



Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia

ISSN: 0254-0770

revistatecnica@fing.luz.edu.ve

Universidad del Zulia

República Bolivariana de Venezuela

Rafael Ignacio Navas Nuñez; Pablo Andrés Gamazo-Rusnac; Armando Alexis Borrero-Hernandez  
Evaluación del Efecto de la Densidad de Pluviómetros en la Fusión Radar-Pluviómetro  
Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería,  
Universidad del Zulia, vol. 45, núm. 3, 2022, pp. 156-163  
Universidad del Zulia  
Maracaibo, República Bolivariana de Venezuela

DOI: <https://doi.org/10.22209/rt.v45n3a02>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=605781791002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante  
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la academia



# REVISTA TÉCNICA

## DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA



REVISTA TÉCNICA  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Jesús Enrique Lossada - Primer rector en la reapertura de LUZ 1946  
Abogado, docente, poeta, escritor, ensayista, dramaturgo,  
traductor, parlamentario, periodista y profesor universitario zuliano.

# Evaluación del Efecto de la Densidad de Pluviómetros en la Fusión Radar-Pluviómetro

Rafael Ignacio Navas Nuñez\*, Pablo Andrés Gamazo-Rusnac, Armando Alexis Borrero-Hernandez

Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Norte, Universidad de la República,  
General Rivera 1350, Salto, 50000, Uruguay.

\*Autor de correspondencia: [rafaelnavas23@gmail.com](mailto:rafaelnavas23@gmail.com)

<https://doi.org/10.22209/rt.v45n3a02>

Recepción: 09 de abril 2022 | Aceptación: 08 de julio de 2022 | Publicación: 01 de septiembre de 2022

## Resumen

Los hidrometeorólogos durante años han tenido la necesidad de interpolar la precipitación registrada en estaciones pluviométricas, para describir el campo de precipitación. La aparición de nuevas tecnologías, como el radar meteorológico, ha dado paso a técnicas de estimación de precipitación alternativas, que se basan en la fusión radar-pluviómetro. El krigado con deriva externa es un método de fusión que captura las ventajas de ambos sensores. En este trabajo se explica cómo la densidad de la red afecta la incertidumbre de la fusión radar-pluviómetro. Adicionalmente, se utilizó el krigado ordinario como método de referencia y se discute acerca de la posibilidad de prescindir del pluviómetro cuando se está en presencia del radar meteorológico. La zona de estudio se ubicó en el sur de Francia, que posee 4 radares meteorológicos y más de 200 estaciones pluviométricas. Los resultados de este trabajo sugieren que la aplicación de la fusión radar-pluviómetro, trae beneficios como estimaciones menos sesgadas y mejor correlacionadas, en las cuales el pluviómetro continúa ofreciendo información valiosa.

**Palabras clave:** densidad de la red pluviométrica; fusión radar-pluviómetro; krigado con deriva externa.

## Assessing the Effect of Rain Gauge Density on Merging Radar and Rain Gauges

### Abstract

Hydrometeorologists have had to interpolate precipitation recorded on rain gauges to describe precipitation fields. The appearance of new technologies, such as weather radar, has given way to alternative precipitation estimation techniques, which are based on radar-rain gauge fusion. External drift kriging is a fusion method that captures the advantages of both sensors, radar and rain gauges. In this work it is explained how the density of the the rain gauges affects the uncertainty merging radar and rain gauges. Additionally, ordinary kriging was used as a reference method and the possibility of dispensing with the rain gauge when in the presence of weather radar is discussed. The study area was located in the south of France, which has 4 meteorological radars and more than 200 rain gauges. The results of this work suggest that the application of merging radar and rain gauges brings benefits such as less biased and better correlated estimates, in which the rain gauge continues to offer valuable information.

**Keywords:** rain gauge density; merging radar and rain gauges; external drift kriging.

## Avaliação do Efeito da Densidade do Pluviômetro na Fusão Radar-Rain Gauge

### Resumo

Hidrometeorólogos há anos têm a necessidade de interpolar a precipitação registrada em estações pluviométricas, para descrever o campo de precipitação. O surgimento de novas tecnologias, como o radar meteorológico, deu lugar a técnicas alternativas de estimativa de precipitação, que se baseiam na fusão radar-pluviômetro. A krigagem de deriva externa é um método de fusão que captura as vantagens de ambos os sensores. Neste trabalho é explicado como a densidade da rede afeta a incerteza da fusão radar-pluviômetro. Adicionalmente, a krigagem ordinária foi utilizada como método de referência e é discutida a possibilidade de dispensar o pluviômetro quando na presença de radar meteorológico. A área de estudo localizava-se no sul da França, que possui 4 radares meteorológicos e mais de 200 estações pluviométricas. Os resultados deste trabalho sugerem que a aplicação da fusão radar-pluviômetro traz benefícios como estimativas menos tendenciosas e melhores correlacionadas, nas quais o pluviômetro continua a oferecer informações valiosas.

**Palavras-chave:** densidade da rede pluviométrica; fusão radar-chuva; krigado com deriva externa.

## Introducción

La estimación del campo de precipitación es un requerimiento necesario para comprender y analizar los procesos hidrológicos a nivel de cuenca, con amplias aplicaciones en modelos hidrológicos y de previsión (Sokol *et al.*, 2021). Los radares meteorológicos ofrecen estimaciones cuantitativas de precipitación (QPE, por sus siglas en inglés), sobre áreas extensas con una buena definición espacio-temporal; lo que los hace ser preferidos en sistemas de alerta y pronóstico hidrometeorológico (Courtet *et al.*, 2010; Méndez *et al.*, 2015; Navas y Delrieu, 2018). La QPE se obtiene mediante la relación reflectividad radárica en función de la intensidad de precipitación, según la Ecuación 1 (Marshall y Palmer, 1948):

$$Z = aR^b \quad (1)$$

Donde:  $Z$  es un pulso instantáneo de reflectividad ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ),  $R$  la intensidad de precipitación ( $\text{mm/h}$ ) y,  $a$  y  $b$  los parámetros de la relación potencial (típicamente  $a = 200$  y  $b = 1,6$ ).

Algunos servicios meteorológicos ofrecen productos QPE a múltiples escalas espacio-temporales, en los cuales se fusiona la estimación del radar con la red de pluviómetros; lo que permite minimizar la incertidumbre de la precipitación por radar (Delrieu *et al.*, 2014; Boudevillain *et al.*, 2016; Ochoa-Rodriguez *et al.*, 2019). Las técnicas de fusión toman ventaja de las bondades de cada instrumento de medición: por ejemplo, lo preciso y exacto de la observación “puntual” obtenida con el pluviómetro y la gran cobertura de la estimación “raster” obtenida a partir del radar (Andrieu y Emmanuel, 2013). La fusión puede realizarse mediante ajustes uniformes, con la distancia o con técnicas geoestadísticas (Borga y Tonelli, 2000; Borga *et al.*, 2002; Berndt *et al.*, 2014). Las técnicas geoestadísticas suelen minimizar los problemas de ocultamiento por relieve, banda brillante, interferencia electromagnética y/o perfiles de reflectividad no uniformes (Berne *et al.*, 2009; AghaKouchak *et al.*, 2010; Hazenberg *et al.*, 2013). Sin embargo, pueden estar influenciadas por la densidad de la red de pluviómetros (Navas, 2017).

En este contexto anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo explicar cómo la densidad de la red pluviométrica afecta la fusión radar-pluviómetro, mediante la aplicación del krigado con deriva externa como método de fusión (Delrieu *et al.*, 2014; Boudevillain *et al.*, 2016) y el krigado ordinario como método de referencia sin radar. La fusión y análisis se implementó en el sur de Francia, que es una región que posee una amplia red de estaciones pluviométricas y radares meteorológicos (Boudevillain *et al.*, 2011), los cuales han servido durante años en la previsión hidrometeorológica e investigación.

## Materiales y Métodos

### Método de fusión radar-pluviómetro

El krigado es un método de interpolación basado en la regresión de valores observados alrededor de un punto de interés, a través de un proceso Gaussiano ponderado de acuerdo a la covarianza espacial de los valores. El krigado sigue la Ecuación 2 (Matheron, 1970):

$$Z^*(u) - E(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha} [Z(u_{\alpha}) - E(u_{\alpha})] \quad (2)$$

Donde:  $u$  es la posición del punto de estimación,  $u_{\alpha}$  la posición de los puntos de observación,  $n(u)$  el número de valores observados usados en la estimación,  $E(u)$  y  $E(u_{\alpha})$  los valores esperados en el punto de estimación y en los

puntos de observación, respectivamente,  $\lambda_\alpha(u)$  el peso asignado en base a la posición,  $Z$  y  $Z^*$  los valores observados y estimados, respectivamente.

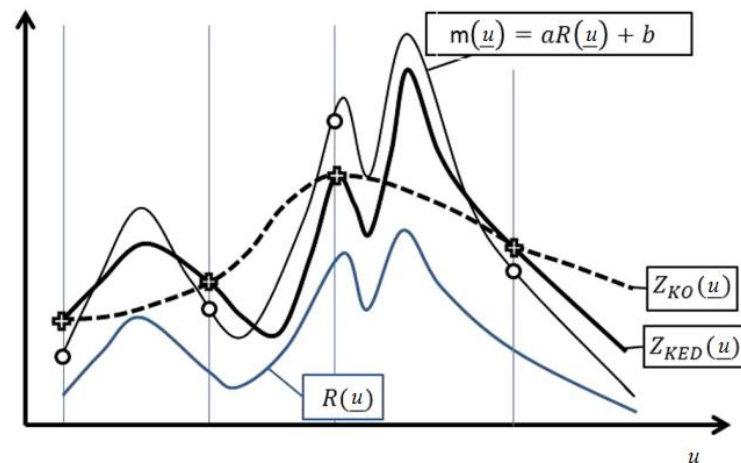
El kriging ordinario (OK, por sus siglas en inglés) es el método clásico de interpolación de precipitación; es un tipo particular de kriging donde los valores esperados son aproximados a un valor constante en el entorno del punto de estimación (Ecuación 3) (Matheron, 1970). Esto es  $m(u) = m(u_\alpha)$  para cada punto  $Z(u_\alpha)$  que se usa en la estimación de  $Z(u)$ , según:

$$Z^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha(u) Z(u_\alpha) + [1 - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha(u)] E(u) \quad (3)$$

El kriging con deriva externa (KED, por sus siglas en inglés) es un método de interpolación que permite realizar la fusión radar-pluviómetro (Delrieu *et al.*, 2014) y es objeto de estudio en este trabajo; es una variante del kriging universal donde la variable  $Z(u)$  a ser interpolada es considerada como la suma de un término estocástico  $Y(u)$  y otro determinístico  $m(u)$ , llamado la deriva (Ecuación 4; Matheron, 1970):

$$Z(u) = Y(u) + m(u) \quad (4)$$

En la Figura 1 se muestra en forma esquemática el método KED, donde la estimación radar ( $R$ ) tiene un sesgo negativo con respecto a los pluviómetros;  $m(u) = aR(u) + b$  es una función lineal del radar  $R(u)$  con coeficientes  $a$  y  $b$  desconocidos; las observaciones puntuales de los pluviómetros y la deriva son utilizadas para estimar los residuos y el variograma de residuos (Delrieu *et al.*, 2014).

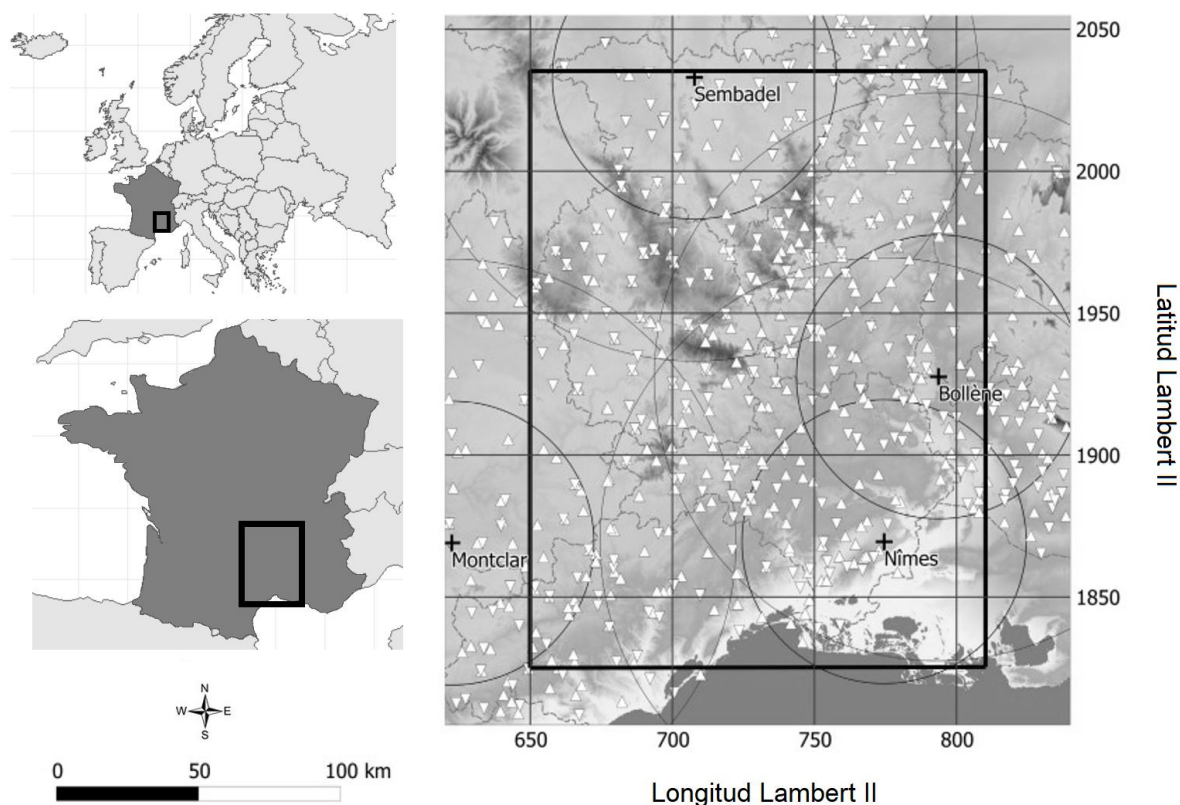


**Figura 1.** Esquema de la estimación del kriging con deriva externa (KED; línea negra gruesa) (Navas, 2017). Los datos del radar  $R(x)$  (línea continua azul) están representados expresamente con sesgo negativo significativo con respecto a los pluviómetros (cruces, su interpolación en la línea discontinua negra). La deriva  $m(x)$  (línea negra delgada) es una función lineal de los datos del radar con coeficientes  $a$  y  $b$  desconocidos. Los datos de los pluviómetros y las correspondientes derivas (círculos) son usados para calcular los residuos locales requeridos para estimar el variograma de residuos.

### Área de estudio

El Observatorio Hidrometeorológico Mediterráneo Cevennes-Vivarais está dedicado a la observación de eventos intensos de lluvia que afectan el sur de Francia (Boudevillain *et al.*, 2011). En él se encuentran 4 radares meteorológicos, 200 estaciones pluviométricas horarias y 160 diarias (Figura 2). El producto QPE utilizado fue la acumulación de precipitación a paso de tiempo horario, suministrado por MétéoFrance, sobre una retícula con resolución de 1 km, generada a partir del mosaico de radares. Para la transformación del factor de reflectividad del radar ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ) en tasa instantánea de precipitación ( $\text{mm/h}$ ), se siguió el protocolo que se describe a continuación: a) Identificación de ecos fijos; b) Transformación de reflectividad en intensidad de lluvia utilizando la relación Marshall y Palmer (1948) ( $z = 200R^{1.6}$ ); c) Corrección de bloqueos parciales del haz radárico; d) Corrección del perfil vertical de reflectividad (VPR, por sus siglas en inglés); e) Ponderación de la lluvia con base al índice de calidad (Tabary, 2007; Tabary *et al.*, 2007; Figueras y Tabary, 2013).





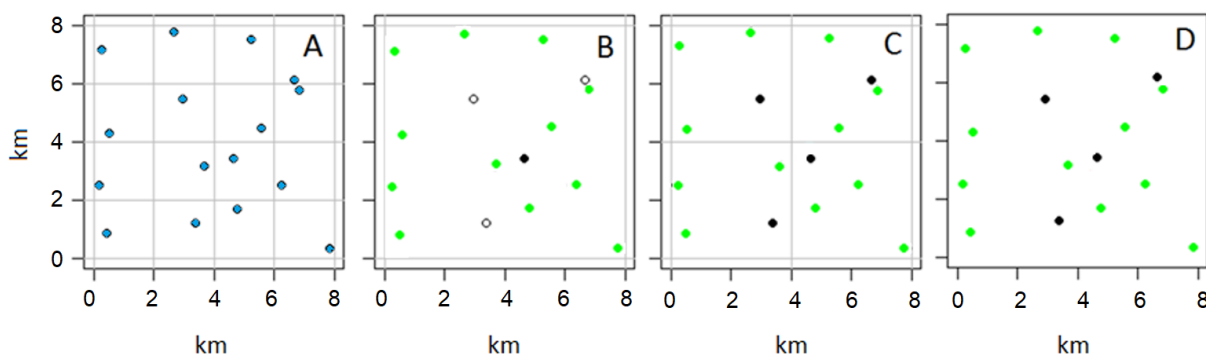
**Figura 2.** Área de estudio. Localización de la ventana del Observatorio Hidrometeorológico Mediterráneo Cevennes-Vivarais, Francia (rectángulo negro), de las estaciones pluviométricas (triángulo: horarias; triángulo invertido: diarias) y de los radares meteorológicos (cruces) (modificado de Navas, 2017).

### Eventos de precipitación

Para el período 2007-2014 se seleccionaron 132 eventos de precipitación. En dicho período se observó una mayor incidencia de precipitación durante septiembre-noviembre y una menor en febrero-agosto. Esta característica describe muy bien los fenómenos conocidos en Francia como “les crues Cévenoles” (inundaciones en la región Cevenol), que son producto de: a) Un Mar Mediterráneo suficientemente caliente que proporciona gran humedad; b) Un centro de baja presión en el Atlántico que cataliza la circulación proveniente del sur en la región Cevenol y c) Viento del sur que mueve la humedad del Mediterráneo hacia las montañas, para producir fuerte condensación y precipitación muy severa (Delrieu *et al.*, 2005).

### Estrategia de análisis

Se plantearon 6 escenarios hipotéticos de reducción de la densidad de pluviómetros en 4 escalas espacio-temporales (1 pluviómetro cada 15, 20, 25, 30, 35 y 40 km, para acumulados de 1, 2, 3 y 6 h). Esta estrategia permitió estudiar el efecto de la densidad de pluviómetros sin comprometer ni mezclar las estaciones que fueron utilizadas en la validación. El diseño de la red de validación se realizó mediante una selección condicionada (Navas, 2017). Fue supuesta una región de 64 km<sup>2</sup> con 16 estaciones pluviométricas (1 estación cada 2 km), distribuidas tal como se muestra en la Figura 3A. Esta selección estableció para la resolución más gruesa (8 km) la estación más cercana al centro de la celda. Dicha estación fue la estación de cálculo para tal escenario (Figura 3B) y las otras estaciones quedaron disponibles para la validación. En la siguiente densidad de pluviómetro, se siguió el mismo criterio; con la variante de utilizar las estaciones de cálculo previamente seleccionadas y omitiendo las estaciones más cercanas al centro de la celda (Figura 3D), lo cual definió la red de cálculo para densidades de estaciones sucesivas. De esta manera, la red de validación quedó definida solo por aquellas estaciones de validación que se repetían en todos los escenarios (puntos verdes en la Figura 3D).

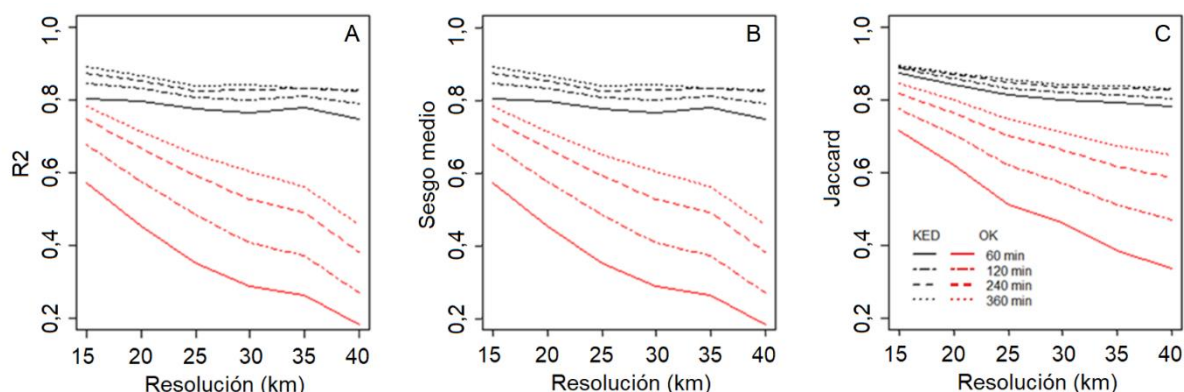


**Figura 3.** Criterio para la reducción de la densidad de pluviómetros (Navas, 2017). A) Red completa, B) Reducción a la resolución más gruesa (8 km) C) Reducción intermedia (4 km) condicionada por las reducciones mayores, D) Red final de cálculo y validación. Puntos azules: estaciones pluviométricas; puntos negros: estaciones de cálculo, definidas como la estación más cercana al centro de gravedad de la celda de la resolución más gruesa; puntos verdes: estaciones de validación; círculos blancos: estaciones no utilizadas en el cálculo ni en la validación.

Para cuantificar el efecto de la densidad en la red, se utilizó lo siguiente: el coeficiente  $R^2$ , definido como el cuadrado de la correlación de Pearson; el sesgo medio, que representa la tendencia del valor estimado ( $Z^*$ ) entre el valor observado ( $Z$ ); y el índice de Jaccard o “coefficient de communauté”, el cual se define como el tamaño de la intersección dividido entre el tamaño de la unión de dos conjuntos (Jaccard, 1901) y expresa un índice de similitud alternativo para el campo de precipitación (Navas, 2017).

## Resultados y Discusión

El efecto de la densidad de pluviómetros en los distintos escenarios planteados, se analiza a continuación. Primeramente, en la Figura 4 se muestra el coeficiente  $R^2$ , el sesgo medio y el coeficiente de Jaccard para cada método y escenario estudiado. Se observa que estos tres indicadores de bondad describen pendientes mayores para OK (líneas rojas) que para KED (líneas negras), lo que indica que el krigeado ordinario es mucho más sensible a la reducción de la red. A su vez, los índices son más altos para KED, evidenciando la ventaja de la fusión con respecto a una estimación basada únicamente en pluviómetros. De forma general, KED es poco sensible a la resolución de la red, al menos hasta 40 km. En OK la resolución de la red deja de ser un parámetro poco sensible y su efecto está en el mismo orden de magnitud que el efecto de la escala temporal.



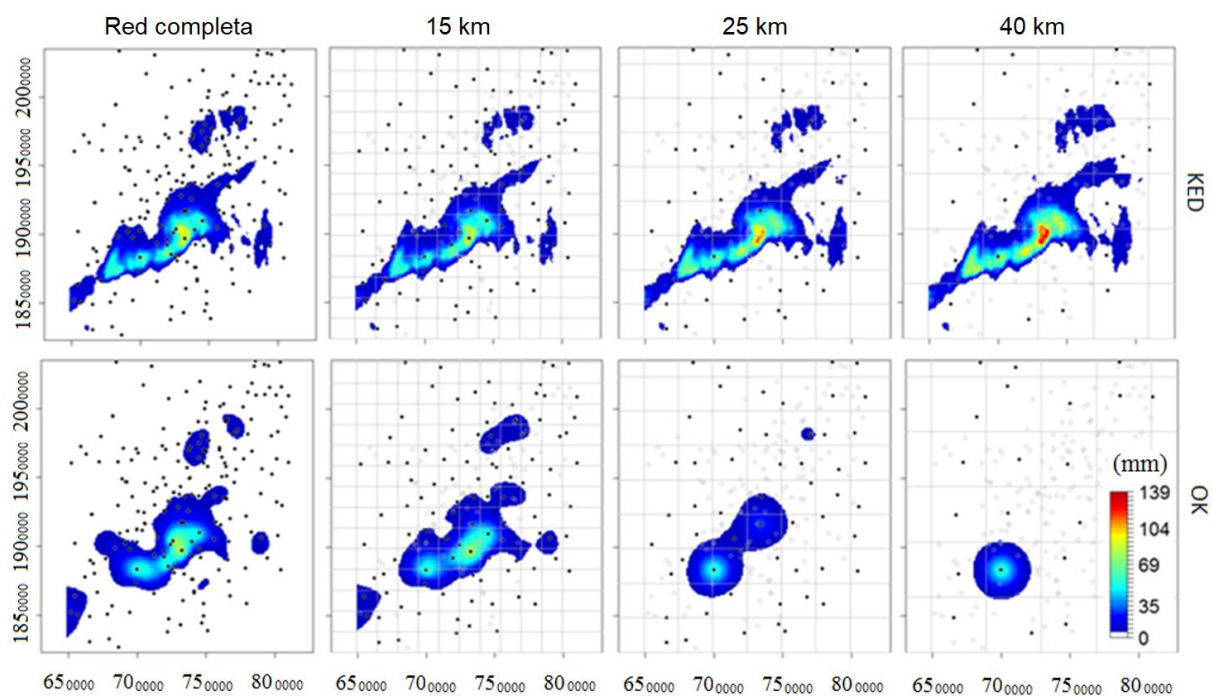
**Figura 4.** A) Coeficiente  $R^2$ , B) sesgo medio y C) índice de Jaccard en función de la densidad de la red (resolución) y de la escala temporal para krigeado con deriva externa (KED, líneas negras) y el krigeado ordinario (OK, líneas rojas).

El coeficiente  $R^2$  brinda una idea de la proporción de variación de la estimación de precipitación en cada escenario (Navas, 2017), que puede explicarse con respecto a la resolución de la red (i.e. es una medida de dispersión en los resultados). KED explica entre el 70 y el 90 % de la variación, mientras que OK solo del 20 al 80 % (Figura 4A). El sesgo medio ofrece una visión de la estimación en términos de subestimación o sobrestimación (Navas, 2017), así, los resultados tienden a la subestimación en el orden de 0,75 y 0,95 para KED y de 0,2 a 0,8 en OK (Figura 4B). El índice de Jaccard representa la fracción de la región común con respecto a la estimación a red completa (Navas, 2017) y está en el orden de 0,8 a 0,9 para KED y de 0,35 a 0,85 para OK

(Figura 4C). Se destaca que es un criterio independiente a la densidad de la red y ofrece resultados similares a los índices  $R^2$  y al sesgo, en cuanto a la sensibilidad de los métodos (Navas, 2017).

Una característica común en ambos métodos es la tendencia a la subestimación, estando más acentuada cuando se reduce la escala temporal y se incrementa la resolución (Navas, 2017). Este efecto es considerablemente mayor para OK. El resultado puede explicarse debido a que los métodos geoestadísticos utilizados trabajan con la hipótesis de que las variables están distribuidas espacialmente de forma gaussiana (Ecuaciones 2 y 3), sin embargo, la precipitación sigue un patrón sesgado y heterogéneo que se acentúa con la reducción de la escala espacio-temporal. Al respecto, Erdin *et al.* (2012) realizaron un estudio donde incorporaron el patrón sesgado y heterogéneo de la precipitación en la estimación KED, por medio de la transformación Box-Cox, remarcando los beneficios que se consiguen con la transformación y aconsejando que el método debe ser aplicado con cautela, ya que en algunos casos se cambia la tendencia de subestimación por la de sobrestimación. Si bien los resultados de Erdin *et al.* (2012) provienen del análisis del método KED, se pudiera plantear la hipótesis de que un método de interpolación univariado como OK, en presencia de precipitación localizada (caso típico de precipitaciones de origen convectivo), donde el máximo local difícilmente será registrado por los pluviómetros; se podrían observar que el sesgo será negativo y mucho más acentuado que en KED, debido a que los valores a interpolar serán siempre inferiores al máximo local. Este fenómeno impacta especialmente cuencas pequeñas durante lluvias convectivas, en las cuales técnicas matemáticas pueden aplicarse para estimar el máximo local de la precipitación (Zhang *et al.*, 2016). Igualmente, se pueden utilizar técnicas estocásticas combinadas con geoestadística para incorporar la probabilidad de ocurrencia de una precipitación máxima no registrada (Jordan *et al.*, 2003; Jódar *et al.*, 2015).

En la Figura 5 se ilustra la estimación de la precipitación acumulada de 1 h para el evento del 17/09/2014 a las 18:00 UTC. El panel superior presenta la estimación KED, donde el patrón espacial del campo estimado de precipitación no cambia significativamente con relación a la reducción de la red. Sin embargo, el núcleo de la precipitación estimada aumenta en magnitud. En el panel inferior se muestra la estimación clásica por OK, observándose con la reducción de la red una deformación radical de la zona precipitante, que va en concordancia con los índices de bondad presentados en la Figura 4.



**Figura 5.** Estimación de precipitación acumulada (1 h) en el Observatorio Hidrometeorológico Mediterráneo Cevennes-Vivarais para el 17/09/2014 a las 18:00 UTC. Parte superior: krigeado con deriva externa (KED), inferior: krigeado ordinario (OK). De izquierda a derecha: red completa y escenarios de reducción de 15, 25 y 40 km, respectivamente.

En cuanto a la interrogante planteada de si se puede prescindir del pluviómetro cuando se está en presencia del radar meteorológico. A la luz de los resultados presentados, la respuesta es no, debido a que se



degradaría la estimación de la precipitación. Por su lado, los servicios meteorológicos, así como los programas de investigación, tienen recursos finitos que limitan la operación de redes hidrometeorológicas complejas. En este contexto, la optimización de las redes hidrometeorológicas, teniendo en mente el propósito para el cual sirven, es una actividad que debe llevarse a cabo para reducir los costos de mantenimiento y asegurar la validez y disponibilidad de los productos asociados (e.g. reanálisis, pronósticos).

## Conclusiones

Los métodos usados en la evaluación del efecto de la densidad de la red pluviométrica en la fusión radar-pluviómetro (krigeado con deriva externa y krigeado ordinario) resultan sensibles a la densidad de la red pluviométrica, teniendo mucho más impacto al reducir la escala temporal de precipitación. En la estimación mediante el krigeado con deriva externa por medio de la fusión radar-pluviómetro, el radar brinda información valiosa que se traduce en una estimación mejor correlacionada y menos sesgada con respecto al krigeado ordinario. Adicionalmente, el método de krigeado con deriva externa aprovecha la red pluviométrica para ajustar la estimación de precipitación por radar, por lo que se puede decir que no es conveniente reducir la densidad de estaciones pluviométricas, ya que se degradaría la estimación de precipitación.

El aporte principal de este trabajo consiste en mostrar que la incertidumbre de la estimación de precipitación está ligada a la escala temporal, así como al método de interpolación y la densidad de la red pluviométrica. La escala temporal se define en función de la resolución temporal con la que se requiere la precipitación para un propósito específico. Por ejemplo, la gestión de recursos hídricos, usualmente se realiza a escala diaria, semanal o mensual; mientras que las aplicaciones para alerta temprana de inundaciones trabajan a escala horaria o incluso sub-horaria, pudiéndose inferir que se requerirá una red de pluviómetros más densa para la previsión de inundaciones que para la gestión de recursos hídricos.

## Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado por la Fundación Gran Mariscal de Ayacucho y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de Venezuela. Las bases de datos han sido mantenidas en el marco del OHMCV dentro del programa HyMex (<http://www.hymex.org/>), con ayuda de las instituciones MétéoFrance, Service de Prévision des Crues du Grand Delta y la Electricité de France.

## Referencias Bibliográficas

- AghaKouchak, A., Habib, E., Bárdossy, A. (2010). Modeling radar rainfall estimation uncertainties: random error model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(4), 265-274.
- Andrieu, H., Emmanuel, I. (2013). Le radar météorologique en hydrologie urbaine. *La Météorologie*, 8(83), 28-38.
- Berndt, C., Rabiei, E., Haberlandt, U. (2014). Geostatistical merging of rain gauge and radar data for high temporal resolutions and various station density scenarios. *Journal of Hydrology*, 508, 88-101.
- Berne, A., Delrieu, G., Boudevillain, B. (2009). Variability of the spatial structure of intense Mediterranean precipitation. *Advances in Water Resources*, 32(7), 1031-1042.
- Borga, M., Tonelli, F. (2000). Adjustment of range-dependent bias in radar rainfall estimates. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(10-12), 909-914.
- Borga, M., Tonelli, F., Moore, R. J., Andrieu, H. (2002). Long-term assessment of bias adjustment in radar rainfall estimation. *Water Resources Research*, 38(11), 1226.
- Boudevillain, B., Delrieu, G., Galabertier, B., Bonnifait, L., Bouilloud, L., Kirstetter, P. E., Mosini, M. L. (2011). The Cevennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory database. *Water Resources Research*, 47, W07701.
- Boudevillain, B., Delrieu, G., Wijbrans, A., Confoland, A. (2016). A high-resolution rainfall re-analysis based on radar-raingauge merging in the Cévennes-Vivarais region, France. *Journal of Hydrology*, 541, 14-23.
- Courtél, F., López, J. L., Gascón, T. (2010). Critical rainfall for debris-flow generation in Catia La Mar. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 33(3), 223-234.

- Delrieu, G., Nicol, J., Yates, E., Kirstetter, P. E., Creutin, J. D., Anquetin, S., Obled, C., Saulnier, G. M., Ducrocq, V., Gaume, E., Payrastra, O., Andrieu, H., Ayral, P. A., Bouvier, C., Neppel, L., Livet, M., Lang, M., du-Châtelet, J. P., Walpersdorf, A., Wobrock, W. (2005). The catastrophic flash-flood event of 8-9 september 2002 in the Gard region, France: a first case study for the Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *Journal of Hydrometeorology*, 6(1), 34-52.
- Delrieu, G., Wijbrans, A., Boudevillain, B., Faure, D., Bonnifait, L., Kirstetter, P. E. (2014). Geostatistical radar-rain gauge merging: A novel method for the quantification of rain estimation accuracy. *Advances in Water Resources*, 71, 110-124.
- Erdin, R., Frei, C., Künsch, H. R. (2012). Data Transformation and uncertainty in geostatistical combination of radar and rain gauges. *Journal of Hydrometeorology*, 13(4), 1332-1346.
- Figueras, J., Tabary, P. (2013). The new french operational polarimetric radar rainfall rate product. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(8), 1817-1835.
- Hazenberg, P., Torfs, P. J. J. F., Leijnse, H., Delrieu, G., Uijlenhoet, R. (2013). Identification and uncertainty estimation of vertical reflectivity profiles using a Lagrangian approach to support quantitative precipitation measurements by weather radar. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(18), 10,243-10,261.
- Jaccard, P. (1901). Distribution de la Flore Alpine dans le Bassin des Dranses et dans quelques régions voisines. *Bulletin de la Societe Vaudoise des Sciences Naturelles*, 37(140), 241-272.
- Jódar, J., Sapriza, G., Herrera, C., Lambán, L. J., Medina, A. (2015). Combining point and regular lattice data in geostatistical interpolation. *Journal of Geographical Systems*, 17(3), 275-296.
- Jordan, P. W., Seed, A. W., Weinmann, P. E. (2003). A stochastic model of radar measurement errors in rainfall accumulations at catchment scale. *Journal of Hydrometeorology*, 4(5), 841-855.
- Marshall, J. S., Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5(4), 165-166.
- Matheron, G. (1970). La théorie des variables régionalisées, et ses applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau. Fontainebleau: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Méndez, W., Córdova, J., Bravo, L. (2015). Predictive models of instantaneous maximum discharges for catchments of mountainous environments, supported by morphometric parameters. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 38(3), 229-238.
- Navas, R. (2017). *Modélisation hydrologique distribuée des crues en région Cévennes-Vivarais: impact des incertitudes liées à l'estimation des précipitations et à la paramétrisation du modèle*. Tesis doctoral. Grenoble: Université Grenoble Alpes.
- Navas, R., Delrieu, G. (2018). Distributed hydrological modeling of floods in the Cévennes-Vivarais region, France: Impact of uncertainties related to precipitation estimation and model parameterization. *Journal of Hydrology*, 565, 276-288.
- Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L. P., Willems, P., Onof, C. (2019). A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. *Water Resources Research*, 55(8), 6356-6391.
- Sokol, Z., Szturc, J., Orellana-Alvear, J., Popová, J., Jurczyk, A., Céleri, R. (2021). The role of weather radar in rainfall estimation and its application in meteorological and hydrological modelling a review. *Remote Sensing*, 13, 351.
- Tabary, P. (2007). The new french operational radar rainfall product. Part I: methodology. *Weather and Forecasting*, 22(3), 393-408.
- Tabary, P., Desplats, J., Do Khac, K., Eidelman, F., Gueguen, C., Heinrich, J. C. (2007). The new french operational radar rainfall product. part II: validation. *Weather and Forecasting*, 22(3), 409-427.
- Zhang, S., Zhang, J., Liu, Y., Liu, Y. (2016). A mathematical spatial interpolation method for the estimation of convective rainfall distribution over small watersheds. *Environmental Engineering Research*, 21(3), 226-232.



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

## REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 45. N°3, Septiembre - Diciembre, 2022

---

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada  
en Agosto 2022, por el **Fondo Editorial Serbiluz,**  
**Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela***

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)  
[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)  
[www.produccioncientificaluz.org](http://www.produccioncientificaluz.org)