

# Caracterización de patrones espacio-temporales de precipitación en la isla de Tenerife

Javier Díez Sierra<sup>a</sup>, Pedro Delgado Melián<sup>b</sup> y Manuel del Jesus<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, España (Javier.diez@unican.es, manuel.deljesus@unican.es)

<sup>b</sup> Consejo Insular de Aguas de Tenerife - Cabildo de Tenerife - Calle de Leoncio Rodríguez, 3, 38003 Santa Cruz de Tenerife (pdelgado@aguastenerife.org)

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

---

## RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la capacidad de MENSEI-L, un software diseñado para automatizar todo el proceso de extracción, análisis y visualización de grandes bases de datos con información pluviométrica, para generar series sintéticas capaces de conservar los regímenes extremales de precipitación y como sistema de alerta ante inundaciones repentinas. MENSEI-L ha sido implementado en la isla de Tenerife y hace uso de técnicas geostadísticas para generar series sintéticas de precipitación. Además utiliza dicha información para, a través de un modelo de regresión basado en tipos de tiempo, realizar predicciones de precipitación a tres días vista. Los resultados muestran que las series sintéticas no son capaces de conservar el régimen extremal de las distribuciones y por lo tanto es necesario aplicar técnicas de corrección del sesgo. En cuanto al sistema de predicción de precipitación, ha sido evaluado a través de varios eventos de inundación y los resultados muestran patrones sinópticos muy similares en todos los casos.

**Palabras clave** | precipitación; geostadística; tipos de tiempo, predicción a corto plazo.

---

## INTRODUCCIÓN

Una adecuada caracterización de los regímenes medios y extremales de precipitación es fundamental para reducir la incertidumbre de los resultados en aplicaciones hidrológicas; para lo cual hoy en día todavía es necesario disponer de redes de estaciones meteorológicas. Dichas redes, automatizadas en la mayoría de los casos, cubren áreas muy extensas generando así grandes bases de datos de las cuales es difícil extraer toda su información sin un software específicamente diseñado para su explotación.

En el presente trabajo se emplea MENSEI-L, un software capaz de automatizar todo el proceso de extracción, análisis y visualización de grandes bases de datos con información pluviométrica. MENSEI-L ha sido desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria) y su implementación se ha llevado a cabo en la isla de Tenerife. El software hace uso de técnicas geostadísticas, capaces de introducir información adicional en forma de covariables, para completar las series temporales, generar estaciones virtuales en aquellos puntos en los que no exista información instrumental, ajustar los regímenes medios y extremales de precipitación y calcular los campos espaciales de periodos de retorno para diferentes años en toda la isla de Tenerife. MENSEI-L tiene además implementado un sistema de predicción probabilístico de precipitación a tres días vista. Dicho sistema de predicción se basa en un modelo de regresión no lineal basado en tipos de tiempo (presión a nivel del mar y altura geopotencial).

Como resultado principal del trabajo se utilizan varios de los módulos implementados en MENSEI-L para realizar dos análisis diferenciados que demuestran el potencial de la herramienta y la importancia de aplicar técnicas estadísticas para mejorar los resultados. En primer lugar, se realiza una comparativa entre los periodos de retorno de precipitación obtenidos directamente de la información instrumental y aquellos obtenidos tras aplicar las técnicas geostadísticas de interpolación implementadas en el software. Y en segundo lugar, se contrasta la calidad del sistema de predicción de precipitación

probabilístico a través de un análisis forense realizado mediante los registros de precipitaciones extremas e inundaciones que afectaron la isla de Tenerife en el pasado.

El documento se estructura de la siguiente manera: en el apartado “Material y Métodos” se explica brevemente los principales módulos disponibles en MENSEI-L y su implementación en la isla de Tenerife. En el apartado “Resultados” se hará uso de algunos de sus principales módulos para evaluar su capacidad para generar series sintéticas que conserven los regímenes extremos y como sistema de alerta ante inundaciones repentinas. Y por último en el apartado “Discusión y Conclusión” se discutirá sobre las principales conclusiones obtenidas, así como las posibles líneas de investigación futuras.

## MATERIAL Y MÉTODOS

MENSEI-L es un software desarrollado por el IH Cantabria y que ha sido implementado en la isla de Tenerife en el marco del proyecto titulado “Servicio de caracterización de fenómenos meteorológicos adversos en Tenerife para el desarrollo de aplicaciones hidrológicas” (ver figura 1). La aplicación está desarrollada íntegramente en Python (*Python Software Foundation, 2016*) y R (*R Core Team, 2015*). MENSEI-L está conectada a la base de datos SQL del CIATF (Consejo Insular de Aguas de Tenerife) con más de 500 estaciones con información de precipitación a diferentes escalas temporales de agregación; de las cuales alrededor de 100 se encuentran en activo a día de hoy. La aplicación está diseñada para alimentarse de la información instrumental disponible en la base de datos SQL para todos sus cálculos, incorporando así los nuevos registros en todos los análisis.

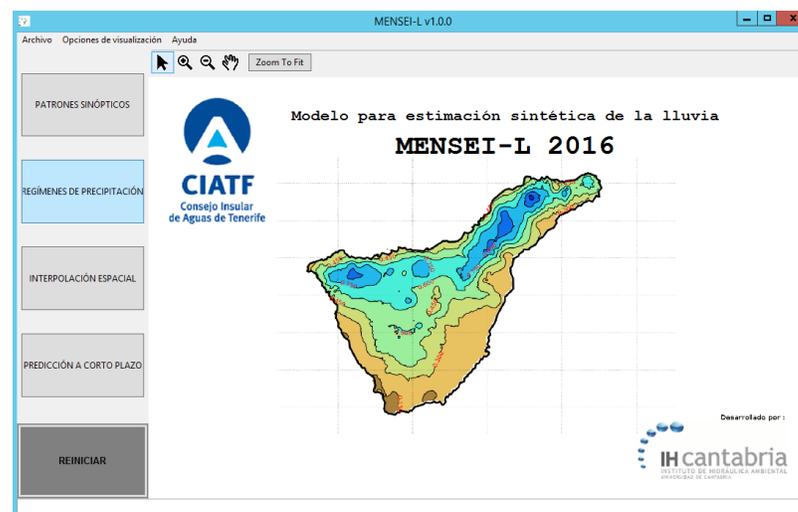
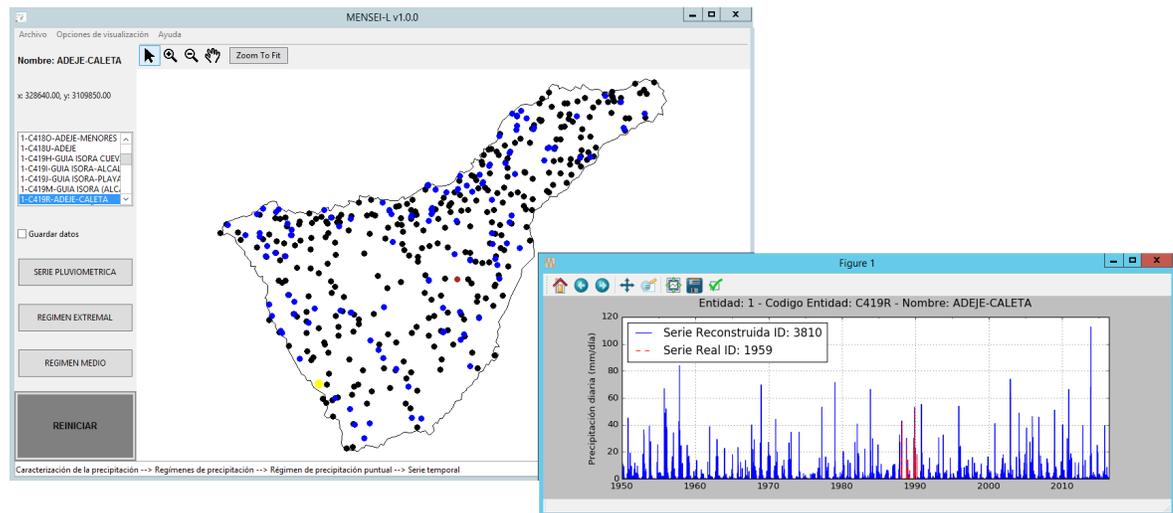


Figura 1 | Panel principal de MENSEI-L.

MENSEI-L se compone de cuatro módulos principales: interpolación espacial, regímenes de precipitación, patrones sinópticos y predicción a corto plazo. En el módulo interpolación espacial se emplea la técnica geostadística *Universal kriging*, utilizando la elevación como *drift* para, a partir de un proceso de dos pasos (Herrera et al., 2012), predecir por un lado si llueve y por otro la intensidad de la lluvia. Este proceso de interpolación es repetido cada día y utiliza toda la información instrumental pluviométrica disponible desde 1950 hasta día hoy para completar las series temporales y generar estaciones virtuales en aquellas localizaciones en las que el usuario lo solicite. El resto de módulos utilizan la información resultante del proceso de interpolación para todos sus análisis.

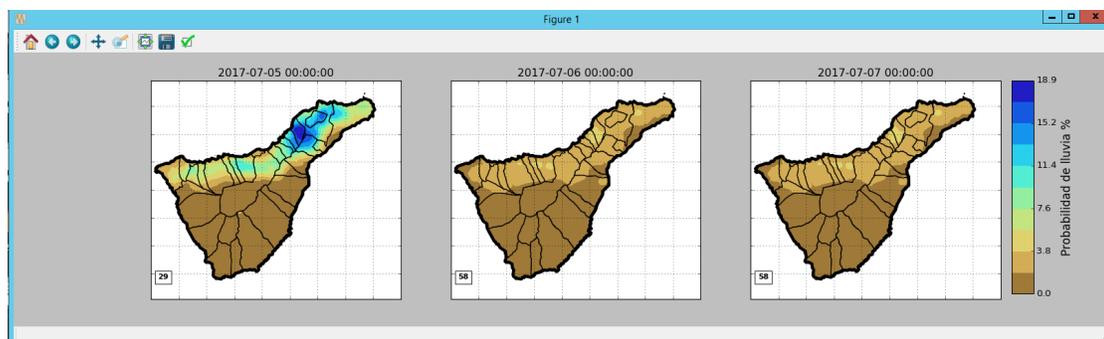
El módulo regímenes de precipitación se compone de dos submódulos: regímenes de precipitación puntual y regímenes de precipitación espacial. En el submódulo regímenes de precipitación puntual (ver figura 2) la aplicación muestra un visor donde es posible seleccionar cualquiera de las estaciones disponibles, calcular su régimen medio de precipitación, ajustar la función que mejor ajusta según el criterio AIC (*Akaike Information Criterion*) (Akaike, 1974; Aho et al., 2014) de entre 7

distribuciones seleccionadas previamente, calcular su régimen extremal ajustando a una distribución GEV y calcular la intensidad de lluvia para diferentes periodos de retorno.



**Figura 2** | El panel situado en la izquierda muestra la interfaz del submódulo régimen de precipitación puntual y sus tres principales funcionalidades: visualización de una serie temporal, régimen extremal y régimen medio. El panel situado a la derecha muestra la serie pluviométrica “Adeje-Caleta” situada al suroeste de la isla (punto amarillo). La línea roja corresponde a la información instrumental observada mientras que la azul corresponde a la serie reconstruida mediante el módulo de interpolación.

En el submódulo regímenes de precipitación espacial la aplicación permite calcular los campos espaciales de precipitación para cualquier periodo de agregación, así como los mapas de periodo de retorno (2-500 años) para toda la isla de Tenerife. En el módulo tipos de tiempo se muestran 81 tipos de tiempo lo cuales corresponderían a patrones sinópticos de presión a nivel del mar y altura geopotencial, de la base de datos de reanálisis CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) (Saha et al., 2010). Dichos tipos de tiempo han sido clasificados mediante técnicas de minerías de datos (Camus et al., 2011). Además, la aplicación también muestra la precipitación (probabilidad de lluvia y lluvia media) asociada a cada tipo de tiempo clasificado. Por último en el módulo predicción MENSEI-L tiene implementado un sistema de predicción probabilístico de precipitación a tres días vista (ver figura 3). Dicho sistema de predicción se basa en un modelo de regresión no lineal basado en los tipos de tiempo previamente calculados. El funcionamiento del sistema de predicción selecciona el tipo de tiempo, de entre los  $n$  clasificados, más parecido a los resultados de predicción del modelo GFS (*Global Forecast System*, desarrollado por la NOAA) y asigna la precipitación que tuvo lugar en dicho tipo de tiempo en el pasado.



**Figura 3** | Predicción de la probabilidad de lluvia para las fechas 2017-07-05, 2017-07-06 y 2017-07-07.

## RESULTADOS

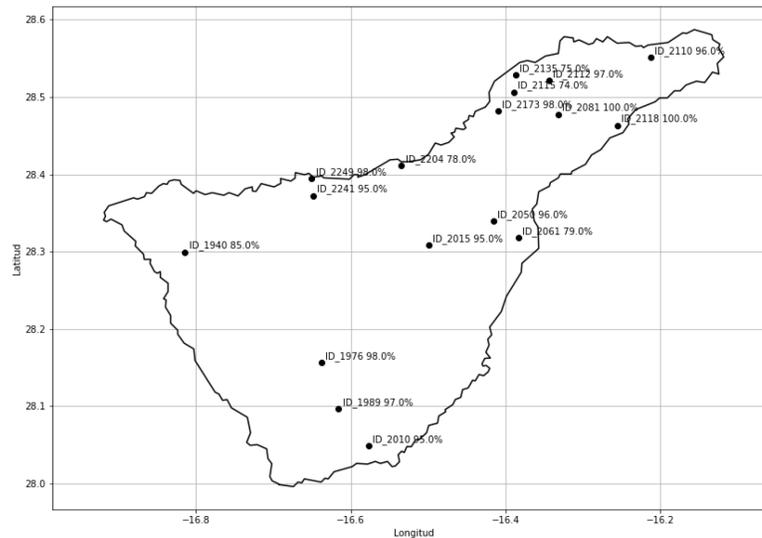
Como se comentó en el apartado Introducción, el objetivo del presente artículo es usar la aplicación MENSEI-L para realizar dos análisis diferenciados. En primer lugar, en el sub-apartado “Cálculo de periodos de retorno” se realiza una comparativa entre los periodos de retorno de precipitación obtenidos directamente a partir de la información instrumental y aquellos obtenidos tras aplicar las técnicas geostadísticas implementadas en el módulo de interpolación del software MENSEI-L. Y en segundo lugar, en el subapartado “Análisis forense de la inundación” se contrasta la calidad del sistema de predicción de precipitación probabilístico a través de un análisis forense realizado mediante los registros de precipitaciones extremas e inundaciones que afectaron la isla de Tenerife en el pasado.

### Cálculo de periodos de retorno

En el cálculo de los periodos de retorno de precipitación es fundamental disponer de series con suficiente longitud temporal para reducir, en la medida de lo posible, la incertidumbre de los resultados. Sin embargo, en algunas ocasiones únicamente se dispone de un reducido número de años para su cálculo; y es por eso que en muchos casos se busca la manera de minimizar dicha incertidumbre mediante diferentes técnicas, ya sea por ejemplo a través de generadores sintéticos, mediante modelos de regresión que relacionan la precipitación con otras variables climáticas o a través de la información instrumental disponible adyacente a la estación de estudio.

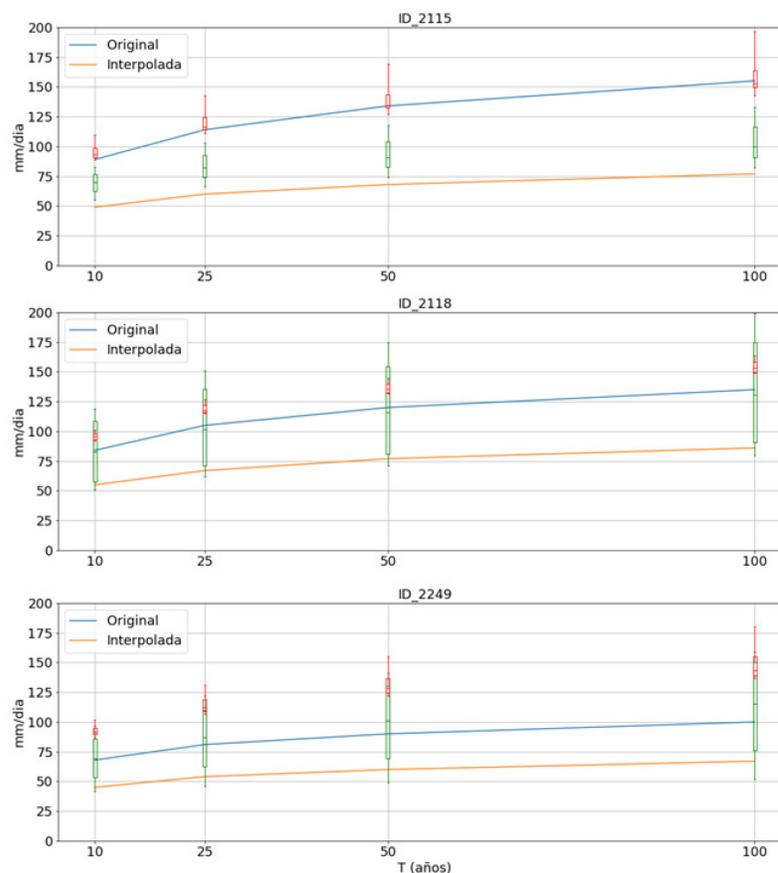
En el presente apartado se hace uso de los resultados de los módulos interpolación espacial y regímenes de precipitación para estudiar si los resultados interpolados capturan correctamente los periodos de retorno; y también si el hecho de completar las series instrumentales, en el caso en el que dispusieran de un número reducido de años, con los datos interpolados reduciría la incertidumbre en el resultado de los periodos de retorno.

El estudio se ha llevado a cabo del siguiente modo: se han seleccionado 17 estaciones distribuidas a lo largo de la isla de Tenerife con más de 30 años de datos en el periodo 1979-2016 (ver figura 4) y se han comparado los periodos de retorno calculados con la información original (instrumental) y aquellos calculados con las series interpoladas para las 17 estaciones. Las series interpoladas han sido generadas mediante la técnica de validación cruzada *Leave-one-out cross-validation* (LOOCV). La técnica LOOCV utiliza todas las estaciones en el proceso de interpolación exceptuando la estación donde la precipitación va a ser predicha. Este proceso es repetido tantas veces como el número de estaciones del que se disponga. Al comparar los periodos de retorno calculados con las series originales y aquellas interpoladas mediante la técnica LOOCV se aprecia que, para estos últimos, los valores de los periodos de retorno se reducen alrededor de un 20 % de media para todas las estaciones; dicha reducción es esperable ya que las técnicas de interpolación son en definitiva técnicas que en la mayoría de los casos suavizan los resultados.



**Figura 4** | 17 estaciones seleccionadas con más de 30 años de información en el periodo 1979-2016.

En segundo lugar, se han comparado los resultados de los periodos de retorno de las series instrumentales seleccionadas calculados mediante únicamente un número  $n$  de los más de 30 años con los periodos de retorno calculados al completar el resto de años con la información generada en el proceso de validación cruzada (LOOCV). La metodología seguida para las 17 estaciones seleccionadas ha sido el siguiente: primero se dividen las series de precipitación seleccionadas en 5 subperiodos con la misma longitud temporal y se calculan los periodos de retorno asociados a cada uno de los subperiodos. Después se calculan los periodos de retorno correspondientes a cada uno de esos 5 subperiodos completando los otros cuatro con la información interpolada. En este último caso con el propósito de corregir el sesgo asociado al proceso de interpolación se ha utilizado la técnica distribucional de corrección de sesgo conocida como *qq-map* (Maraun, 2013). La figura 5 muestra los resultados de la metodología aplicada en las estaciones ID\_2115, ID\_2118 y ID\_2249. Las líneas azules y naranjas corresponderían a los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años calculados con las series originales e interpoladas respectivamente. Los gráficos de cajas corresponderían a los resultados de los periodos de retorno para cada una de las 5 subdivisiones temporales, utilizando por un lado solamente los datos originales (gráficos de cajas verdes) y por el otro rellenando el resto mediante la información interpolada y escalada (gráficos de cajas rojas). Los tres paneles resumen toda la casuística de resultados obtenidos al aplicar la metodología descrita en las 17 estaciones seleccionadas. En el panel superior, correspondiente a la estación ID\_2115, se observa un caso en el que al aumentar la longitud de las series originales mediante los datos interpolados los resultados de los periodos de retorno mejoran respecto a los originales. En el panel intermedio y en el panel inferior se muestra por un lado un caso en el que los resultados medios (media del gráfico de barras) al aumentar son similares y otro en el que los resultados medios empeoran al aplicar la metodología. Sin embargo en estos dos últimos casos la incertidumbre se reduce considerablemente.



**Figura 5** | Periodos de retorno para las estaciones ID\_2115, ID\_2118 e ID\_2249. Las líneas azules y naranjas corresponden a los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años calculados con las series originales e interpoladas respectivamente. Los gráficos de cajas corresponden a los resultados de los periodos de retorno para cada una de las 5 subdivisiones temporales, utilizando por un lado solamente los datos originales (gráficos de cajas verdes) y por el otro rellenando el resto mediante la información interpolada y escalada (gráficos de cajas rojas).

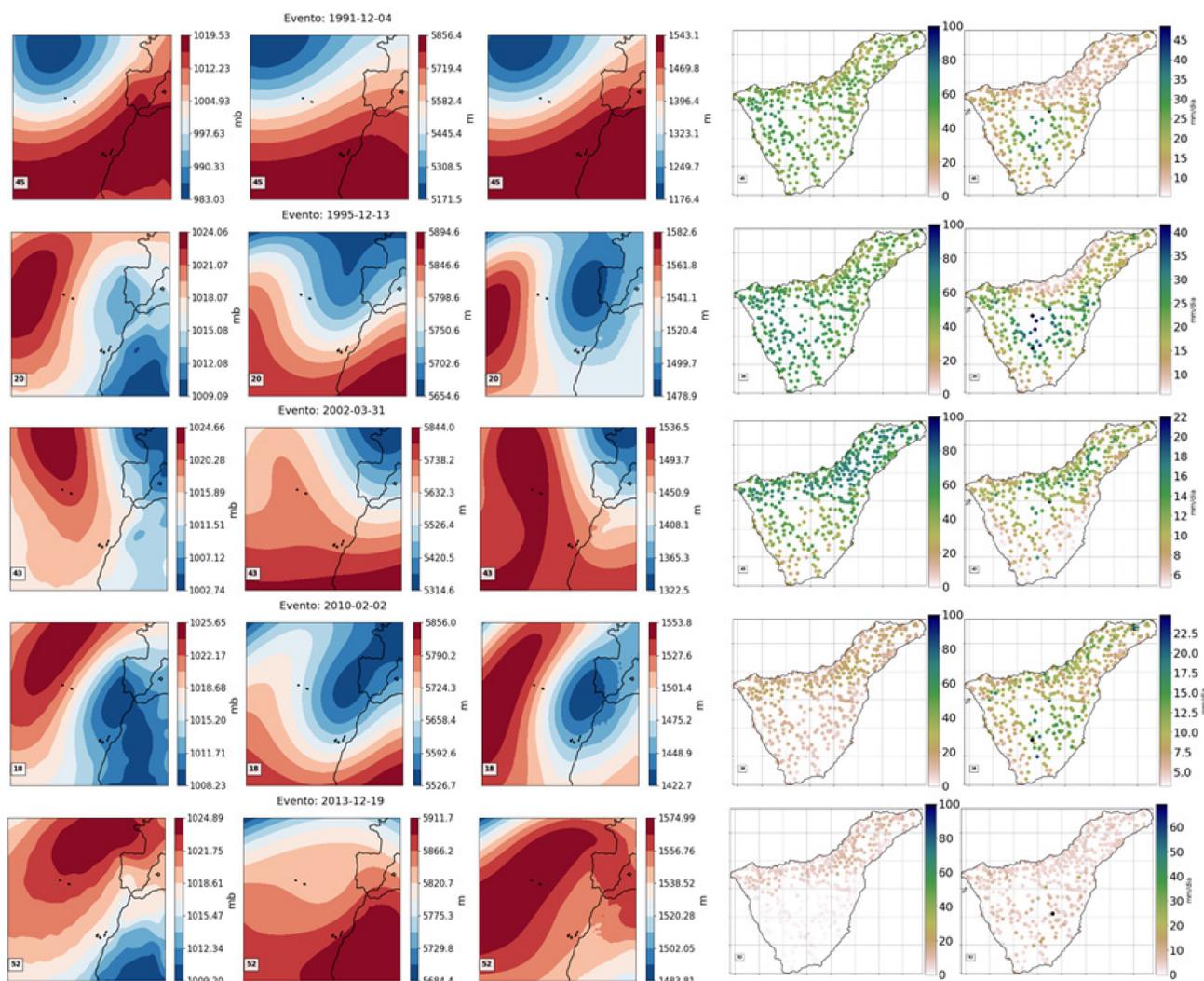
Los resultados obtenidos en el presente apartado muestran que la técnica de interpolación *Universal kriging* no es capaz de capturar los extremos de las distribuciones y que en el caso de querer utilizar las series interpoladas para el cálculo de periodos de retorno es necesario aplicar técnicas de corrección del sesgo. Además, aplicando la metodología descrita se observa que, aunque la media de los resultados obtenidos mediante las series rellenadas y escaladas empeora ligeramente en algunos casos respecto a los periodos de retorno originales, su incertidumbre se reduce considerablemente. Por lo tanto, aunque habría que validar la metodología en otras zonas de estudio, los resultados mejoran en la mayoría de los casos los periodos de retorno y reducen en todos los casos la incertidumbre.

## Análisis forense de la inundación

La precipitación en la isla de Tenerife es muy escasa con una media anual de 233 mm para toda la isla. Sin embargo, la distribución espacial y temporal de la misma es muy heterogénea ya que la mayor parte de lo que precipita durante el año tiene lugar en espacios temporales muy cortos y en zonas geográficas muy localizadas. Además la orografía y climatología tan singular de la isla combinada con los procesos de urbanización llevados a cabo en los últimos años han convertido a las inundaciones repentinas en la mayor amenaza natural de la isla. De hecho, en el siglo XX casi un centenar de inundaciones fueron registradas causando graves pérdidas humanas y materiales.

En el presente apartado se hace uso de dos de los módulos, patrones sinópticos y predicción, implementados en MENSEI-L para realizar un análisis forense de los eventos de inundación que tuvieron lugar en las fechas 1991-12-04, 1995-12-13, 2002-03-31, 2010-02-02, 2013-12-19 y analizar si existe algún tipo de relación espacial en los patrones sinópticos para esas mismas fechas. El procedimiento seguido ha sido el siguiente: primero se han seleccionado los tipos de tiempo de presión al

nivel del mar (SLP), altura geopotencial de 500 hPa (GH 500) y altura geopotencial de 850 hPa (GH 850), de los 81 clasificados por la aplicación MENSEI-L, que tuvieron lugar en cada uno de los eventos; y segundo se ha calculado la probabilidad de lluvia y la lluvia media correspondiente a todos los días en los que tuvieron lugar dichos tipos de tiempo seleccionados. La figura 6 muestra los patrones sinópticos asociados a los 5 eventos de inundación. Las tres primeras columnas corresponden a los campos espaciales de SLP, GH 500 y GH 850 respectivamente; mientras que la cuarta y la quinta columna corresponden a la probabilidad de lluvia (%) y lluvia media (mm/día) para todos los días en los que tuvieron lugar dichos tipos de tiempo. El cuadro situado en la esquina inferior izquierda de cada panel se refiere al tipo de tiempo que tuvo lugar en cada evento (45, 20, 43, 18 y 52). La probabilidad de ocurrencia para cada uno de los tipos de tiempo es de 1.11, 0.78, 1.31, 1.52 y 1.58 % siendo la probabilidad media  $100/81 = 1.23\%$ .



**Figura 6** | Patrones sinópticos asociados a los 5 eventos de inundación registrados. Las tres primeras columnas corresponden a los campos espaciales de presión a nivel del mar (mb), altura geopotencial de 500 hPa y altura geopotencial de 850 hPa; mientras que la cuarta y la quinta columna corresponden a la probabilidad de lluvia (%) y lluvia media (mm/día) para todos los días en los que tuvieron lugar los tipos de tiempo seleccionados. El cuadro situado en la esquina inferior izquierda de cada panel se refiere al tipo de tiempo que tuvo lugar en cada evento (45, 20, 43, 18 y 52).

Los resultados muestran patrones atmosféricos de SLP muy similares para todos los eventos, exceptuando el primero, con las islas Canarias situadas justamente entre una baja presión proveniente del este y una alta presión proveniente del oeste. Mientras que en el caso de los patrones atmosféricos de altura geopotencial se ve una incursión de aire frío muy marcada proveniente del norte para todos los patrones. Las tormentas tipo asociadas a dichos patrones atmosféricos muestran una probabilidad de lluvia muy elevada para los tipos de tiempo que tuvieron lugar en los tres primeros eventos, con probabilidades

de lluvia por encima del 60% para casi todas las estaciones y llegando al 90% en las estaciones situadas al norte de la isla. La lluvia media asociada a los tres primeros eventos muestra patrones espaciales muy diferenciados con una lluvia más intensa en la zona más elevada de la isla en los dos primeros eventos y una lluvia más intensa en la zona norte para el tercer evento. Por último, en los dos últimos eventos se puede observar que su probabilidad de lluvia es muy baja respecto a los primeros, con valores menores del 20% y con una intensidad de lluvia que alcanza los 60 mm únicamente en una de las estaciones para el último caso.

Por lo tanto, el análisis forense realizado demuestra que los patrones sinópticos clasificados capturan de manera correcta los patrones atmosféricos potenciales de producir eventos de inundación extrema. Y será precisamente cuando el sistema de predicción de precipitación, implementado en MENSEI-L, seleccione dichos tipos de tiempo cuando el riesgo de inundación será mayor.

---

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado MENSEI-L, un software desarrollado por el IH Cantabria e implementado en la isla de Tenerife capaz de automatizar todo el proceso de extracción, análisis y visualización de grandes bases de datos con información pluviométrica.

Se ha hecho uso de la aplicación para mostrar dos análisis diferenciados. En primer lugar, se ha realizado una comparativa entre los periodos de retorno de precipitación obtenidos directamente de la información de las estaciones pluviométricas y aquellos obtenidos tras aplicar las técnicas geostadísticas implementadas en el software. Y, en segundo lugar, se ha contrastado la calidad del sistema de predicción de precipitación probabilístico a través de un análisis forense mediante los registros de precipitaciones extremas e inundaciones que afectaron la isla de Tenerife en el pasado.

Los resultados obtenidos en el primero de los análisis muestran que la técnica de interpolación implementada en MENSEI-L no es capaz de capturar los extremos de las distribuciones y que en el caso de querer utilizar las series interpoladas para el cálculo de periodos de retorno es necesario aplicar técnicas de corrección del sesgo. Los resultados obtenidos muestran también que al aumentar la longitud de las series instrumentales mediante los datos interpolados se reduce la incertidumbre en el resultado de los periodos de retorno en la mayoría de las estaciones analizadas.

Por otro lado en el caso del análisis forense de inundación se muestra que la mayoría de los eventos de inundación analizados tuvieron lugar en situaciones sinópticas con patrones espaciales de comportamiento muy particulares. Dichas situaciones sinópticas corresponden a tormentas tipo con una elevada probabilidad de lluvia y una alta intensidad de la misma. Debido a que el módulo de predicción de precipitación está basado en la misma metodología es previsible pensar que funcione de manera adecuada como sistema de alerta ante inundaciones repentinas.

Como futuras líneas de investigación se evaluarán otras técnicas de interpolación como aquellas basadas en regresión múltiple con corrección residual para tratar de conservar los eventos más extremos en el proceso de interpolación. En cuanto al sistema de predicción basado en tipos de tiempo es previsible que utilizando otras técnicas de regresión como aquellas basadas en técnicas de aprendizaje automatizado (*machine learning*) los resultados mejoren.

---

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen su colaboración a Omar Castellanos en la implementación del software y al CIATF por permitir el uso de sus bases de datos en el presente manuscrito.

---

## REFERENCIAS

Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE transactions on automatic control 19, 716–723.

- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S., 2011. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering* 58, 453–462.
- Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons, M., Frías, M., Fernández, J., 2012. Development and analysis of a 50-year high resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (spain02). *International Journal of Climatology* 32, 74–85.
- Maraun, D. (2013). «Bias correction, quantile mapping, and downscaling: Revisiting the inflation issue». En: *Journal of Climate* 26.6. cited By 80, págs. 2137-2143. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00821.1.
- Python Software Foundation, 2016. Python language reference, version 2.7. URL: <http://www.python.org>.
- R Core Team, 2015. R: A language and environment for statistical computing. URL: <https://www.R-project.org>.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., et al., 2010. The ncep climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91, 1015–1057.