensidades $\leq 1 \text{ mm h}^{-1}$; (iii) intensidades menores a 2 mm h^{-1} , que ocurren el 75% del tiempo, no pueden ser determinadas con exactitud para escalas menores a 30 minutos debido a la resolución de los pluviómetros, e.g. sesgo absoluto $> 10\%$; y (iv) el viento tiene un efecto similar en todos los sensores. Este análisis contribuye a mejorar la exactitud y homogeneidad de las medidas de precipitación en los Andes mediante la cuantificación del rol clave de la resolución de los pluviómetros.

Palabras clave: Pluviómetros de balancín, análisis comparativo, exactitud de medición, efectos de intensidad y viento, tropical

Abstract

Efforts to correct precipitation measurements have been ongoing for decades, but are scarce for tropical highlands. Four tipping-bucket (TB) rain gauges with different resolution that are commonly used in the Andean mountain region were compared-one DAVIS-RC-II, one HOBO-RG3-M, and two TE525MM TB gauges (with and without an Alter-Type wind screen). The relative performance of these rain gauges, installed side-by-side in the Zhurucaiy Ecohydrological Observatory, south Ecuador, at 3780 m a.s.l., was assessed using the TB with the highest resolution (0.1 mm) as reference, i.e. the TE525MM. The effect of rain intensity and wind conditions on gauge performance was estimated as well. Using 2 years of data, results reveal that (i) the precipitation amount for the reference TB is on average 5.6 to 7.2% higher than the rain gauges having a resolution of 0.2 mm and 0.254 mm respectively; (ii) relative underestimation of precipitation from the gauges with coarser resolution is higher during low-intensity rainfall mounting to a maximum deviation of 11% was observed for rain intensities $\leq 1 \text{ mm h}^{-1}$; (iii) precipitation intensities of 2 mm h^{-1} or less that occur 75% of the time cannot be determined accurately for timescales shorter than 30 minutes because of the gauges' resolution, e.g. the absolute bias is $>10\%$; and (iv) wind has a similar effect on all sensors. This analysis contributes to increase the accuracy and homogeneity of precipitation measurements throughout the Andean highlands, by quantifying the key role of rain-gauge resolution.

Keywords: Tipping-bucket rain gauge; comparative analysis; measurement accuracy; intensity and wind effect; tropical.

Forma sugerida de citar: Padrón, R.S., Feyen, J., Córdova, M., Crespo, P., y Célleri, R. (2020). Comparación entre pluviómetros cuantifica deficiencias en el monitoreo de la precipitación. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 31(1):7-20. <http://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.01>.

IDs Orcid:

Ryan S. Padrón: <http://orcid.org/0000-0002-7857-2549>Jan Feyen: <http://orcid.org/0000-0002-2334-6499>Mario Córdova: <http://orcid.org/0000-0001-8026-0387>Patricio Crespo: <http://orcid.org/0000-0001-5126-0687>Rolando Célleri: <http://orcid.org/0000-0002-7683-3768>

1 Introducción

Los estudios hidrológicos requieren de la precipitación como insumo (Vuerich y col., 2009; Savina y col., 2012; Seo y col., 2015; Muñoz, Céleri y Feyen, 2016) y en respuesta a esto se han desarrollado varios sensores de lluvia, con diferentes principios operativos y tecnológicos. Entre los sensores de grabación basados en puntos los más utilizados son el pluviómetro de balancín, el pesaje y los medidores flotantes (Nystuen, 1999; WMO, 2008; Grimaldi y col., 2015). En particular, el pluviómetro de balancín (PB) es un dispositivo muy popular, utilizado en todo el mundo (Humphrey y col., 1997; Habib, Krajewski y Kruger, 2001; Tokay y col., 2003; Molini, Lanza y La Barbera, 2005; Vuerich y col., 2009; Mekonnen y col., 2014; Chen y Chandrasekar, 2015; Dai, 2015; Keller y col., 2015). El PB es generalmente un aparato de bajo costo, pero dependiendo del fabricante puede tener diferente resolución y precisión para medir las precipitaciones. Según Savina y col., (2012) las imprecisiones en las mediciones de los medidores de PB se deben principalmente a la variabilidad de la precipitación y la sensibilidad a las condiciones ambientales, así como a los errores mecánicos y de calibración. Según la Organización Mundial de Meteorología (WMO, 2008), las principales fuentes de inexactitud de los indicadores de PB son: pérdidas por evaporación y humectación, y errores inducidos por el viento. Dado que los errores en las mediciones de lluvia pueden conducir al fracaso de la infraestructura hidráulica o a conclusiones erróneas en la investigación Willems2001, se realizaron considerables esfuerzos internacionales para cuantificar y limitar la incertidumbre en las mediciones de lluvia (Lanza y Stagi, 2008).

Se han realizado varios estudios comparativos para definir las diferencias en la profundidad de precipitación capturada por los medidores de lluvia, y para elaborar directrices para la corrección de las mediciones. Desde 1955, la OMM ha llevado a cabo cuatro estudios comparativos internacionales de alta calidad (Sevruk, Ondrás y Chvíla, 2009) para ayudar a los múltiples usuarios de pluviómetro en la correcta interpretación de las mediciones de precipitación. En los estudios de intercomparación de la OMM (Sevruk y Hamon, 1984; Vuerich

y col., 2009), los datos de los medidores de pozos se utilizan como referencia para cuantificar las desviaciones de las mediciones de los sensores con respecto a la profundidad real de lluvia. No obstante, los estudios relativos entre comparaciones también son valiosos, de ahí el amplio número de literatura dedicada a comparar el rendimiento de los sensores de lluvia con diferentes tecnologías, precisión y resolución (Krajewski, Kruger y Nesper, 1998; Nešpor y Sevruk, 1999; Nystuen, 1999; Krajewski y col., 2006; Lanzinger, Theel y Windolph, 2006; Rollenbeck y col., 2007; Duchon y Biddle, 2010). Aunque se espera que los medidores más precisos funcionen mejor que los menos precisos, aún se desconoce el efecto de la intensidad de la lluvia y las condiciones del viento en las mediciones del sensor.

Existen pocos estudios comparativos de los pluviómetros en las zonas montañosas tropicales. En los Andes, la cordillera continental más larga del mundo, un estudio ha analizado el rendimiento de los sensores de lluvia en un bosque tropical de montaña en el sureste de Ecuador ubicado a una altitud de 1960 m.s.n.m. (Rollenbeck y col., 2007), y otro estudio analizó el rendimiento en los pluviómetros en un ecosistema de pastizales de alta elevación, localmente llamado páramo, a 3780 m.s.n.m. (Padrón y col., 2015). Ambos estudios utilizaron sensores especializados, como disdrómetros y radares de micro lluvia, que rara vez están disponibles en estaciones de monitoreo estándar. Mientras tanto, existen varias iniciativas de monitoreo en las tierras altas por encima de 3000 m.s.n.m., como la Iniciativa para el Hidrológico de Ecosistemas Andinos, una red de Organizaciones no Gubernamentales, Instituciones Públicas y universidades del Norte de los Andes que están llevando a cabo un seguimiento hidrológico básico en pequeñas cuencas para obtener información sobre su funcionamiento hidrológico y los impactos del cambio mundial, y que utilizan una variedad de pluviómetros comerciales con diferentes resoluciones. El uso de estos datos heterogéneos puede afectar a las aplicaciones hidrológicas, destacando la necesidad de comprender las diferencias entre los indicadores bajo las condiciones particulares de lluvia y clima del ecosistema.

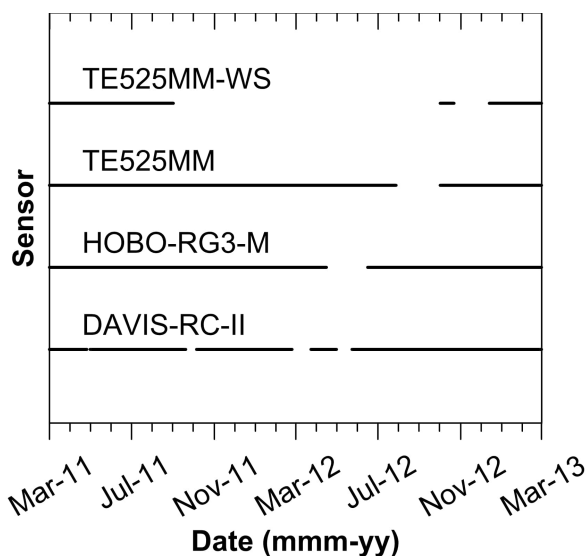


Figura 1. Los datos disponibles de los pluviómetros de Tipping-Bucket (TB) utilizados en el análisis comparativo se representan mediante líneas continuas (los vacíos en las líneas representan períodos de observaciones que faltan).

Este estudio evalúa el rendimiento relativo entre los pluviómetros de PB en el ecosistema de páramo en el sureste de Ecuador. Este ecosistema es un proveedor vital de agua durante todo el año (para fines agrícolas, urbanos y de producción de energía) para Ecuador, Colombia y Venezuela (Buytaert y col., 2006b; Buytaert y col., 2006a; Célleri y Feyen, 2009; Ochoa-Tocachi y col., 2016), regiones caracterizadas por lluvias de baja intensidad durante todo el año. Algunos aspectos específicos que también se estudiaron son el efecto de la intensidad de la lluvia y el viento en las medidas de los pluviómetros probados.

2 Materiales

Cuatro pluviómetros de balancín se instalaron en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, situado en la cordillera occidental de los Andes en el sur de Ecuador ($3^{\circ}03'S$, $79^{\circ}14'O$): un colector de lluvia marca II (DAVIS-RC-II), un medidor de lluvia Hobo Data Logging RG3-M (HOBO-RG3-M), un sensor TE525MM (TE525MM) y un medidor TE525MM equipado con la pantalla de viento tipo Alter 260-953 (TE525MM-WS). La pantalla contra el viento consiste en un escudo de hierro y zinc concéntrico con el medidor de PB. En estudios anteriores se puede obtener una descripción completa con detalles técnicos de la pantalla y las consideraciones de

instalación (Alter, 1937; Duchon y Essenberg, 2001). En el Cuadro 1 se enumeran las principales características de los cuatro pluviómetros utilizados en el estudio comparativo.

Los sensores de lluvia probados se utilizan comúnmente en la región andina con fines operativos y de investigación, por ejemplo, por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), y la iniciativa para el Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (Buytaert y Beven, 2011; Crespo y col., 2012; Muñoz, Célleri y Feyen, 2016; Muñoz y col., 2018; Sucozhañay y Célleri, 2018). Los medidores se instalaron a una distancia de 2 m, con la superficie de los medidores abriendo 1 m por encima de la superficie del suelo, en un área plana extendida, a una altitud de 3780 m.s.n.m. Los datos de precipitación se registraron durante 2 años; el número de puntas por minuto se almacenó en un sistema de registro automático de datos para los sensores de lluvia TE525MM, mientras que para los otros indicadores se registró la marca de tiempo (hh:mm:ss) de cada punta. La temperatura media durante el período de observación fue $6^{\circ}C$, la humedad relativa 91 % (Córdova y col., 2015), y la velocidad del viento tuvo un promedio de $3 m s^{-1}$ en el período octubre-abril y $4.5 m s^{-1}$ en el período mayo-septiembre. Los datos climáticos se registraron con un intervalo de 5 minutos, en una estación meteorológica automática adyacente.

Tabla 1. Especificaciones del fabricante de los pluviómetros Tipping-Bucket (TB)

Sensor	Diámetro de captura (cm)	Resolución (mm)	Intensidad (mm h ⁻¹)	Precisión (%)
DAVIS-RC-II	16,5	0,254	0 – 50 50 – 100	± 1 ± 5
HOBO-RG3-M	15,4	0,200	0 – 20	± 1
TE525MM	24,5	0,100	0 – 10	± 1
TE525MM-WS			10 – 20 20 – 30	+0, –3 +0, –5

Los medidores fueron sometidos a una calibración estática antes de la instalación. Dada la baja intensidad de las lluvias frecuentes y de acuerdo con los hallazgos de (Vasvári, 2005) y las recomendaciones del fabricante del medidor, la aplicación de una calibración dinámica sería innecesaria. Usando una pipeta de alta resolución se midió el volumen real de agua para inclinar el cubo de los sensores de lluvia. El factor de corrección varió entre –6,56 and +4,29%. Debido a un mal funcionamiento de la conexión electrónica al registrador de datos para el TE525MM-WS, más de la mitad de sus datos no se tomaron en cuenta. La Figura 1 muestra los datos disponibles para cada instrumento; los datos faltantes variaron entre el 8 y el 10% para los medidores DAVIS-RC-II, HOBO-RG3-M y TE525MM, y ascendieron al 61% para el medidor TE525M-WS.

manera:

$$percent\ bias = \frac{1}{\bar{y}} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \right) \quad (1)$$

$$percent\ absolute\ bias = \frac{1}{\bar{y}} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \right) \quad (2)$$

donde x y y se definen como la profundidad de precipitación registrada por uno de los medidores y el TE525MM para cualquier intervalo de tiempo, n es el número de valores o intervalos con lluvia registrada, y y es la profundidad de precipitación media medida por el TE525MM para la escala de tiempo considerada. Para la calificación del rendimiento de los medidores se definieron las siguientes categorías del sesgo porcentual: excelente $\leq 2\%$, $2\% <$ bueno $\leq 5\%$, $5\% <$ regular $\leq 10\%$, y pobre $> 10\%$.

3 Métodos

3.1 Índices estadísticos para la evaluación

Para la evaluación cuantitativa de las diferencias de rendimiento entre los pluviómetros se utilizó el siguiente conjunto de índices estadísticos, similar al propuesto por Tokay, Bashor y McDowell, (2010), el coeficiente de determinación (R^2), la correlación no paramétrica del Spearman (ρ), la desviación estándar (σ), el sesgo porcentual y el porcentaje de sesgo absoluto. Los índices estadísticos se calcularon con respecto a los datos de lluvia recogidos por el sensor TE525MM. Este sensor fue considerado en este estudio como referencia debido a sus mejores características técnicas en comparación con los otros pluviómetros, y su conjunto de datos más grande en comparación con el TE525MM-WS. El sesgo porcentual y el sesgo absoluto porcentual, Ecuaciones (1) y (2) respectivamente, se calcularon de la siguiente

3.2 Rendimiento general

Los registros de precipitación de los diferentes medidores se compararon para comprobar si funcionaban correctamente. El funcionamiento de un sensor se caracterizó por R^2 y ρ . Este último se calculó para probar la validez de R^2 que normalmente se ve afectada por la distribución no normal de las precipitaciones. Para los datos TE525MM en una escala horaria por hora, la distribución no normal se confirmó mediante la búsqueda de valores p inferiores a 0,01 para las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk. No obstante, R^2 se calculó para comparar los resultados del presente estudio con los de otros estudios. Para evaluar el efecto de los valores extremos en R^2 , the difference between ρ y R^2 was considered as indicator.

De acuerdo a Tokay y col., (2003), Rollenbeck y col., (2007) y Tokay, Bashor y McDowell, (2010), se

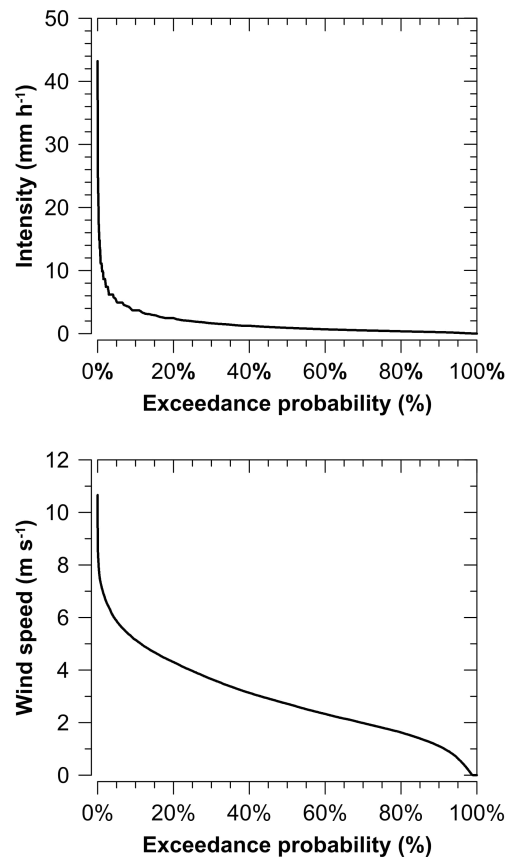


Figura 2. Curva de probabilidad de superación de intensidad de lluvia de los datos de precipitación de 5 minutos recopilados por el medidor TE525MM (superior), y la curva de probabilidad de superación de velocidad del viento de los intervalos de 5 minutos correspondientes (abajo).

espera que los valores R^2 sean superiores a 0,95 para los datos por hora y diarios de los medidores de PB ubicados en el mismo sitio. Después de esto, se analizaron las diferencias en la profundidad de precipitación entre cada uno de los sensores de lluvia y el medidor de referencia utilizando el sesgo porcentual como indicador (Ecuación 1). Además, dada la relevancia hidrológica de los datos de precipitación para los plazos cortos (Ciach, 2003; Rollenbeck

y col., 2007; Buytaert y Beven, 2011), la precisión de los pluviómetros también se determinó para el plazo de 5 min, 10 min, 30 min, hora y día, respectivamente. Para ello, el sesgo absoluto (obtenido con la Ecuación 2) se comparó con el sesgo regular, y esta información se complementó con la desviación estándar de las diferencias entre las mediciones de los sensores (ρ_{x-y}).

3.3 Efecto de intensidad de la lluvia

Para la evaluación del efecto de la intensidad de lluvia sobre la precisión de los pluviómetros, se compararon las mediciones de los sensores correspondientes a las siguientes categorías: $0-1 \text{ mm h}^{-1}$, $1.01-2 \text{ mm h}^{-1}$, $2.01-5 \text{ mm h}^{-1}$, $5.01-10 \text{ mm h}^{-1}$ y $>10 \text{ mm h}^{-1}$. Estas categorías se establecieron tratando de tener para cada una de ellas una distribución

plana, y un porcentaje representativo de la cantidad total de datos (Figura 2 superior). Para la separación de los datos por categoría de intensidad, las intensidades medidas por el indicador TE525MM estaban dentro de los límites de cada categoría específica, mientras que las intensidades correspondientes medidas por los demás indicadores no estaban necesariamente dentro de estos límites. Para los

datos pertenecientes a cada categoría de intensidad y escalas de tiempo de 5, 10, 30 y 60 minutos, se calculó el porcentaje de sesgo absoluto para definir el efecto de estas variables en la precisión con la que los medidores de PB estiman la intensidad real de la precipitación. El sesgo porcentual también se calculó para las diferentes categorías de intensidad para comprender y cuantificar cómo varían las desviaciones entre las mediciones de los medidores en función de la intensidad real de la precipitación.

Los intervalos con intensidades de lluvia para la comparación fueron entre horas exactas, sin solapamiento de tiempo y con lluvia durante toda su longitud. Por ejemplo, para un evento que tuvo su primer pico a las 19:08 UTC y el último a las 21:17 UTC del mismo día, los intervalos usados para una escala de tiempo de 30 minutos fueron: 19:30–20:00, 20:00–20:30 y 20:30–21:00 UTC. Los intervalos 19:00–19:30 y 21:00–21:30 UTC se descartaron porque no llovió durante todo el intervalo. Aunque, este enfoque redujo el volumen de datos, el conjunto de datos útil seguía siendo muy representativo, por ejemplo, para la escala de tiempo de 5 minutos, la lluvia acumulada de los intervalos utilizados representaba el 85 % del volumen de precipitación total de la base de datos TE525MM.

3.4 Efecto de velocidad del viento

Sólo se analizó el efecto de la velocidad del viento en la precisión de los pluviómetros porque no había ningún obstáculo evidente para sugerir un efecto de la dirección del viento. Se utilizaron criterios similares en cuanto a las intensidades de lluvia para clasificar la velocidad del viento (Figura 2 inferior), estableciendo las siguientes categorías: $0-2 \text{ m s}^{-1}$, $2.01-4 \text{ m s}^{-1}$ y 4 m s^{-1} . Los datos de velocidad del viento y las categorías seleccionadas son similares a los utilizados por Sevruck y Hamon, (1984). Además, las velocidades del viento registradas en otras tierras altas, como los Alpes suizo-austríacos o el Altiplano boliviano, no diferían mucho de las velocidades de viento registradas para el páramo (Vacher, Imaña y Canqui, 1994; Draxl y Mayr, 2009).

Se utilizaron sesgo porcentual y sesgo absoluto porcentual para los datos correspondientes a cada categoría para analizar el efecto de la velocidad del viento en las mediciones de los sensores. La escala de tiempo seleccionada tenía que proporcionar

una buena precisión de la profundidad de precipitación capturada por cada medidor, al tiempo que aseguraba que se disparaba una cantidad suficiente de datos por categoría de velocidad del viento. El requisito de precisión se determinó a partir de los análisis globales de evaluación y de efectos de intensidad. Para distinguir el efecto individual del viento del efecto de la intensidad de las precipitaciones, se determinó la distribución de los datos de intensidad de lluvia correspondientes a cada una de las categorías de velocidad del viento. Los intervalos de profundidad de lluvia para la comparación de los sensores con respecto al efecto del viento fueron seleccionados empleando los mismos criterios utilizados al examinar el efecto de la intensidad de la lluvia, es decir, intervalos entre horas exactas, sin superposición de tiempo y con lluvia durante toda su longitud.

4 Resultados y Discusión

4.1 Rendimiento general

La Tabla 2 representa el coeficiente de determinación (R^2) y la correlación de Spearman (ρ) de los medidores DAVIS-RC-II, HOBO-RG3-M y TE525MM-WS con respecto a la precipitación registrada por el sensor TE525MM. Ambos coeficientes se presentan para las escalas de tiempo 5, 10 y 30 min, por hora y diariamente. Los datos revelan claramente que el valor de R^2 y ρ aumenta con la escala de tiempo, que según Nystuen, (1999) se debe al hecho de que es menos importante cómo llueve en intervalos más largos. Esto también ilustra que la importancia de la precisión y la resolución de los pluviómetros es más relevante para agregaciones de tiempo de 30 minutos o menos. Los valores de R^2 tienden a sugerir un mejor acuerdo entre los sensores, debido al efecto que tienen los valores extremos en este índice. Este efecto se puede ver claramente para las escalas de tiempo de 5 y 10 minutos, donde R^2 es mucho mayor que ρ . Las correlaciones entre todos los medidores y el TE525MM fueron estadísticamente significativas; la probabilidad de que las mediciones de dos indicadores diferentes no estuvieran correlacionadas siempre fue inferior al 1% ($p < 0.01$). Otros estudios (Tokay y col., 2003; Rollenbeck y col., 2007; Tokay, Bashor y McDowell, 2010) también encontraron correlaciones altas ($R^2 > 0.95$) entre las mediciones de dos medidores para escalas de tiempo por hora y diarias, respectivamente.

El sesgo porcentual de la diferencia entre la precipitación total capturada por los tres medidores en relación con el medidor TE525MM, que es independiente de la escala de tiempo utilizada, varió entre $-7,2\%$ (DAVIS-RC-II), $-5,6\%$ (HOBO-RG-3) y -2% (TE525MM-WS). Los valores negativos indican una subestimación de los medidores en relación con el volumen de lluvia capturado por el sensor de re-

ferencia. Sobre la base de los criterios antes mencionados, el rendimiento de los medidores DAVIS-RC-II y HOBO-RG-3 es regular, mientras que el del TE525MM-WS es excelente. Los resultados obtenidos están de acuerdo con el rango de desviación encontrado por Rollenbeck y col., (2007) para los medidores de diferentes fabricantes, y por Tokay y col., (2003) y Tokay, Bashor y McDowell, (2010) para medidores idénticos.

Tabla 2. Coeficiente de determinación (R^2) y coeficiente de correlación de Spearman (ρ) para los pluviómetros Tipping-Bucket (TB) en relación con el sensor TE525MM para diferentes escalas de tiempo

Sensor	Escalas de tiempo	R^2	ρ
DAVIS-RC-II	5 min	0,603	0,364
HOBO-RG3-M		0,690	0,395
TE525MM-WS		0,809	0,495
DAVIS-RC-II	10 min	0,826	0,590
HOBO-RG3-M		0,876	0,624
TE525MM-WS		0,933	0,716
DAVIS-RC-II	30 min	0,953	0,792
HOBO-RG3-M		0,969	0,826
TE525MM-WS		0,986	0,887
DAVIS-RC-II	Cada hora	0,975	0,860
HOBO-RG3-M		0,985	0,893
TE525MM-WS		0,993	0,935
DAVIS-RC-II	Diario	0,993	0,992
HOBO-RG3-M		0,997	0,996
TE525MM-WS		0,997	0,997

La figura 3 muestra el porcentaje de sesgo absoluto de los medidores de PB en función de la escala temporal. Hay una clara influencia de la resolución del medidor con el sensor DAVIS-RC-II, que tiene el mayor sesgo absoluto porcentual y la resolución más gruesa. También hay un efecto de escala de tiempo en la precisión de los medidores que se puede explicar por el hecho de que durante intervalos cortos, dada la baja intensidad general de lluvia, algunos sensores no registran la lluvia, mientras que otros lo hacen, y en el siguiente intervalo de tiempo a menudo ocurre el opuesto. De hecho, en casi el 50% de todos los intervalos de 5 minutos considerados, cuando uno de los medidores regis-

tró precipitación el otro no. Para los plazos por hora y más cortos, la desviación estándar de las diferencias con el TE525MM era menor que la resolución de los sensores; se obtuvieron valores de $0,165\text{ mm}$, $0,130\text{ mm}$ y $0,085\text{ mm}$, respectivamente para los medidores DAVIS-RC-II, HOBO-RG3-M y TE525MM-WS en la escala horaria. Estos resultados implican que, en regiones con frecuentes lluvias de baja intensidad como el páramo húmedo, y cuando existe interés en el comportamiento de las lluvias durante períodos de tiempo de 1 hora o menos, la importancia de la resolución del sensor se amplía considerablemente.

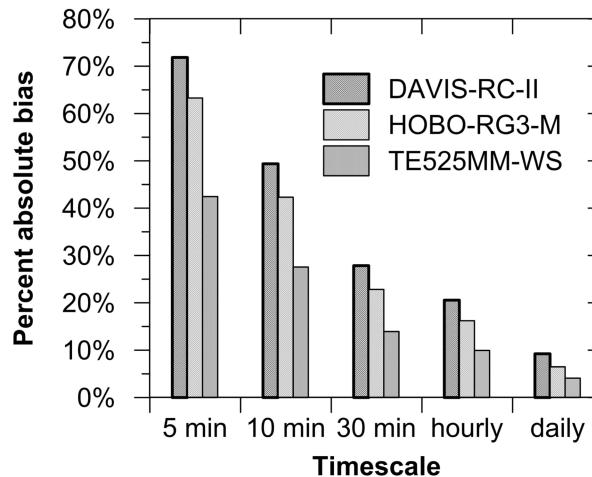


Figura 3. Porcentaje de sesgo absoluto de los pluviómetros Tipping-Bucket (TB) en relación con el sensor TE525MM en función de la escala de tiempo.

4.2 Efecto de intensidad de la lluvia

Como lo demuestran los valores de sesgo absoluto porcentual en el Cuadro 3, la precisión de los pluviométricos disminuye significativamente para intensidades bajas y escalas de tiempo cortas. Esta reducción de la precisión (expresada como porcentaje) ocurre en las condiciones mencionadas porque la profundidad de precipitación es extremadamente baja, aumentando el efecto de la resolución del medidor. Sin embargo, la precisión sigue siendo especialmente pobre para las intensidades de lluvia de 2 mm h^{-1} o menos (que son condiciones típicas, como se muestra en la Figura 2) y escalas de tiempo de 10 minutos o más. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Habib, Krajewski y Kruger, (2001), Ciach, (2003) y Wang, Fisher y Wolff, (2008). Los errores considerables entre la intensidad de lluvia real y calculada afectan al análisis de cómo varían las desviaciones entre las mediciones de los medidores en función de la intensidad de la precipitación. Por lo tanto, se tuvieron que utilizar diferentes escalas de tiempo para cada categoría de intensidad para obtener datos con una precisión aceptable, mientras que todavía se cuenta con un número adecuado de intervalos de tiempo, razón por la cual las precipitaciones fueron medidas por los sensores. Las categorías de datos con texto en negrita en el Cuadro 3 se utilizaron para determinar el sesgo

porcentual de los medidores PB, en relación con el indicador TE525MM, para las diferentes categorías de intensidad (Figura 4).

Los resultados de sesgo porcentual representan una tendencia general de valores más altos para intensidades más bajas y resolución de calibre más gruesa. Los resultados para el DAVIS-RC-II corresponden a un bajo rendimiento para la categoría de menor intensidad, y una calificación regular para todas las demás categorías. Para el HOBO-RG3-M, el valor del sesgo porcentual estaba cerca de la transición de regular a buen rendimiento para intensidades de $\leq 5 \text{ mm h}^{-1}$, y correspondía a una excelente calificación para las intensidades $> 5 \text{ mm h}^{-1}$. Los medidores TE525MM y TE525MM-WS registraron mediciones muy similares para todas las intensidades, pero el rendimiento fue calificado como bueno para la categoría $\leq 1 \text{ mm h}^{-1}$ y excelente para todas las demás categorías. A modo de conclusión, el mayor valor del sesgo porcentual para las intensidades más bajas se atribuye a las características intrínsecas de los medidores estudiados que influyen en las pérdidas de humedad y evaporación (WMO, 2008). Es importante notar que una comparación general de los mismos medidores pluviométricos utilizados en este estudio en un lugar con intensidades de lluvia diferentes de las típicas del páramo, revelaría resultados completamente diferentes.

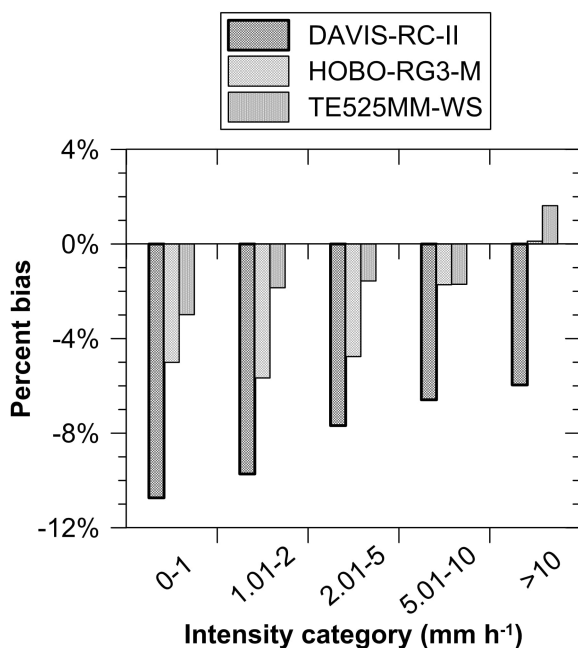


Figura 4. Porcentaje de sesgo de los pluviómetros Tipping-Bucket (TB) en relación con el sensor TE525MM en función de la intensidad de la lluvia. Los datos utilizados para esta figura corresponden a las categorías resaltadas en el Cuadro 3.

4.3 Efecto de velocidad del viento

El sesgo porcentual y el porcentaje de sesgo absoluto de los medidores de PB en comparación con el sensor TE525MM se calcularon para cada categoría de velocidad del viento (Tabla 4), utilizando los datos de 30 minutos. Este calendario se utilizó ya que proporcionaba una precisión aceptable para estimar la intensidad de las precipitaciones, y porque se disponía de una cantidad suficiente de datos de lluvia de 30 minutos. El sesgo porcentual absoluto mostró un incremento para todos los medidores cuando la velocidad del viento era mayor que 4 m s^{-1} . Este comportamiento está probablemente relacionado con el hecho de que las intensidades de lluvia, en general, fueron más bajas para la categoría de velocidad del viento más alta (Mekonnen y col., 2014). Los resultados de sesgo porcentual para los medidores DAVIS-RC-II y HOBO-RG3-M apenas cambian para las diferentes categorías de la velocidad del viento. Esto no significa que esos medidores no sean propensos a errores inducidos por el viento; en cambio, muestra que estos errores son prácticamente idénticos para los sensores DAVIS-RC-II, HOBO-RG3-M y TE525MM. Se piensa que la similitud en la forma, la dimensión y las alturas

de instalación de los medidores generan un flujo de aire similar a su alrededor, lo que lleva a diferencias descartables entre los sensores debido a la velocidad del viento (Nešpor y Sevruk, 1999).

Dada la presencia de un protector de viento Alter-Type alrededor del sensor TE525MM-WS, puede haberse esperado una diferencia notable en la profundidad de lluvia con el calibre tecnológicamente idéntico (TE525MM) sin protector. Se encontró un sesgo descartable inferior al 1%, para los datos de precipitación que se produjeron con velocidades de viento de $\leq 4 \text{ m s}^{-1}$, lo que sugiere que el protector Alter no reduce realmente la captura de lluvia en el páramo para estas condiciones de velocidad del viento. Un resultado similar fue encontrado por Duchon y Essenberg, (2001), aunque en un sitio probablemente con una distribución diferente del tamaño de la gota de lluvia. Además, Duchon y Biddle, (2010) concluyeron que el protector Alter no reduce significativamente los errores inducidos por el viento mediante el uso de un medidor a nivel del suelo. Mientras tanto, para las velocidades del viento $>4 \text{ m s}^{-1}$, los resultados muestran que el medidor blindado registró incluso menos precipitación que el medidor sin blindaje.

Tabla 3. Porcentaje de sesgo absoluto (%) y el número de puntos de datos por categoría de intensidad y escala de tiempo, para cada uno de los pluviómetros Tipping-Bucket (TB) en relación con el sensor TE525MM.

Categoría de intensidad (mm h ⁻¹)	Escala de tiempo							
	5 min		10 min		30 min		60 min	
	DAVIS-RC-II							
	%	#	%	#	%	#	%	#
0 – 1	72	4864	56	2192	27	549	15	165
1,01 – 2	37	2618	29	1341	14	411	13	181
2,01 – 5	25	2492	16	1170	10	320	8	111
5,01 – 10	17	530	12	255	7	50	7	18
> 10	12	158	10	62	4	10	5	2
HOBO-RG3-M								
	%	#	%	#	%	#	%	#
0 – 1	62	5130	47	2323	18	580	10	180
1,01 – 2	30	2569	20	1325	10	404	8	181
2,01 – 5	20	2444	12	1169	7	322	6	112
5,01 – 10	16	520	10	256	4	49	4	18
> 10	12	155	8	62	4	10	2	2
TE525MM-WS								
	%	#	%	#	%	#	%	#
0 – 1	39	3000	27	1325	10	334	7	105
1,01 – 2	20	1537	11	799	6	254	5	120
2,01 – 5	12	1338	7	618	4	171	3	62
5,01 – 10	9	260	4	122	3	28	2	8
> 10	4	71	4	29	2	4	3	2

Nota: Las categorías con texto en negrita se utilizaron para el análisis de sesgo porcentual en la Figura 4.

Tabla 4. Porcentaje de sesgo y porcentaje de sesgo absoluto por categoría de velocidad del viento para cada uno de los pluviómetros Tipping-Bucket (TB) en relación con el sensor TE525MM.

Velocidad del viento (ms ⁻¹)	DAVIS-RC-II		HOBO-RG3-M		TE525MM-WS	
	% sesgo	% sesgo absoluto	% sesgo	% sesgo absoluto	% sesgo	% sesgo absoluto
0 – 2	-8,6	11,4	-4,3	8,1	-0,2	3,7
2,01 – 4	-8,2	12,2	-4,4	8,2	-0,7	5,0
> 4	-8,4	16,7	-2,4	11,0	-6,6	9,0

5 Conclusiones

Se analizó el rendimiento de cuatro pluviómetros de balancín, instalados uno al lado del otro en una captación andina, utilizando datos de 2 años. El sitio de instalación está situado en los Andes tropicales, sur de Ecuador, a una altitud de 3780 m.s.n.m y es representativo de la región del páramo húmedo. Los eventos de lluvia se caracterizan la mayor parte del tiempo por una intensidad baja: 95%, 76%, y 53% de los intervalos de 5 minutos, con intensidades in-

feriores a 5, 2 y 1 mm h⁻¹, respectivamente. Estas características de lluvia diferencian la presente investigación de otros estudios de intercomparación. Además, para el lugar del estudio, las intensidades de precipitación son inferiores a la media en condiciones de viento (4 m s⁻¹), que se producen durante el 25% de los eventos de la lluvia.

Se encontró una clara relación entre la resolución del medidor y la profundidad total de la precipitación: una mayor resolución corresponde a una

profundidad de lluvia menos registrada. Los resultados mostraron una subestimación del 7,2% y del 5,6% para los medidores con una resolución de 0,254 mm y 0,2 mm, respectivamente, en comparación con un medidor con resolución de 0,1 mm. Las diferencias entre los sensores se atribuyen principalmente a una combinación de pérdidas de humedad y evaporación, debido a la relación entre estas fuentes de error y resolución del medidor. La mayor subestimación del medidor DAVIS-RC-II podría estar relacionada con una mayor evaporación causada por el color negro del embudo absorbiendo más calor ambiental. Además, las pérdidas por evaporación se ven impulsadas por los frecuentes eventos de lluvia de baja intensidad.

Se encontró que era muy común para las escalas de tiempo de 5 y 10 minutos que un medidor de PB registre una sugerencia dentro de un intervalo cuando otro medidor no lo hace para ese mismo intervalo, sino para el que sigue. Este fenómeno hizo que los resultados mostraran una diferencia extrema entre los sensores cuando las diferencias reales en la profundidad de precipitación medida eran mucho menores. Por lo tanto, la resolución del sensor es un aspecto crítico a tener en cuenta para el monitoreo de lluvias en el páramo húmedo, o cualquier otro ecosistema con características similares de precipitación.

La velocidad del viento tiene un efecto similar en los medidores analizados de PB sin blindaje. Mientras tanto, el protector Alter no redujo las pérdidas inducidas por el viento.

El conocimiento cuantitativo de las diferencias entre los sensores obtenidos en este estudio es un paso importante para homogeneizar los datos de lluvia de múltiples sitios dentro de las tierras altas andinas. Además, el hecho de que las precipitaciones en el páramo húmedo se subestimen en al menos el 5% por los medidores de uso común es fundamental para los estudios relacionados con el agua en estos paisajes y guían la selección de equipos adecuados para las redes de monitoreo.

Agradecimientos

Este estudio se ejecutó en el marco del proyecto "A research network for the resilience of headwa-

ter systems and water availability for downstream communities across the Americas" y fue financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC). Se agradece al personal técnico y a los estudiantes que contribuyeron con el monitoreo en campo.

Referencias

- Alter, J. C. (1937). «Shielded storage precipitation gages». En: *Monthly Weather Review* 65.7, 262–265.
- Buytaert, W. y K. Beven (2011). «Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands». En: *Hydrological Processes* 25.11, 1784–1799. Online: <https://bit.ly/2OpO62o>.
- Buytaert, W. y col. (2006a). «Human impact on the hydrology of the Andean páramos». En: *Earth-Science Reviews* 79, 53-72. Online: <http://bit.ly/32yASq6>.
- Buytaert, W. y col. (2006b). «Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes». En: *Journal of Hydrology* 329, 413-421. Online: <http://bit.ly/32yKDoc>.
- Chen, H. y V. Chandrasekar (2015). «Estimation of Light Rainfall Using Ku-Band Dual-Polarization Radar». En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53.9, 5197–5208. Online: <https://bit.ly/3974NYe>.
- Ciach, G. J. (2003). «Local random errors in tipping-bucket rain gauge measurements». En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20, 752–759. Online: <https://bit.ly/31mIvza>.
- Córdova, M. y col. (2015). «Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. Application to the Wet Páramo of Southern Ecuador». En: *Mountain Research and Development* 35, 230-239. Online: <http://bit.ly/2T9sCKb>.
- Crespo, P. y col. (2012). «Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador». En: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9, 2475-2510. Online: <http://bit.ly/32FII6D>.
- Célleri, R. y J. Feyen (2009). «The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Know-

- ledge Status, and Perspectives». En: *Mountain Research and Development*, 350-355. Online: <http://bit.ly/3ce4spn>.
- Dai, Q. (2015). «Probabilistic radar rainfall nowcasts using empirical and theoretical uncertainty models». En: *Hydrological Processes* 29.1, 66–79. Online: <https://bit.ly/2u7p2GN>.
- Draxl, C. y G. Mayr (2009). «Meteorological wind energy potential of the Alps using ERA40 and wind measurements of the Tyrolean Alps». En: *European Wind Energy Conference & Exhibition*. Marseille, France, pág. 6.
- Duchon, C. E. y C. J. Biddle (2010). «Undercatch of tipping-bucket gauges in high rain rate events». En: *Advances in Geosciences* 25, 11–15. Online: <https://bit.ly/2tmO4RA>.
- Duchon, C. E. y G. R. Essenberg (2001). «Comparative rainfall observations from pit and aboveground rain gauges with and without wind shields». En: *Water Resources Research* 37.12, 3253–3263. Online: <https://bit.ly/31oV4tU>.
- Grimaldi, S. y col. (2015). «Description and preliminary results of a 100 square meter rain gauge». En: *Journal of Hydrology*, Online: <https://bit.ly/3beiNBJ>.
- Habib, E., W. F. Krajewski y A. Kruger (2001). «Sampling errors of tipping-bucket rain gauge measurements». En: *Journal of Hydrologic Engineering* 6.2 (March/April), 159-166. Online: <https://bit.ly/3b5CR98>.
- Humphrey, M. D. y col. (1997). «A new method for automated dynamic calibration of tipping-bucket rain gauges». En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 14.6, 1513-1519. Online: <https://bit.ly/2UpJI7s>.
- Keller, V. D. J. y col. (2015). «CEH-GEAR: 1 Km resolution daily and monthly areal rainfall estimates for the UK for hydrological and other applications». En: *Earth System Science Data* 7.1, 143-155. Online: <https://bit.ly/2SQBGC5>.
- Krajewski, W. F., A. Kruger y V. Nespor (1998). «Experimental and numerical studies of small-scale rainfall measurements and variability». En: *Water Science and Technology* 37.11, 131–138. Online: .
- Krajewski, W. y col. (2006). «DEVEX-disdrometer evaluation experiment: Basic results and implications for hydrologic studies». En: *Advances in Water Resources* 29.2, 311–325. Online: <https://bit.ly/396ZyIk>.
- Lanza, L. y L. Stagi (2008). «Certified accuracy of rainfall data as a standard requirement in scientific investigations». En: *Advances in Geosciences* 16, 43–48. Online: <https://bit.ly/2uatLr6>.
- Lanzinger, E., M. Theel y H. Windolph (2006). «Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor». En: Geneva, Switzerland, pág. 9.
- Mekonnen, G. B. y col. (2014). «Adjustment to rainfall measurement undercatch with a tipping-bucket rain gauge using ground-level manual gauges». En: *Meteorology and Atmospheric Physics*, 241–256. Online: <https://bit.ly/38CSCCX>.
- Molini, A., L. G. Lanza y P. La Barbera (2005). «Improving the accuracy of tipping-bucket rain records using disaggregation techniques». En: *Atmospheric Research* 77.1-4, 203–217. Online: <https://bit.ly/2SDcr7E>.
- Muñoz, P., R. Céleri y J. Feyen (2016). «Effect of the Resolution of Tipping-Bucket Rain Gauge and Calculation Method on Rainfall Intensities in an Andean Mountain Gradient». En: *Water* 8.11, 534. Online: <http://bit.ly/2wi7k3H>.
- Muñoz, P. y col. (2018). «Flash-Flood Forecasting in an Andean Mountain Catchment—Development of a Step-Wise Methodology Based on the Random Forest Algorithm». En: *Water* 10.11, 1519. Online: <http://bit.ly/2wRJA6R>.
- Nešpor, V. y B. Sevruk (1999). «Estimation of Wind-Induced Error of Rainfall Gauge Measurements Using a Numerical Simulation». En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 16.4, 450-464. Online: <https://bit.ly/2SCLx4c>.
- Nystuen, J. A. (1999). «Relative Performance of Automatic Rain Gauges under Different Rainfall Conditions». En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 16.8, 1025-1043. Online: <https://bit.ly/3bI0t3T>.
- Ochoa-Tocachi, B. y col. (2016). «Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments». En: *Hydrological Processes* 30, 4074–4089. Online: <http://bit.ly/2wjOkSr>.
- Padrón, R. y col. (2015). «Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador». En: *Journal of Hydrometeorology* 16.8, 985–996. Online: <http://bit.ly/2T6nK8v>.
- Rollenbeck, R. y col. (2007). «Comparison of Different Techniques for the Measurement of Precipitation in Tropical Montane Rain Forest Regions».

- En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 24.2, 156-168. Online: <https://bit.ly/2uJW3ZV>.
- Savina, M. y col. (2012). «Comparison of a tipping-bucket and electronic weighing precipitation gauge for snowfall». En: *Atmospheric Research. Elsevier B.V.* 103, 45-51. Online: <https://bit.ly/2UYs4rD>.
- Seo, B. y col. (2015). «Comparison of Single- and Dual-Polarization-Based Rainfall Estimates Using NEXRAD Data for the NASA Iowa Flood Studies Project». En: *Journal of Hydrometeorology*, Online: <https://bit.ly/3bN3MqL>.
- Sevruk, B. y W. R. Hamon (1984). «International comparison of national precipitation gauges with a reference pit gauge». En: *WMO Instrument and Observing Methods Report, No.17* 111, Online: <https://bit.ly/323uoPz>.
- Sevruk, B., M. Ondrás y B. Chvíla (2009). «The WMO precipitation measurement intercomparisons». En: *Atmospheric Research. Elsevier B.V.* 92.3, 376-380. Online: <https://bit.ly/37CEyrH>.
- Sucozhañay, A. y R. Célleri (2018). «Impact of Rain Gauges Distribution on the Runoff Simulation of a Small Mountain Catchment in Southern Ecuador». En: *Water*, Online: <http://bit.ly/2veA7q1>.
- Tokay, A., P. G. Bashor y V. L. McDowell (2010). «Comparison of Rain Gauge Measurements in the Mid-Atlantic Region». En: *Journal of Hydro-meteorology* 11.2, 553-565. Online: <https://bit.ly/2UYPbCs>.
- Tokay, A. y col. (2003). «Rain gauge and disdrometer measurements during the Keys Area Microphysics Project (KAMP)». En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20, 1460-1477. Online: <https://bit.ly/38Em5wm>.
- Vacher, J., E. Imaña y E. Canqui (1994). «Las características radiativas y la evapotranspiración potencial en el Altiplano boliviano». En: *Revista de Agricultura* 1, 4-12. Online: <https://bit.ly/2SBpeYc>.
- Vasvári, V. (2005). «Calibration of tipping bucket rain gauges in the Graz urban research area». En: *Atmospheric research* 77.1-4, 18-28. Online: <https://bit.ly/2SUXX1x>.
- Vuerich, E. y col. (2009). «WMO Field Intercomparison of rainfall intensity gauges». En: *WMO Instruments and Observing Methods Report No. 99* 1504, Online: <https://bit.ly/37zqorn>.
- WMO (2008). «Guide of Meteorological Instruments and Methods of Observation». En: *No. 8*.
- Wang, J., B. L. Fisher y D. B. Wolff (2008). «Estimating Rain Rates from Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements». En: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 25.1, 43-56. Online: <https://bit.ly/2UY26ED>.