Identificación del origen de las tormentas que provocan las avenidas en España utilizando trayectorias de tormentas y técnicas de aprendizaje automático.

Santos, Marcus .S.[a,b,c1]; Mediero, Luis J. [c2]; Lima, Carlos H.R. J.[a2]

[a] Posgrado en Tecnología Ambiental y Recursos Hídricos, Universidad de Brasilia (UnB), Campus Universitario Darcy Ribeiro, Anexo SG12, Térreo, 70.910-900, Brasilia, DF, Brasil.
[b] Departamento de Hidrología, Servicio Geológico de Brasil (CPRM), Sede, SBN Cuadra 02, Ed. H, 70040-904, Brasilia, DF, Brasil.
[c] Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica, Energía y Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Profesor Aranguren, 3. 28040. Madrid.
E-mail: [a,b,c1]marcus.santos@cprm.gov.br, [a2]luis.mediero@upm.es., [b2]chrlima@unb.br.

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

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo identificar el origen de las tormentas que provocan las avenidas máximas anuales en España. Dicha identificación tiene gran utilidad a la hora de determinar la homogeneidad de las avenidas, tanto desde el punto de vista de la magnitud como de su estacionalidad. A partir de los datos disponibles actualmente se puede evaluar si las avenidas son homogéneas y, de este modo, son resultado de procesos estocásticos homogéneos, o si por el contrario, son debidas a distintos procesos generadores con cambios a lo largo del tiempo, de tal forma que la ley de frecuencia de avenidas debería ser dividida para tener en cuenta dichas diferencias. Se han utilizado los datos observados en siete estaciones de aforo localizadas en distintas Demarcaciones Hidrográficas españolas. Para cada una de las tormentas asociadas a las avenidas máximas anuales en cada estación de medida, fueron identificadas 64 trayectorias de partículas de aire utilizando el modelo Lagrangiano de dispersión de partículas 'Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model' (HYSPLIT). Se han identificado los cinco tipos de tormentas más frecuentes en España según su origen: (1) Atlánticas Tropicales; (2) Atlánticas del Oeste; (3) Reciclaje de humedad; (4) Cantábricas; y (5) Mediterráneas. Para la clasificación de las trayectorias se utilizó un análisis de cluster con el algoritmo 'K-nearest neighbours' (KNN). Los resultados alcanzados en esto estudio muestran que, en general, dos grandes regiones pueden ser identificadas, cada una asociada con un modo de circulación climática predominante: atlántica o mediterránea. En cuanto a la magnitud de los caudales máximos anuales de avenida en España, se ha encontrado que en general no son homogéneos, ya que las avenidas más grandes en la región Atlántica normalmente tienen un origen atlántico, mientras en la región Mediterránea las avenidas más grandes tienen su origen en tormentas de origen no Atlántico. En cuatro de las 14 estaciones de aforo estas distinciones son estadísticamente significativas. Estos resultados tienen gran importancia, ya que podrían, por ejemplo, mejorar los pronósticos de avenida a partir de la identificación del tipo de tormenta a medida que llega. Así mismo, también podrían mejorar los estudios de regionalización mediante la clasificación de las inundaciones en diferentes regímenes en función de los tipos de tormenta observados.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene por objetivo identificar el origen de las tormentas que provocan las avenidas máximas anuales en España, de gran utilidad para determinar la homogeneidad de las avenidas, tanto desde el punto de vista de la magnitud como de su estacionalidad. Los supuestos de homogeneidad y estacionalidad generalmente considerados en los estudios de frecuencia de inundación han sido frecuentemente cuestionados. En España, se han observado tendencias negativas en las variables

hidrológicas a lo largo de las últimas décadas. Por ejemplo, Morán-Tejeda et al. (2011) identificaron una tendencia negativa generalizada en los caudales mensuales de invierno y primavera en la cuenca del río Duero de 1961 a 2006. Martínez-Fernández et al. (2013) encontraron tendencias negativas en los caudales anuales y de primavera/invierno en la mayoría de las cuencas españolas en el período 1966-2005. Coch y Mediero (2016) observaron una clara tendencia decreciente en los caudales mínimos en toda la mitad norte de España y en las regiones atlántica y mediterránea durante el periodo 1949-2009. En relación a las avenidas, Morán-Tejeda et al. (2011) también detectaron una tendencia negativa generalizada en las inundaciones en la cuenca del Duero en el período 1961-2006. Mediero et al. (2014) identificaron una tendencia decreciente general en la magnitud y frecuencia de las inundaciones de 1942 a 2009, con evidencia más notable en el período 1959-2009. También relacionaron las tendencias de inundación detectadas con el aumento de la evapotranspiración que aumentó las pérdidas de agua en los suelos y la disminución del contenido de humedad del suelo antes de la ocurrencia de las avenidas.

Estas tendencias observadas son de gran preocupación, especialmente en un escenario de cambio climático, donde los nuevos regímenes climáticos podrían afectar nuestra comprensión del comportamiento de las avenidas, aumentando la incertidumbre acerca de si dichas tendencias persistirán, aumentarán o disminuirán en un futuro próximo. La búsqueda de pronósticos del futuro comportamiento hidrológico sería de gran interés para la toma de decisiones en un contexto de gestión de recursos hídricos, ordenación de zonas inundables y también para la planificación de infraestructuras. Creemos que para progresar en el conocimiento, es esencial abordar una respuesta adecuada a estas preguntas, no sólo identificando los patrones cambiantes, sino también entendiendo cómo la interacción entre los atributos del tiempo, el clima, la hidrología y la cuenca evoluciona con el tiempo y el espacio (Lima et al. 2017). En otras palabras, uno no sólo debería ser capaz de identificar patrones cambiantes en el comportamiento hidrológico sino también atribuir el comportamiento cambiante a un conjunto de causas plausibles (Merz, et al., 2012).

A partir de un conjunto de datos disponibles actualmente se puede evaluar si las avenidas son homogéneas y, de este modo, son resultado de procesos estocásticos homogéneos, o si al revés, son debidas a distintos procesos de generación de avenidas con cambios a lo largo del tiempo, de tal forma que la ley de frecuencia de avenidas debería ser dividida para tener en cuenta dichas diferencias. Este tipo de análisis, el estudio de las avenidas y sus procesos climáticos de generación, constituyen lo que se puede llamar como 'Hidroclimatología' de las avenidas, es decir, la intersección de los estudios de climatología e hidrología (Shelton, 2009). En este estudio, vamos más allá en la investigación del componente atmosférico como motor de los cambios hidrológicos en España utilizando datos de las tormentas generadas por el Modelo de Trayectoria Integrada Híbrida Lagrangiana – HYSPLIT (Draxler et al. 1999; Draxler y Hess 1997; Draxler y Hess 1998). HYSPLIT ha sido aplicado en el campo de la hidrología en varios estudios de composición química de la precipitación líquida y sólida (Ming et al., 2007, Scarchilli et al., 2010, Vieira-Filho et al. 2013, Wai et al., 2007). Un artículo de revisión reciente (Stein et al., 2015) no ha enumerado ninguna aplicación específica de este modelo en estudios climatológicos e hidrológicos a gran escala. Específicamente en España, Krklec y Domínguez-Villar (2014) utilizaron el modelo HYSPLIT en la identificación de las principales fuentes de humedad de la cueva de Águilas, en el centro de España durante los años 2009-2011, y descubrieron que el reciclaje de humedad en la Península Ibérica y la humedad procedente del Océano Atlántico Norte son las principales fuentes de humedad de la región para ese período. También concluyeron que el Océano Atlántico Tropical y el Mar Mediterráneo contribuyeron a una escala más pequeña y más variable.

De esta manera, se propone un estudio a gran escala de las avenidas en España utilizando el modelo HYSPLIT para la estimación de trayectorias de tormentas y así establecer un vínculo directo entre el transporte de humedad en la atmósfera y los eventos de inundación en el país. Las trayectorias de tormentas asociadas con las series de caudales máximos de avenidas de 14 estaciones de aforo en España se obtienen a partir de datos de *Reanálisis* de NCEP/NCAR (Centro Nacional de Investigación Atmosférica del Centro Nacional de Protección Ambiental de EEUU; Kalnay et al., 1996) y se clasifican en grupos utilizando el método de agrupación de K-Medias. Finalmente, las series de caudales máximos anuales de avenida en España fueron asociadas a información cualitativa de los procesos de generación de cada avenida. Esto podría conducir a una mejor comprensión de las avenidas o pudiendo sugerir distintas distribuciones de frecuencia en función de los diferentes patrones atmosféricos observados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Trayectorias de tormentas

Para realizar este estudio en España se han utilizado los datos de caudales medios diarios máximos anuales observados en 14 estaciones de aforo localizadas en distintas Demarcaciones Hidrográficas españolas (Figura 1). Para cada una de las tormentas asociadas a cada una de las avenidas máximas anuales en cada estación de medida, fueron identificadas 64 trayectorias de partículas de aire utilizando el modelo HYSPLIT. En este modelo, cada partícula atmosférica tiene su posición estimada utilizando datos de *Reanálisis* de NCEP/NCAR. Los cambios de humedad de cada partícula son estimados para cada intervalo de tiempo utilizando la Ecuación 1 (Sodemann et al. 2008), siendo *g* la cantidad de vapor de agua por *kg* de aire en un intervalo de tiempo de 6 horas. Se puede observar que cambios negativos son resultado de volúmenes de lluvia superiores a los de recarga por evapotranspiración y viceversa (Sodemann et al. 2008).

$$\frac{dq}{dt} \approx \frac{\Delta q}{\Delta t} = E - P \; (g\; kg^{-1}(6h)^{-1}) \qquad (1)$$

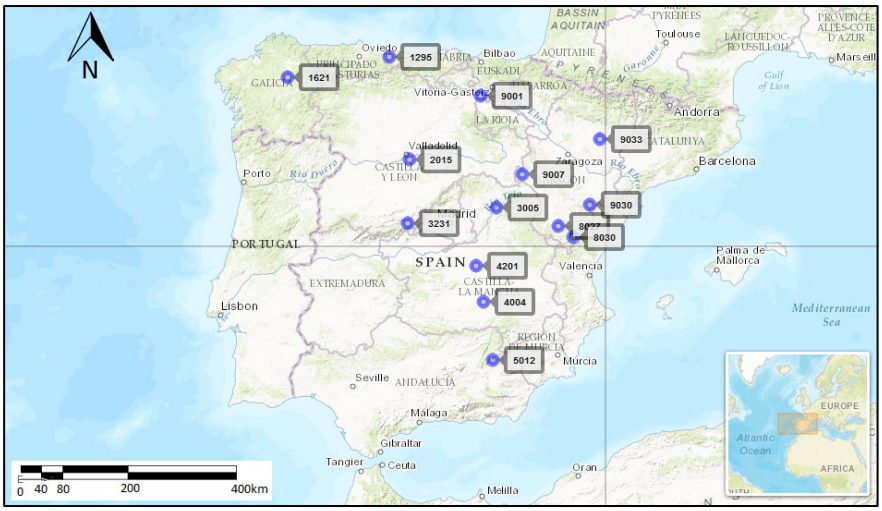

Figura 1 | Estaciones aforo utilizadas en el estudio.

En este estudio, se ha utilizado el modelo HYSPLIT para identificar la trayectoria de tormentas en el día del caudal máximo anual en cada estación de medición. El propósito de este análisis es identificar sistemas atmosféricos que describen no sólo la cantidad de humedad, sino también la dinámica atmosférica vinculada a cada evento de inundación. Las tormentas se identificaron en cuatro momentos diferentes durante el día (a las 0h, 6h, 12h y 18h), a lo largo de una columna vertical de 10 a 6010 metros cada 400 metros. Aunque algunas de estas trayectorias a niveles más altos no pueden transportar casi ninguna humedad, pueden contribuir a la dinámica atmosférica durante las avenidas y por eso también fueron utilizadas. Como resultado, se generan 64 trayectorias para cada evento de avenida. Cada trayectoria cubre las 72 horas antes de la llegada de los paquetes de aire en la cuenca el día del caudal máximo. Este proceso resultó en 48.320 trayectorias (64 por cada avenida en las 755 avenidas analizadas). La información que contiene el resultado de HYSPLIT para cada trayectoria es la posición de los paquetes de aire (latitud, longitud y altura), presión y humedad específica (en gramos de vapor de agua por cada kilogramo de aire, o *g*/*kg*), de acuerdo con la ecuación (1).

Datos hidrológicos

Los datos hidrológicos utilizados en el presente estudio fueron suministrados por el CEDEX y el Sistema Integrado de Información del Agua, el Anuario de Aforos. A partir de la base de datos compilada por Mediero et al. (2014), fueron seleccionadas aquellas estaciones que representan diferentes patrones regionales de avenida en España, a través de registros

continuos que se remontan a los años sesenta. Este período se definió una vez que estudios anteriores sugieren que en algunas partes de Europa, la presión media del nivel del mar en los datos de *Reanálisis* del NCEP/NCAR anteriores a 1967 son poco realista (Reid, et al., 2001). También fueron seleccionadas las estaciones de aforo con área de drenaje de hasta 20.000 km², ya que la respuesta hidrológica a un solo evento de tormenta es más evidente (a excepción de dos estaciones de medición localizadas en el río Guadiana donde los datos observados estaban disponibles en cuencas más grandes). También excluimos áreas con una contribución relevante del deshielo a las inundaciones (por ejemplo, los Pirineos), ya que los procesos de generación de avenidas podrían tener una conexión más débil con tormentas estimadas en un único día. Como resultado, se han seleccionado 14 estaciones (Figura 1). Las cuencas cubren entre 486 y 66.890 km^2. A partir de estos datos, se obtuvieron los caudales máximos anuales, resultando un total de 755 avenidas en las 14 estaciones de aforo.

Clasificación de trayectorias y tormentas

Para la clasificación de las trayectorias y tormentas se utilizó el algoritmo cluster 'K-nearest neighbours' (KNN) sin supervisión (Hartigan and Wong, 1979), en combinación con el mismo algoritmo KNN con supervisión. El algoritmo KNN sin supervisión fue utilizado de acuerdo con un conjunto de características de cada una de las tormentas, mientras que el algoritmo con supervisión se ha utilizado utilizando el porcentaje de cada tipo de trayectoria en cada tormenta. La elección de esas características contiene cierta subjetividad. Para el algoritmo KNN sin supervisión, se extrajeron tres patrones principales de cada trayecto:

- Ubicación del punto de origen 72 horas antes de la ocurrencia del caudal máximo (latitud y longitud);
- Inclinación vertical de cada trayectoria durante las 72 horas previas al caudal máximo;
- La dirección principal de la trayectoria durante las 72 horas previas al caudal máximo.

Después de haber separado cada trayecto en grupos, la última parte del procedimiento es la clasificación de cada tormenta en un grupo determinado mediante el algoritmo KNN supervisado. En este algoritmo supervisado, cada tormenta es una composición de 64 trayectorias agrupadas y el porcentaje de cada grupo en la composición de cada tormenta es la característica utilizadas para enseñar el algoritmo KNN supervisado. No utilizamos la información de la magnitud de precipitación, ya que buscamos clasificar las avenidas de acuerdo con el origen de humedad. El objetivo de esta clasificación es separar las avenidas en grupos más homogéneos que puedan sintetizar una serie de características importantes relacionadas con la generación de avenidas en la cuenca, pero no para dar una previsión precisa de la magnitud de las avenidas.

Después de clasificar cada tormenta en una clase, se han realizado diferentes análisis a partir de la separación de las avenidas en distintos grupos. Por ejemplo, la identificación de la frecuencia de las avenidas en cada sitio según los aspectos hidroclimatológicos. Realizamos tests *t-Student* con un nivel de significancia del 95% para verificar si las avenidas son de hecho no homogéneas y si las series temporales son el resultado de diferentes procesos de formación. Como resultado de esta separación, se puede identificar si las leyes de frecuencia de avenidas pueden ser realmente el resultado de una población mixta de diferentes tipos de avenidas. Específicamente, se realizó una estimación de las frecuencias de los diferentes tipos de tormentas relacionadas con las avenidas en cada sitio y la evaluación de si los valores medios de la magnitud de las avenidas y las varianzas son significativamente diferentes cuando son generados por una clase diferente de tormentas. Este procedimiento nos da una idea de los aspectos hidroclimatológicos de las avenidas en España.

RESULTADOS

Datos hidrológicos y análisis preliminar de tendencias

Las series de caudales máximos anuales en las 14 estaciones estudiadas se presentan en la Figura 2. Estas series se presentan junto con las líneas de tendencia de "Loess" (regresión local, resultado de un polinomio ajustado localmente a lo largo de la serie histórica) para que se pueda tener una idea visual de las tendencias generales de series temporales. Las

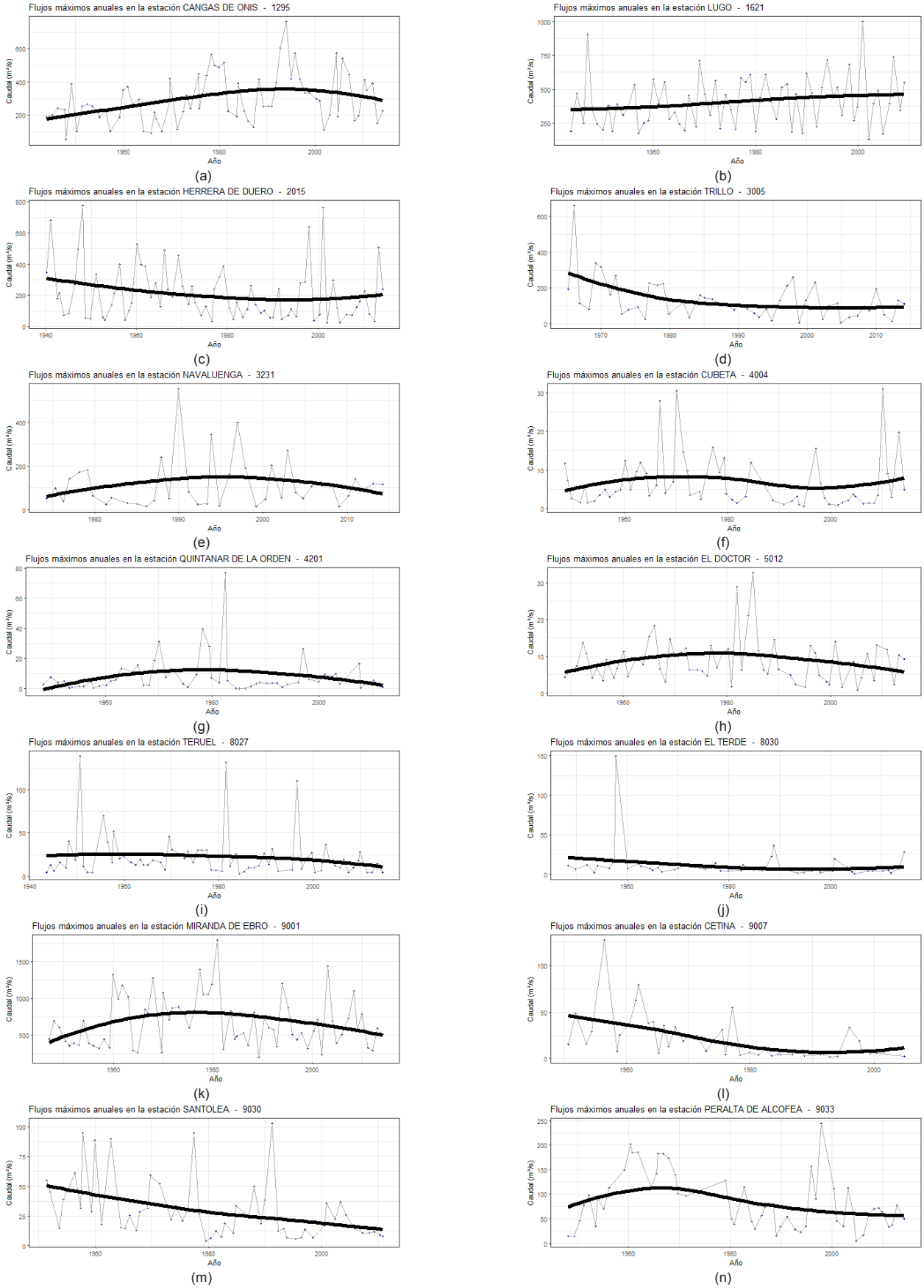

Figura 2 | Series históricas de caudales máximos anuales y líneas de tendencias LOESS en las 14 estaciones de aforo utilizadas en el estudio.

tendencias observada confirman resultados anteriores de Morán -Tejeda et al. (2011), Lorenzo-Lacruz et al. (2012), Mediero et al. (2014) y Martínez-Fernández et al. (2013), los cuales indican una tendencia general negativa de los caudales en España, principalmente durante el período 1959-2009 (Mediero et al., 2014). Las regiones hidrológicas con estas tendencias negativas son Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Júcar y Ebro, localizadas en el centro, sur y este de España.

Trayectorias de tormentas y clasificación con K-Medias

Para cada dato de caudal máximo anual observado (Figura 2) se identificaron las trayectorias de las tormentas que los generaron. Cada trayectoria es una composición de 72 puntos (uno por hora) que representa el viaje de una partícula atmosférica durante 3 días antes de la llegada de la tormenta al punto de la estación de aforo. Cada tormenta es una composición de 64 de esas trayectorias. En la Figura 3, presentamos cinco ejemplos típicos de tormenta. En esta figura, la escala de color indica la humedad específica en *g* de vapor de agua por cada *kg* de aire. Los colores azulados están relacionados con un mayor contenido de humedad mientras que los rojos representan paquetes de aire seco.

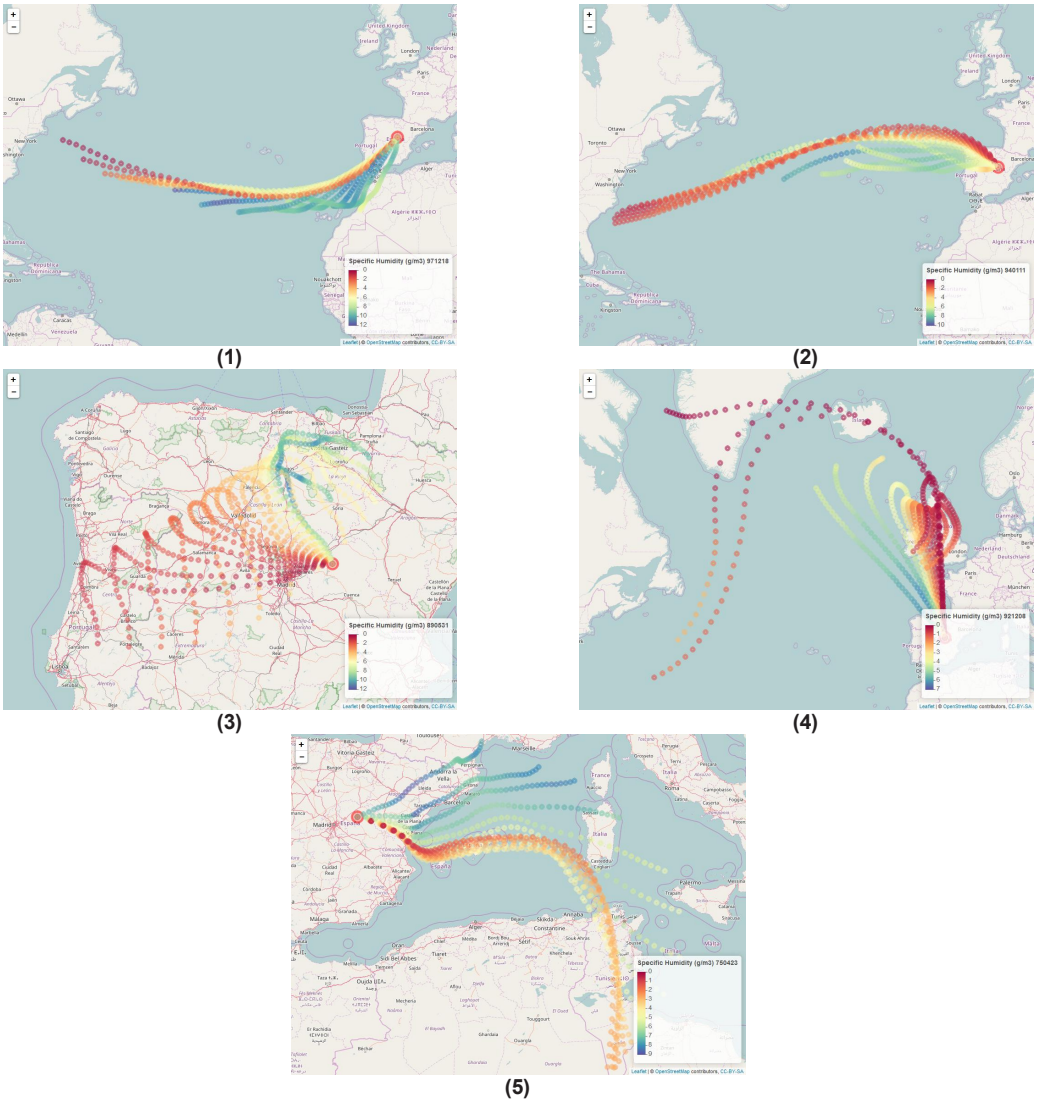

Figura 3 | Ejemplos de tormentas en la estación de aforos 3005: (1) Atlántico Tropical en 18 de diciembre de 1997, (2) Atlántico Meridional, en 11 de enero de 1994; (3) Reciclaje, en 31 de mayo de 1989; (4) Norte en 08 de diciembre de 1992; y (5) Mediterráneo, 23, abr, 1975.

Se han seleccionado las cinco clases de trayectorias de tormentas más habituales en España según su origen: (1) Atlánticas Tropicales; (2) Atlánticas del Oeste; (3) Reciclaje de humedad en la Península Ibérica; (4) Mar Cantábrico; y (5) Mar Mediterráneo. Esta clasificación aplicada a la estación de aforo 3005 se basó en un análisis visual, pero demostró ser

extremadamente eficaz al separar diferentes tormentas con diferentes magnitudes. También fue eficaz al explicar la evolución de las tormentas en el tiempo. Por lo tanto, esta clasificación se extendió a otras estaciones de medición.

Resultados similares de clases de tormentas en estos cinco tipos están descritos en algunos estudios anteriores. Por ejemplo, Tout y Kemp (1985), en la descripción de los principales patrones de viento en España, utilizaron nombres distintos para cualificar vientos parecidos: Vientos Vendaval, originados en el Océano Atlántico, observados principalmente en períodos de invierno; Cierzo y Galerna, originarios del Atlántico Norte, Mar del Norte y Golfo de Vizcaya, también observados principalmente en invierno; Lebeche y Levante, del Mediterráneo, observadas principalmente durante la primavera y el verano (Tout y Kemp, 1985). Los tipos de tormentas (1) y (2) pueden estar asociados con el transporte de humedad de una manera organizada que comúnmente se llama Ríos Atmosféricos cuando toman la forma de filamentos a escala planetaria de humedad atmosférica (Steinschneider y Lall, 2015, Barth et al., 2017). El reciclaje de los caudales de humedad (tormentas de tipo 3) ha sido reportado como una fuente importante de humedad en la parte central de España (Krklec y Domínguez-Villar, 2014). Las tormentas del tipo (4) y (5) se han reportado como los principales patrones relacionados con la precipitación en la península septentrional y oriental, respectivamente (Martin-Vide y López-Bustins, 2006).

En el procedimiento de agrupamiento, las 48.320 trayectorias que generaron las 755 inundaciones en España se han clasificado primero en uno de los cinco grupos presentados en la Figura 3, utilizando las cuatro características de cada trayectoria (latitud y longitud del punto de origen, pendiente vertical y dirección principal de la trayectoria durante las 72 horas anteriores). Como cada tormenta es una composición de trayectorias y a cada una de estas trayectorias corresponde una clase, el porcentaje de diferentes clases dentro de cada tormenta fue utilizado para separar tormentas con el algoritmo KNN supervisado que fue entrenado usando tormentas de Trillo.

Como resultado de este proceso de clasificación, presentamos en la Figura 4 un mapa con los tipos de tormentas más frecuentes en cada estación aforo. El tipo de tormenta más frecuente en general en España es la número 2 que está relacionada con los vientos del oeste del Atlántico. Este es el tipo de tormenta más frecuente en el oeste y el norte de España. En el sureste del país, las avenidas con origen en el Mar Mediterráneo (número 5) son las más frecuentes. Estos resultados son consistentes con Coch y Mediero (2016), que reportaron patrones muy similares analizando regímenes hidrológicos en España, basados en caudales medios mensuales. En Coch y Mediero (2016), los regímenes de caudal fueron identificados como Atlánticos cuando los caudales promedio son más altos durante el período diciembre-febrero. En la región Mediterránea (cuenca baja del Ebro y cuenca del Júcar) los flujos medios son más altos durante el período abril-junio. Una clasificación similar también puede encontrarse en Mediero et al. (2015).

En la Figura 5 se muestran los resultados basados en la estacionalidad de las avenidas. En los paneles (a), (b) y (c) los resultados de diferentes tipos de avenida son presentados junto con el número mensual de ocurrencias. El color de las barras indica los tipos de avenida. El panel (a) representa todas las estaciones estudiadas en España mientras los paneles (b) y (c) representan aquellos con régimen Atlántico y Mediterráneo de avenidas. En los paneles (d), (e) y (f) los se representan los valores de inundación normalizados en todas las estaciones de medición estudiadas (valores de inundación menos el promedio de la muestra dividido por la desviación estándar de la muestra). El color de los puntos también indica los tipos de avenida y el panel (d) representa todas las estaciones estudiadas mientras los paneles (e) y (f) representan las estaciones con régimen Atlántico y Mediterráneo, respectivamente.

En general, las avenidas de las estaciones del régimen Atlántico se concentran en los meses de invierno (diciembre-marzo). Esas inundaciones son principalmente de origen atlántico, debido al patrón de circulación de vientos de oeste (tipo de inundación número 2). Las inundaciones que ocurren fuera de este período son sobre todo generadas por tormentas del norte, pero muy pocas debidas a la circulación mediterránea. En estas estaciones, estos modos de circulación no sólo son los menos frecuentes y temporalmente distintos, sino que también representan avenidas de menor intensidad (panel (c)). En las estaciones de régimen mediterráneo, las avenidas tienen dos picos en la estacionalidad, a finales de la primavera y también durante el otoño (mayo-junio y octubre-noviembre). En todos esos meses, las avenidas se relacionan principalmente con las tormentas del Mediterráneo y del Reciclaje (tipos 5 y 3). Fuera de esos períodos, las tormentas atlánticas (tipo 2) son más frecuentes en esas estaciones. El panel (d) muestra que las inundaciones que ocurrieron en junio y octubre tienen valores promedio más altos y también que se deben principalmente a las tormentas del Mediterráneo y del Reciclaje. Tampoco en el Mediterráneo ni en las

estaciones de régimen atlántico, hubo avenidas anuales observadas en agosto-septiembre, lo que indica un riesgo de inundación muy bajo en el país durante estos meses.

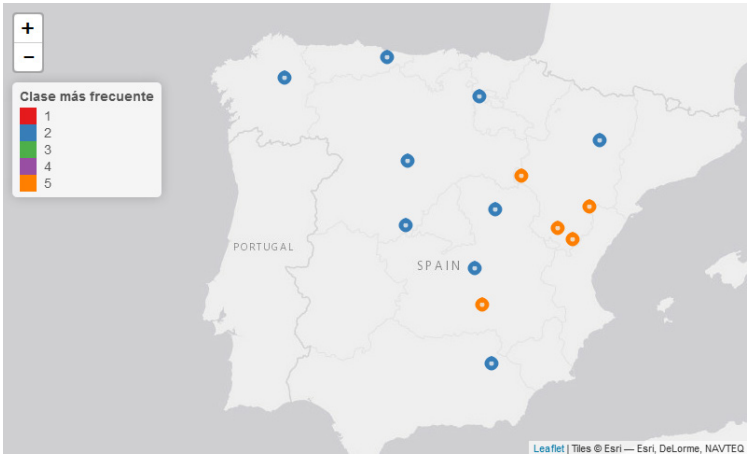

Figura 4 | Distribución espacial de los tipos de tormentas que son más frecuentes en las estaciones de Aforos (Tormentas Atlánticas Meridionales son las más frecuentes en 10 de las 14 estaciones y las Mediterráneas son las más frecuentes en cuatro).

Las tormentas mediterráneas en general están influenciadas por las masas de aire cálido y húmedo del Mar Mediterráneo (Herrera et al., 2010). Observando los histogramas en los paneles (b) se puede ver que la mayor frecuencia de las avenidas de tormentas Atlánticas y de Reciclaje se observa durante la primavera y el verano. García-Ortega et al. (2007) describió los mecanismos de formación de tormentas importantes en la cuenca del Ebro como una combinación de humedad del mar Mediterráneo con altas temperaturas registradas durante el verano en la cuenca del Ebro. Este mecanismo de formación convectiva se relaciona en nuestro procedimiento de clasificación principalmente debido al tipo de tormenta número 3 (tormentas de humedad de reciclado), las más frecuentes en este período.

También fueron estudiadas las principales fuentes de humedad origen de las avenidas en España. En la Tabla 2 se presenta el contenido de humedad de diferentes tipos de tormenta en general en España (primeras cinco filas) y según los dos regímenes de avenidas (regímenes Atlánticos y Mediterráneos en filas de 6 a 15). En esta tabla se puede observar que, en España, los tipos de circulación que provienen del Atlántico (sexta columna de la tabla) representan las mayores cantidades de humedad durante las avenidas. Durante las avenidas, las tormentas atlánticas son responsables del 49,2% de la humedad total que llega a España (suma de Tormentas Atlánticas Occidentales y Tropicales, en la Tabla 2). Esto no significa que cada tormenta atlántica individual traiga la humedad más alta, pero que son el tipo de tormenta más frecuente en el país (cuarta columna). Las tormentas del Mediterráneo llevan el mayor contenido de humedad en promedio por tormentas (tercera columna). El contenido de humedad promedio presentado en la Tabla 2 es la suma de la humedad específica a lo largo de los 16 puntos en la columna vertical en el día de la tormenta (valor promedio para las 4 tormentas en ese día). Este mayor contenido de humedad en las tormentas mediterráneas está probablemente relacionado con el hecho de que las tormentas del Mediterráneo son más frecuentes en los meses más cálidos y, por lo tanto, el máximo contenido de humedad del aire a saturación es mayor para temperaturas más elevadas. Una idea similar es válida para el reciclaje y las tormentas tropicales del Atlántico (aire más cálido, mayor contenido de humedad).

Desde la línea seis hasta la 15, se puede ver que la humedad media por tormenta (tercera columna) es muy similar en los regímenes predominantes del Atlántico y del Mediterráneo. Sin embargo, la frecuencia relativa de las tormentas se diferencia mucho entre estos dos grupos. La frecuencia relativa de las tormentas derivadas de vientos del oeste y del norte es mucho más alta en las estaciones clasificadas como atlánticas que en las estaciones de régimen mediterráneo, donde el reciclaje y las tormentas mediterráneas son mucho más frecuentes. Siendo así, el porcentaje de contenido de humedad total sigue el mismo patrón. Estos resultados muestran una consistencia entre las clasificaciones de las regiones de avenida según dos enfoques muy diferentes: mediante el uso de regímenes de caudal y también por el análisis de las tormentas realizadas en este estudio.

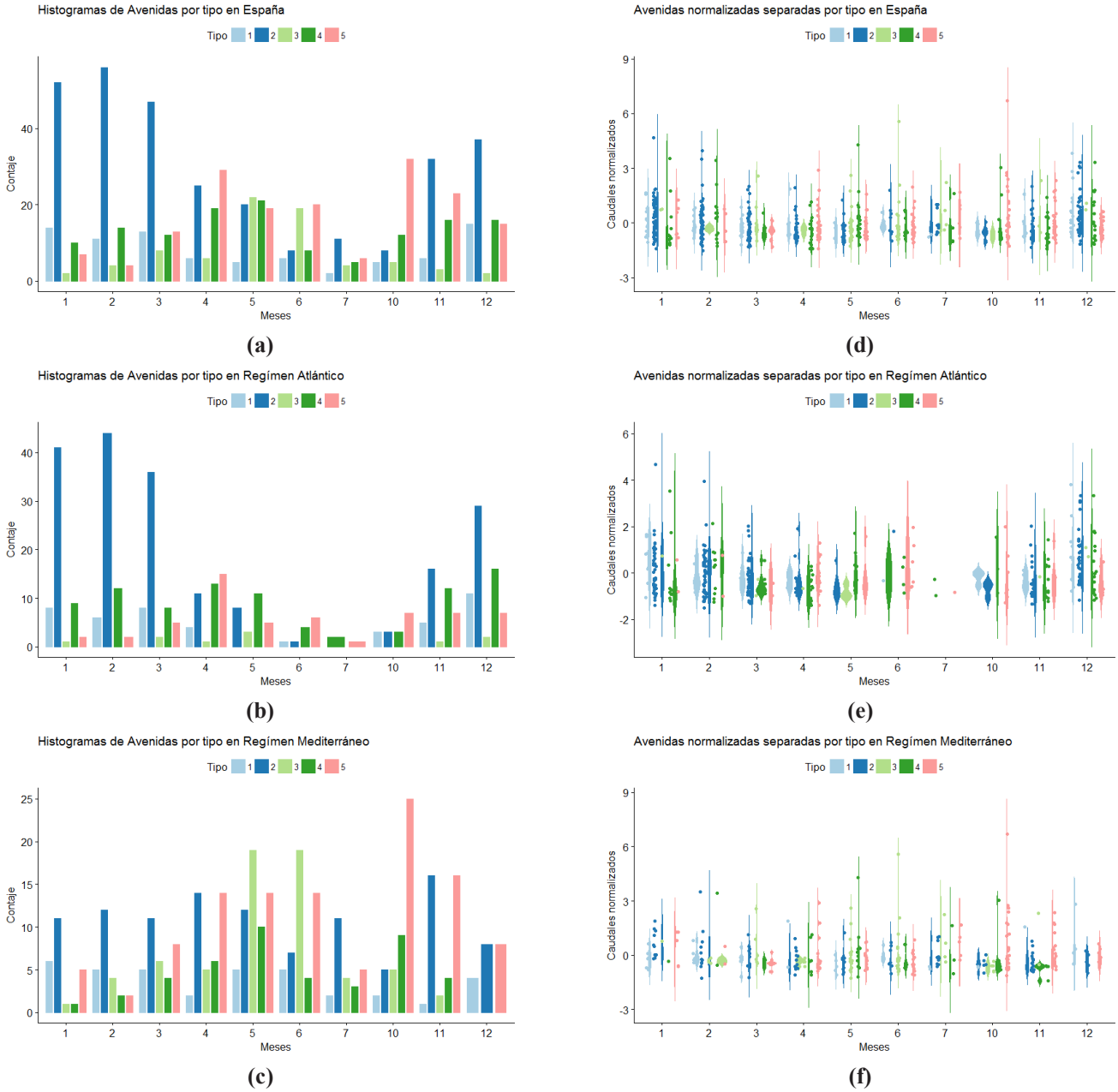

Figura 5 | Histogramas de frecuencia de avenidas separatas por tipos de tormentas (paneles **a, b** y **c**) y análisis temporal de la magnitud de los tipos de avenidas (paneles **d, e** y **f**).

La información sobre el contenido de humedad durante las avenidas se detalló en el espacio y el tiempo en la Figura 6. Este patrón temporal de contenido de humedad se evalúa en el panel superior. En esta gráfica, se pueden ver algunas periodicidades en estos patrones temporales. Por ejemplo, las inundaciones del Mediterráneo (Tipo 5) varían en ciclos de 5 a 6 años, mientras que las inundaciones del Atlántico varían con un patrón de frecuencia más baja. Esto indica que es probable que la humedad en diferentes partes del país se vea modulada por influencias cíclicas a gran escala. Los aspectos espectrales de cada tipo de inundación no fueron analizados en este estudio, pero podrían ser investigados con mayor detalle en futuras investigaciones. La segunda gráfica de esta figura muestra el predominio de tormentas Atlánticas Occidentales en el país una vez que casi todas las estaciones de medición tienen una fracción importante de la humedad atlántica en el contenido específico de humedad. La importancia relativa de esta fuente de humedad es más débil en las estaciones 9007 y 9030, ambas en la cuenca del Ebro. En esta misma figura se puede apreciar la creciente importancia de las tormentas mediterráneas en esas regiones y una influencia menor en las cuencas septentrionales y suroccidentales (Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana y Guadalquivir).

Tabla 1 | Contenido medio de humedad y frecuencias de tipos de avenidas en España y en las regiones con régimen Atlántico/Mediterráneo (la humedad media es la humedad específica media a lo largo de 16 alturas, desde 10 a 6010 m).

Régimen hidrológico	Tipo de avenida	Humedad Media (g/kg)	Frecuencia		Porcentaje del contenido total de humedad (%)
			N	%	
España	Atlántico Tropical	44,7	83	11,0	11,9
España	Atlántico Meridional	39,4	295	39,2	37,3
España	Reciclaje	45,5	75	10,0	10,9
España	Norte	33,0	132	17,5	14,0
España	Mediterráneo	48,1	168	22,4	25,9
Atlántico	Atlántico Tropical	43,3	46	11,8	6,4
Atlántico	Atlántico Meridional	40,1	188	48,2	24,2
Atlántico	Reciclaje	41,7	10	2,6	1,3
Atlántico	Norte	32,1	89	22,8	9,2
Atlántico	Mediterráneo	46,5	57	14,6	8,5
Mediterráneo	Atlántico Tropical	46,4	37	10,2	5,5
Mediterráneo	Atlántico Meridional	38,1	107	29,5	13,1
Mediterráneo	Reciclaje	46,1	65	17,9	9,6
Mediterráneo	Norte	35,0	43	11,8	4,8
Mediterráneo	Mediterráneo	48,9	111	30,6	17,4

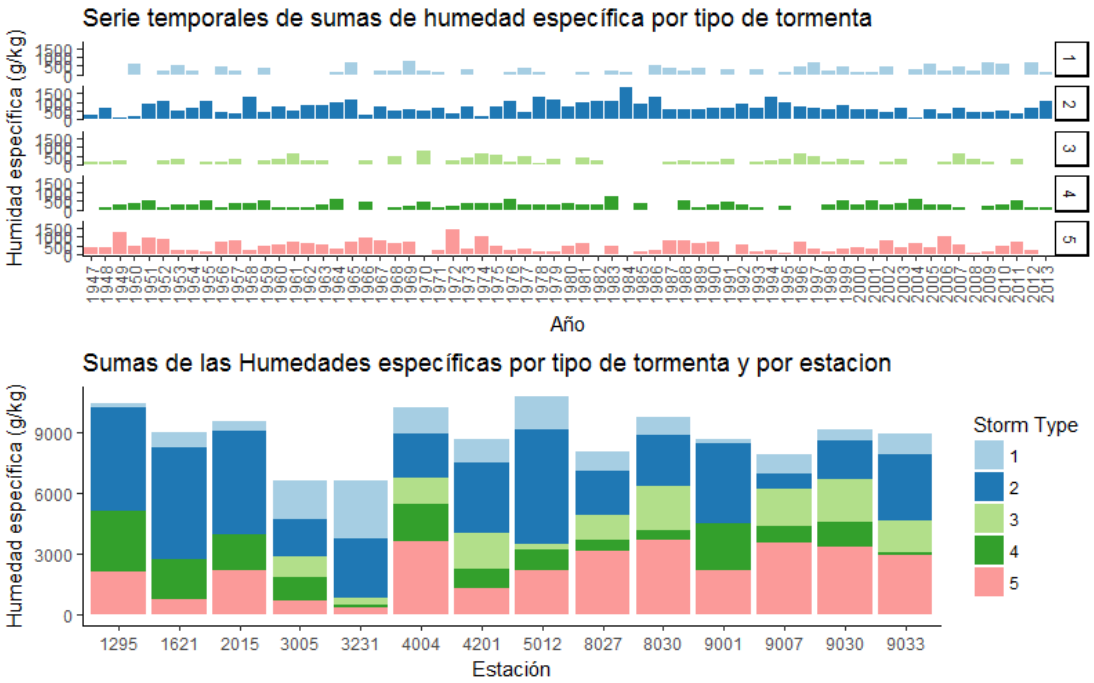

Figura 6 | Series históricas de transporte de humedad durante flujos máximos anuales en España separados por tipos de tormentas y contenido de humedad media a lo largo del tiempo en las distintas estaciones de aforos.

Para evaluar la influencia de esos distintos tipos de tormentas directamente en las magnitudes de las avenidas, comparamos las inundaciones Atlánticas y No Atlánticas utilizando una prueba unilateral de t-Student a un nivel de significancia del 0,05. Hemos reducido los tipos de tormenta a sólo dos categorías porque en los algoritmos K-Means aplicados a la clasificación de tormentas, los errores de clasificación más comunes fueron entre los tipos de inundación 1 y 2 y entre tipos de inundación 3 a 5. Esto indica que no es fácil de definir una línea clara entre los diferentes tipos de tormentas. Además, podría indicar que los mecanismos de generación de esos tipos de tormentas podrían ser similares, una vez que los tipos de tormenta número 1 y 2 puedan estar relacionados con la dinámica oceánica y las tormentas 3 a 5 pueden estar relacionadas con las interacciones Océano/Continente. Teniendo esto en cuenta, propusimos la comparación entre los dos grupos mayores de tormentas: Atlántico y No-Atlántico.

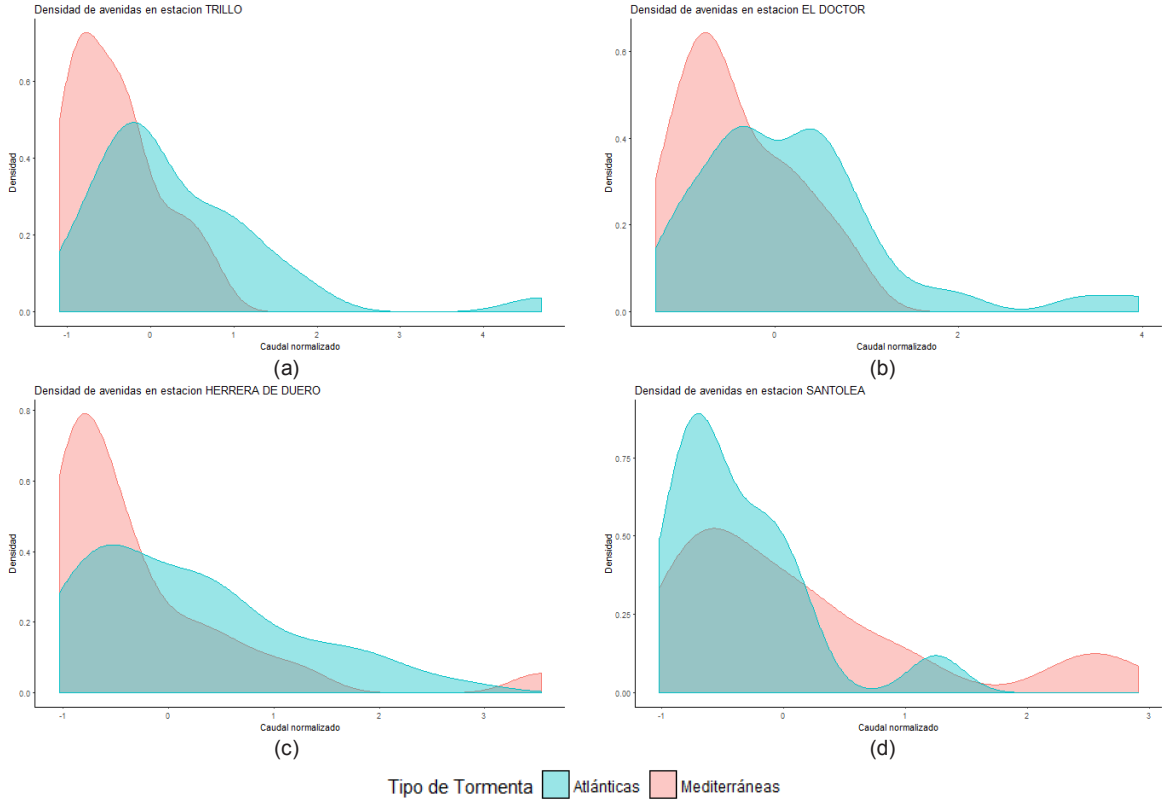

Figura 7 | Gráficas de densidades de los valores medios de las inundaciones en 4 estaciones con avenidas medias significativamente diferentes - normalmente donde los valores medios de avenidas son más bajos, las avenidas también se concentran alrededor de estas medias (mayor densidad) lo que indica una menor variabilidad.

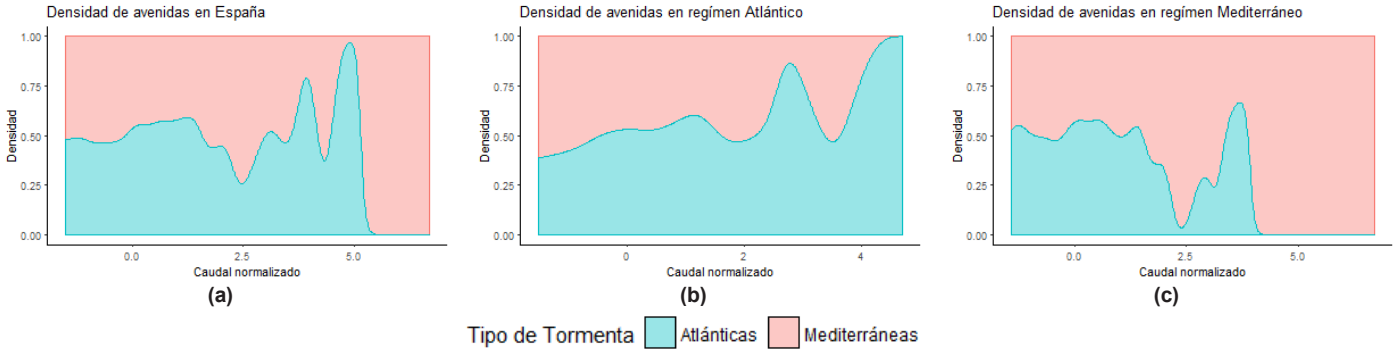

Figura 8 | Porcentaje de tipos de inundación según magnitudes de inundación en estaciones en toda España y también de régimen Atlántico y Mediterráneo.

Las gráficas de densidad de esas cuatro estaciones según estos dos grupos (Atlántico y No-Atlántico) se presentan en la Figura 7. En el panel (a) a (c), se ve que las tormentas atlánticas tienen mayores medias de magnitud de las avenidas y la densidad es menos concentrada alrededor de estos valores medios. En el panel (d) ocurre el revés: las tormentas atlánticas tienen valores medios más bajos y el diagrama de densidad muestra que las observaciones están más densamente concentradas alrededor de este valor medio. Esto podría indicar que en estos sitios, las avenidas son suficientemente diferentes hasta el punto en que podríamos considerarlas como muestras no homogéneas, descritas por una mezcla de diferentes distribuciones, cada una de ellas relacionada con un proceso atmosférico distinto con diferentes promedios y varianzas.

También fueron evaluadas todas las inundaciones normalizadas de los regímenes Atlántico y Mediterráneo en conjunto en la Figura 8. En esta figura se presenta la frecuencia relativa de cada tipo de tipo de inundación de acuerdo con el tamaño de las inundaciones normalizadas. De esta gráfica es evidente la conclusión de que en las regiones del régimen atlántico, las avenidas tienden a desviarse más de los valores promedio si se derivan de las tormentas atlánticas. Lo contrario ocurre en las

regiones mediterráneas: las tormentas atlánticas producen menores desviaciones de las inundaciones medias y las inundaciones más extremas se deben a las tormentas mediterráneas, de reciclaje y del norte. Estos resultados indican que es posible mejorar las previsiones de las magnitudes de las inundaciones en el país identificando el tipo de tormentas a medida que llegan.

CONCLUSIONES

Se ha analizado el comportamiento estacionario de los caudales máximos anuales en España mediante la identificación de las trayectorias de tormentas que causan esas avenidas y la estimación de la humedad del aire mediante el uso de datos de reanálisis NCEP / NCAR y el modelo HySplit. Cada trayectoria de tormentas fue asociada a una avenida máxima anual en 14 estaciones de aforo en España. Hemos clasificado y agrupado dichas trayectorias en cinco tipos diferentes de avenidas. La clasificación mostró que en España dos grandes regiones pueden estar asociadas con los modos de circulación atlántica y mediterránea. Esos resultados son coherentes con estudios previos realizados en España, especialmente Coch y Mediero (2016) y Mediero et al. (2015). También es importante mencionar que estos resultados muestran una consistencia entre las clasificaciones de las regiones de inundación según dos enfoques muy diferentes: mediante el uso de regímenes de caudales y también por el análisis de las tormentas.

También verificamos que diferentes tipos de inundaciones tienen valores promedio de inundación significativamente diferentes en cuatro de las 14 estaciones de medición. También, en general, las avenidas normalizadas en España tienen un comportamiento bastante distinto en función del origen de la tormenta y de la región de interés: en general, las avenidas más grandes en regiones de régimen Atlántico son en general de origen atlántico, mientras que lo contrario ocurre en las regiones mediterráneas: las tormentas más grandes tienen su origen en otro sitio que no es el Atlántico.

Entendemos que este enfoque agrega información significativa que ayuda a entender mejor la dinámica de las avenidas a lo largo del tiempo, una vez que agrega la información cualitativa de los patrones atmosféricos a los datos de inundación. Hasta donde sabemos, ningún estudio previo de inundaciones en España utilizó este enfoque para ningún propósito hidroclimatológico. Tampoco, se tiene conocimiento de ninguna aplicación del modelo HYSPLIT en estudios climatológicos e hidrológicos a gran escala. También entendemos que este es una metodología interesante para ser adoptada en otras regiones con diferentes características hidroclimatológicas.

En cuanto a la clasificación de trayectorias de tormentas usando algoritmos KNN, el algoritmo supervisado se desempeñó razonablemente bien con el conjunto de pruebas, con una tasa de error del 33%. Entendemos que es algo menor que la tasa de exactitud esperada, una vez que todavía requiere mucho esfuerzo en la corrección de la clasificación errónea mediante inspección visual. Esto es un inconveniente que requiere más investigación, por lo que este algoritmo de clasificación podría ser utilizado de una manera más sistemática con un mayor número de estaciones y tormentas. A pesar de ello, es interesante observar los tipos frecuentes de clasificación errónea que el algoritmo produce. Los errores más frecuentes en el procedimiento de clasificación fueron la mezcla de los tipos de tormenta (1) y (2) y también una confusión entre los tipos de tormenta (3) a (5). Esas clasificaciones erróneas son comprensibles ya que a veces es realmente muy difícil determinar una línea clara que separa esos patrones. Tiene sentido también porque en realidad se derivan de los mismos patrones de circulación a gran escala: los dos primeros con una gran importancia de los conductores oceánicos y los últimos tres con una gran influencia de la interacción entre las masas de aire tierra-océano.

Al observar los tipos más frecuentes de avenidas presentados en la Figura 4, se puede observar que el patrón espacial de los principales tipos de circulación relacionados con inundaciones en España es coherente con estudios previos que informaron la influencia del Mar Mediterráneo en la fachada sureste de la Península Ibérica (por ejemplo, Martin-Vide y López-Bustins, 2006), las masas de aire del Atlántico oeste y suroeste en las partes central y suroeste de la Península (Goodess y Jones, 2002) y el Golfo de Vizcaya en la parte norte de la Península (Goodess y Jones, 2002). La influencia del Océano Atlántico en la costa norte de España (región Cantábrica) es también de gran importancia.

En la evaluación de diferentes magnitudes de avenida y su relación con diferentes tipos de avenidas (Figura 7), se observó que en cuatro de las 14 estaciones de medición esto es estadísticamente significativo, indicando que los diferentes tipos

de inundaciones son parte de diferentes distribuciones de frecuencia de avenida, con varianzas medias y asimetría. En otras palabras, indica que la serie temporal máxima anual no es homogénea al ser el resultado de diferentes procesos atmosféricos con patrones significativamente diferentes. Comparando la Figura 2 y la Figura 7, se puede ver también que tres de las estaciones donde se identificó un comportamiento no estacionario también tienen diferentes patrones de circulación con contribuciones significativamente diferentes dependiendo de si la tormenta es Atlántica o no. Esto puede indicar que, al menos para esta muestra de estaciones de medición, el compartimiento atmosférico puede desempeñar un papel importante al explicar diferentes patrones de inundaciones a lo largo del tiempo.

Al analizar todas las inundaciones normalizadas del régimen atlántico y mediterráneo, es muy claro que en las regiones del régimen atlántico las inundaciones son más frecuentes y tienden a desviarse más de los valores medios si se derivan de las tormentas atlánticas. Lo contrario ocurre en las regiones mediterráneas: las tormentas atlánticas producen menores desviaciones de las inundaciones promedio y las inundaciones más extremas se deben a las tormentas del Mediterráneo. Estos son resultados muy importantes ya que podrían, por ejemplo, mejorar los pronósticos de avenida, identificando el tipo de tormenta a medida que llega y también podría mejorar los estudios de regionalización.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido realizado bajo la financiación del Servicio Geológico de Brasil (CPRM), de la Coordinación de Formación de Personal de Nivel Superior de Brasil (CAPES) y del proyecto CGL2014-52570 ‘Impacto del cambio climático sobre la ley de frecuencia bivariada de avenidas’ concedido por el Ministerio de Economía y Competitividad de España.

REFERENCIAS

Barth, N. A., Villarini, G., Nayak, M. A., White, K. 2017. Mixed populations and annual flood frequency estimates in the western United States: The role of atmospheric rivers. *Water Resources Research*. Vol. 53, 257–269, doi:10.1002/2016WR019064.

Coch, A. Mediero, L. 2016. Trends in low flows in Spain in the period 1949–2009, *Hydrological Sciences Journal*, 61:3, 568-584, DOI: 10.1080/02626667.2015.1081202.

Draxler, R. R., Hess, G. D. 1997. Description of the HYSPLIT4 modeling system”. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224. Silver Spring, MD, EUA: NOAA Air Resources Laboratory. http://warn.arl.noaa.gov/documents/reports/arl-224.pdf.

———. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. Australian meteorological magazine, 47 (4): 295–308.

Draxler, R. R., Stunder, B., Rolph, G., Taylor, A. 1999. HYSPLIT4 user’s guide. NOAA Tech. Memo ERL ARL-230,. Silver Spring, MD, EUA: NOAA Air Resources Laboratory. http://www.villasmunta.it/pdf/User_guide.pdf.

García-Ortega, E.; Fita, L.; Romero, R.; López, L.; Ramis, C.; Sánchez, J. L. 2007. Numerical simulation and sensitivity study of a severe hailstorm in northeast Spain. *Atmospheric Research*. Vol. 83, pp. 225–24.

Goodess, C. M., Jones, P. D. 2002. Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall. *International Journal of Climatology*. Vol. 22, 1593-1615. DOI: 10.1002/joc.810.

Hartigan, J. A., Wong, M. A. 1979. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society*. Vol. 28, No. 1, pp. 100-108.

Herrera, S., Fita, L., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. 2010. Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes from the ENSEMBLES RCM multi-model simulations over Spain. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 115, pp. 21117 – 21129. doi:10.1029/2010JD013936.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J. Jenne, R., Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437–471.

Krklec, K., Domínguez-Villar, D. 2014. Quantification of the impact of moisture source regions on the oxygen isotope composition of precipitation over Eagle Cave, central Spain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 134, pp. 39–54. doi.org/10.1016/j.gca.2014.03.011.

Lima, C., AghaKouchak, A., Lall, U. Classification of mechanisms, Climatic Context, Areal Scaling, and Synchronization of floods: the hydroclimatology of floods in the Upper Paraná River Basin, Brazil. 2017. *Earth Systems Dynamics Discussions*, doi:10.5194/esd-2017-12.

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Morán-Tejeda, E., Zabalza, J. 2012. Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*. 414/415, 463–475.

Martínez-Fernández, J., Sánchez, N., Herrero-Jiménez, C.M. 2013. Recent trends in rivers with near-natural flow regime: the case of the rivers headwaters in Spain. *Progress in Physical Geography*. 37 (5), 685-700.

Martin-Vide, J., Lopez-Bustins, J.-A. 2006. The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 26: 1455–1475. doi:10.1002/joc.1388.

Mediero, L., Santillán, D., Garrote, L., Granados, A. 2014. Detection and attribution of trends in magnitude, frequency and timing of floods in Spain. *Journal of Hydrology*. 517, 1072–1088. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.040.

Mediero, L., Kjeldsen, T.R., Macdonald, N., Kohnova, S., Merz, B., Vorogushyn, S., Wilson, D., Alburquerque, T., Blöschl, G., Bogdanowicz, E., Castellarin, A., Hall, J., Kobold, M., Kriauciuniene, J., Langm, M., Madsen, H., Onusluel Gül, G., Perdigão, R.A.P., Roald, L.A., Salinas, J.L., Toumazis, A.D., Veijalainen, N., Þórarinsson. O. 2015. Identification of coherent flood regions across Europe by using the longest streamflow records. *Journal of Hydrology*. 528, 341-360. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.016.

Merz, B., Vorogushyn, S., Uhlemann, S., Delgado, J., Hundecha, Y. 2012. HESS Opinions More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series. *Hydrology and Earth Systems Science*, 16, 1379-1387, doi:10.5194/hess-16-1379-2012.

Ming, J., Zhang, D., Kang, S., Tian, W.. 2007. Aerosol and Fresh Snow Chemistry in the East Rongbuk Glacier on the Northern Slope of Mt. Qomolangma (Everest). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 112 (D15): D15307. doi:10.1029/2007JD008618.

Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J.I., Ceballos-Barbancho, A., Vicente-Serrano, S.M. 2011. River regimes and recent hydrological changes in the Duero basin (Spain). *Journal of Hydrology*. 404 (3), 241–258.

Reid, P. A., Jones, P. D., Brown, O., Goodess, C. M., Davies, T. D. 2001. Assessments of the reliability of NCEP circulation data and relationships with surface climate by direct comparisons with station based data. *Climate Research*. Vol. 17, pp. 247-261.

Scarchilli, C., Frezzotti, M., Ruti, P.M. 2010. Snow Precipitation at Four Ice Core Sites in East Antarctica: Provenance, Seasonality and Blocking Factors. *Climate Dynamics* 37 (9–10): 2107–25. doi:10.1007/s00382-010-0946-4.

Shelton, M. 2009. *Hydroclimatology: perspectives and applications.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Sodemann, H., Schwierz, C., Wernli, H. 2008. Interannual Variability of Greenland Winter Precipitation Sources: Lagrangian Moisture Diagnostic and North Atlantic Oscillation Influence. *Journal of Geophysical Research*, 113 (D3). doi: 10.1029/2007JD008503.

Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., Ngan, F. 2015. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96 (12): 2059–77. doi:10.1175/BAMS-D-14-00110.1.

Steinschneider, S., Lall, U. 2015. A hierarchical Bayesian regional model for nonstationary precipitation extremes in Northern California conditioned on tropical moisture exports, *Water Resources Research*, 51, 1472–1492, doi:10.1002/2014WR016664.

Tout, D. G. and Kemp, V. 1985 The named winds of Spain. *Weather*, 40, 322–9.

Vieira-Filho, M. S., Pedrotti, J. J., Fornaro, A.. 2013. Contribution of long and mid-range transport on the sodium and potassium concentrations in rainwater samples, São Paulo megacity, Brazil. *Atmospheric Environment.* v. 79, 299–307.

Wai, K. M., Wang, S. H., Tanner, P. A., Lin. N. H. 2007. A Dual Site Study of the Rainwater Chemistry within the Western Pacific Region. *Journal of Atmospheric Chemistry*. 57 (1): 85–103.