

Impacto Meteorológico de los Ríos Atmosféricos en las Precipitaciones Anómalas de Galicia.

J. EIRAS-BARCA^{*1}, J.J. TABOADA², G. MIGUEZ-MACHO¹

*jorge.eiras@usc.es

¹ Grupo de Física No Lineal, Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España

³ MeteoGalicia, Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras, Xunta de Galicia, España

RESUMEN

Las estructuras filamentosas con elevada concentración de flujo de vapor de agua contenidas en las regiones prefrontales de los frentes fríos, conocidos en la literatura como Ríos Atmosféricos, son elemento principal del transporte meridional de humedad en las latitudes medias. En este artículo se analiza el impacto meteorológico de estas estructuras sobre la meteorología de Galicia, estudiando su influencia sobre las precipitaciones anómalas a lo largo del período 1979-2007, con una distribución regional de resolución cuadrada de 0.2 grados. Para ello, se presenta la climatología de la detección de Ríos Atmosféricos en el período 1979-2013, en la que se demuestra una actividad superior en los meses de invierno que en los de verano. Se muestra también el porcentaje de eventos de precipitación anómala en coincidencia con la presencia de un Río Atmosférico, así como el porcentaje de Ríos Atmosféricos (RAs) que producen precipitaciones anómalas en Galicia para cada mes del año. Con respecto a la primera relación, se muestran coincidencias cercanas al 90% en algunos puntos de la geografía gallega. Con respecto a la segunda relación, se muestra que para algunos puntos y meses del año, tan sólo el 20% de los RAs detectados sobre Galicia producen precipitación anómala en cada punto. Este porcentaje puede verse considerablemente incrementado si se imponen condiciones de persistencia a la detección del RA.

Palabras Clave: Ríos Atmosféricos, Precipitaciones Anómalas, Galicia.

1. Introducción

Más del 90% del transporte meridional de humedad está concentrado en un 10% de la circunferencia terrestre, en el interior de estructuras filamentosas (cientos de km de ancho y miles de km de largo) conocidas como Ríos Atmosféricos (RAs) (Newell et al.,

1992; Zhu and Newell, 1998; Ralph et al., 2004) Estas estructuras se asocian a las regiones prefrontales de los frentes fríos, conocidas como “warm conveyor belts” (WCB) acompañando a ciertos sistemas ciclónicos desprendidos del frente polar o cuya ciclogénesis ha tenido origen en latitudes tropicales (e.g. Stohl et al., 2008), y se presentan como las regiones más cálidas y

húmedas del sistema. Posteriormente, ha sido probado que un RA puede ser mantenido por diferentes WCB, así como más de uno de los primeros pueden ser contenidos en un único de los últimos (Sodemann and Stohl, 2013).

La definición original de los RAs presenta estos fenómenos como estructuras contenidas en campos de viento intenso ($>12.5 \text{ ms}^{-1}$) con una cantidad de vapor de agua en columna vertical integrada superior a los 2cm (e.g. Ralph et al., 2004; Ralph and Dettinger, 2011). Sin embargo, estudios posteriores plantean que la proyección regional de este fenómeno requiere que las condiciones de detección sean restablecidas en función del área de interés (e.j., Lavers et al., 2012).

Debido a la elevada cantidad de vapor de agua contenida estas estructuras, las mismas encuentran su región natural de existencia en niveles bajos de la troposfera. (Zhu and Newell, 1998) muestran que existen en todo momento entre 4 y 5 RAs por hemisferio, transportando cada uno de ellos, desde las regiones tropicales y subtropicales hasta las latitudes medias en dirección zonal, una cantidad de agua precipitable equiparable al caudal del Río Amazonas. La intensa actividad de esta fenomenología en lo que a transporte de vapor de agua se refiere, sugiere que su importancia para el ciclo hidrológico de las latitudes medias es alta. Adicionalmente, diversos estudios sobre diferentes escenarios de cambio climático, proyectan que tanto su intensidad como su frecuencia, presentarán una tendencia global al crecimiento (Lavers et al., 2013b; Dettinger, 2011a).

La conexión entre la llegada de un RA y la presencia de precipitación extrema ha sido analizada para diferentes regiones (Lavers et al., 2013a ; Dettinger et al., 2011b). Todos los estudios concuerdan en que la relación es alta, aunque variable en función de diversos factores

como la posición geográfica de la región, la orografía, o el forzamiento atmosférico (Gimeno et al., 2014).

La región española de Galicia, geográficamente contenida en el Norte del Margen Atlántico Ibérico (MAI); presenta un alto potencial para la influencia de la llegada de los Ríos Atmosféricos. Por un lado, su costa es accidentada, favoreciendo el alzamiento orográfico de un eventual RA, lo que potenciará la precipitación de su contenido de humedad. Por otro lado, es una región altamente afectada por sistemas dinámicos ciclónicos en los meses de invierno, así como por la penetración de frentes activos. Adicionalmente, estudios contenidos en la literatura prueban que el corredor tropical y subtropical del Atlántico Norte, con origen en el Golfo de México, es la principal fuente de agua precipitable para la región gallega a lo largo de todo el año (Gimeno et al., 2010; Drumond et al., 2011). Este corredor es la ruta natural de los RAs que afectan a Península Ibérica, con dinámica zonal, transportando vapor de agua procedente de las regiones subtropicales atlánticas, así como de vapor de agua capturado por evapotranspiración a lo largo del trayecto (Gimeno et al., 2014).

En este artículo se presenta un algoritmo de detección basado en Lavers et al., (2012) modificado para la detección óptima de RAs tanto en invierno como en verano sobre la región de interés. Cruzando su detección con una base de datos de precipitación observada, se presentan conclusiones mensuales y localizadas para cada punto de malla de resolución cuadrada 0.2° , los ratios de coincidencia entre la presencia de eventos de precipitación anómala (EPA) y la llegada de RAs, así como de la llegada de RAs y la presencia de EPA.

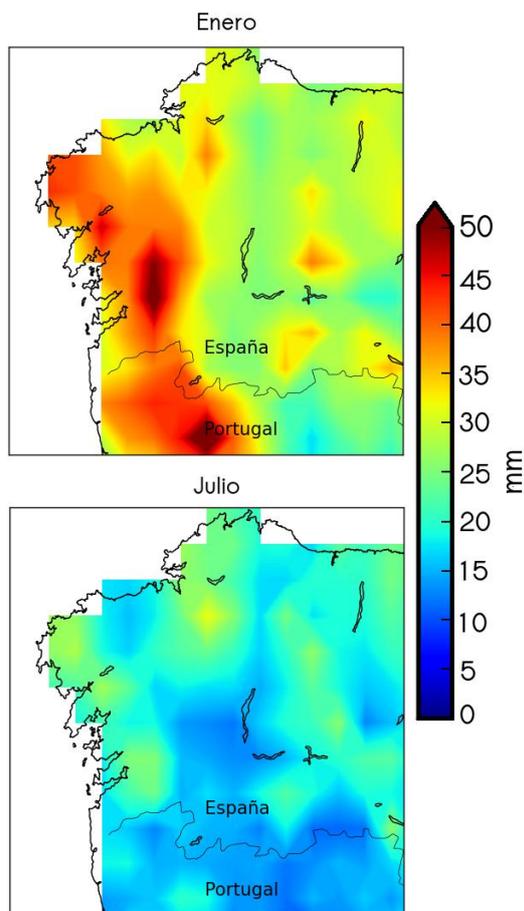


Fig. 1. Percentiles 95 sobre días de lluvia para cada punto de malla en la región de interés. Toda precipitación por encima del valor presentado será considerada anómala. Se presentan los meses de enero y julio a modo de ejemplo.

Adicionalmente, se presenta el procedimiento llevado a cabo para la instalación de dicho algoritmo en la operativa de la agencia meteorológica regional gallega (MeteoGalicia). Esta implementación se realiza con el fin de dotar a esta de un método objetivo de detección del fenómeno. Dicho método serviría de apoyo para la realización de los diferentes avisos ante fenómenos adversos, con el objetivo de minimizar los daños y costes sociales asociados a

la presencia de eventos de riada e inundación. Esta implementación servirá también para la obtención de una estadística que permita evaluar el poder predictivo aportado por una herramienta de detección de RAs frente a eventos de inundación y riada.

2. Datos y procedimiento

Tanto las condiciones de detección (de EPA y de RAs) como los resultados obtenidos han sido planteados y obtenidos de forma relativa al tiempo y al espacio, i.e. son dependientes de cada punto de malla y mes del año.

2.1. Determinación de Precipitaciones Anómalas.

Con el objetivo de determinar el valor por encima del cual se ha de considerar una precipitación como anómala, para cada punto de malla y mes del año; se hace uso de la base de datos IBERIA02. Dicha base es resultado de considerar conjuntamente las bases Spain02, proporcionada por la Universidad de Cantabria (UC), la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) y PT02 del Instituto Portugués de Meteorología (IPMA), cubriendo el período 1950- marzo2008. Esta base presenta la mayor fiabilidad en precipitación observada dado que ha sido creada mediante la interpolación de datos observados por más de 2400 estaciones controladas distribuidas por la Península Ibérica (Belo-Pereira *et al.*, 2011).

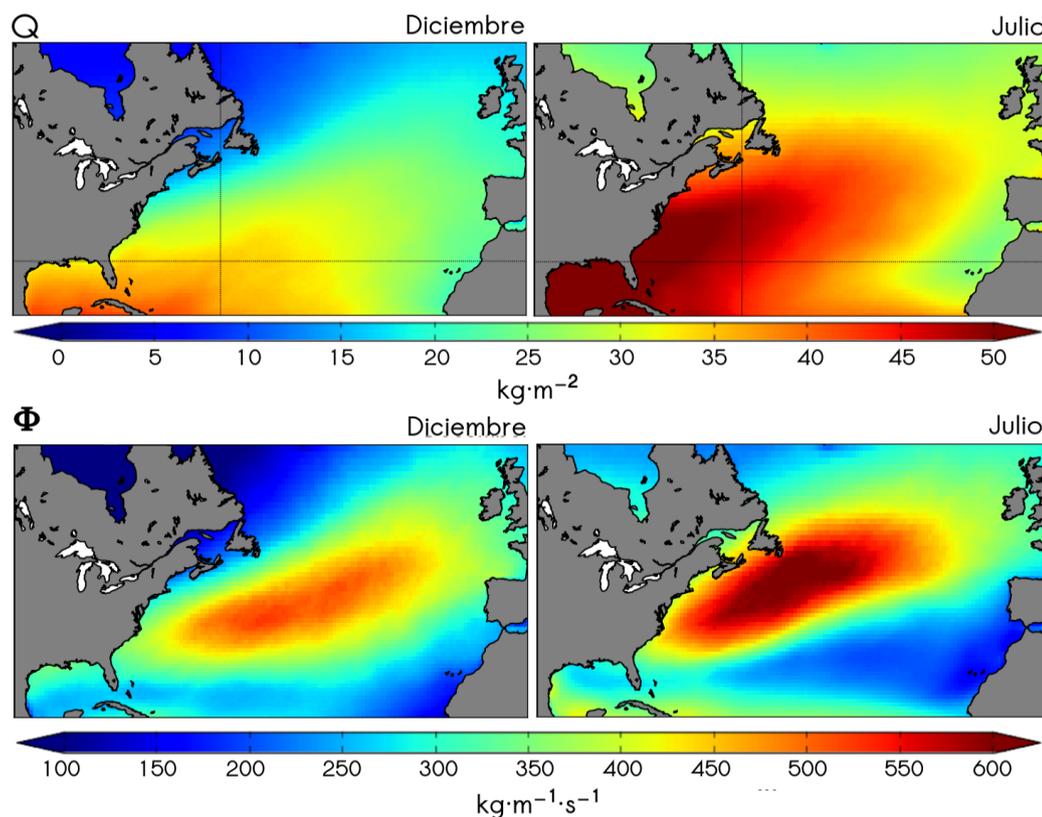


Fig. 2. Umbrales obtenidos sobre el percentil 85 para las variables de columna vertical integrada de vapor de agua (arriba) y su flujo (abajo) sobre el Atlántico Norte. Se presentan a modo de ejemplo los meses de diciembre (izquierda) y julio (derecha). Los puntos del RA deben superar el valor presentado por ellos para su punto.

Para cada punto sobre Galicia, y mes del año en el período 1979-2007 se toma el valor de precipitación. Eliminando los días sin lluvia (≤ 1 mm), se toma el percentil 95 de la serie resultante. Toda precipitación superior a ese valor es considerada anómala.

A modo de ejemplo, la Figura 1 presenta los valores de percentil 85 para los meses de diciembre y julio.

2.2. Detección de Ríos Atmosféricos.

Estudios previos plantean la detección de los RAs en función o bien, de la columna de vapor de agua, o bien de la columna de flujo de vapor de agua. Adicionalmente, se obtienen umbrales fijos a partir de los cuales puede considerarse que un punto de malla está contenido en el interior de un RA, y estos umbrales son usados sobre áreas grandes y para cualquier época del año.

Sin embargo, esta fenomenología es claramente regional, y dependiente de la época del año considerada. En verano, la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera es mayor que en invierno, por lo que un algoritmo basado en columna de vapor de agua sobrestimaré la detección en estos meses. Contrariamente, los flujos advectivos son muy superiores en invierno que en verano, por lo que un algoritmo basado únicamente en la columna de flujo tenderá a subestimar la detección en verano.

Estimamos que el RA debe ser considerado en todo caso como una estructura anómala en contenido de humedad y su flujo. Esta anomalía debe ser analizada con respecto a la región que lo rodea en cada caso, tanto espacial como temporalmente. Por ello, se ha optado por modificar el criterio de

detección presentado en Lavers (2012) con las siguientes imposiciones :

1. El RA deberá cumplir una condición tanto sobre su columna de vapor de agua como sobre su columna de flujo de vapor de agua.
2. Los umbrales que estos valores deberán superar variarán en función del punto y del mes del año. En todo caso, no serán inferiores a los propuestos por la definición inicial.

2.2.1. Determinación de los umbrales

Siguiendo un criterio similar al presentado por Lavers (2012) y Neimann (2008), y considerándose como un percentil apropiado en la representación de eventos anómalos, se toma el percentil 85 de la serie obtenida para cada punto y mes del año con las variables de columna vertical integrada de vapor de agua (ecuación 2.a) y columna vertical integrada de flujo de vapor de agua (ecuación 2.c) obtenidos con un intervalo temporal de 6h sobre la base de datos de *Reanalysis ERAInterim* (0.7° x 0.7°) del ECMWF sobre todo el Atlántico Norte, en el período temporal 1979-2013.

$$Q = \frac{1}{g} \int_0^1 q \frac{\partial p}{\partial \eta} d\eta \quad (2.a)$$

$$(\phi_\lambda, \phi_\varphi) = \frac{1}{g} \int_0^1 (u, v) q \frac{\partial p}{\partial \eta} d\eta \quad (2.b)$$

$$\Phi = \sqrt{\phi_\lambda^2 + \phi_\varphi^2} \quad (2.c)$$

Donde g es la fuerza gravitatoria en superficie, q la humedad específica, p

refiere al nivel de presión, u y v componentes zonal y meridional del viento respectivamente y η refiere a la coordenada híbrida utilizada por el modelo del ECMWF.

A modo de ejemplo se presentan en la Figura 2 los umbrales obtenidos para el mes de diciembre y para el mes de julio.

2.2.2. Algoritmo de detección.

Se toma como base el algoritmo presentado por Lavers (2012) con las modificaciones indicadas.

El procedimiento para la detección es el siguiente:

Para un punto temporal dado (salidas del modelo 00, 06, 12 y 18 horas en el período 1979-2013) se localiza el máximo de Q a lo largo del meridiano 9°30'W y las latitudes contenidas en la costa de Galicia. Si ese máximo supera su umbral correspondiente a su punto de malla y mes del año se procede a evaluar el valor de Φ en dicho punto. Si ese punto o alguno de los vecinos más próximos supera dicho valor, el punto es guardado.

A continuación se busca entre los vecinos más próximos (Norte, Noroeste, Oeste, Suroeste, Sur) aquel que tenga el valor máximo de Q y se repite el procedimiento de comprobación. Con este procedimiento se consigue seguir al RA sobre su región más intensa, lo que garantiza un tracking apropiado. Se continúa hasta que la condición de superación del umbral deje de cumplirse. A la estructura final, para ser considerada como RA se le exigirá una longitud mínima de 2000 km y un desarrollo zonal mínimo de 1000 km.

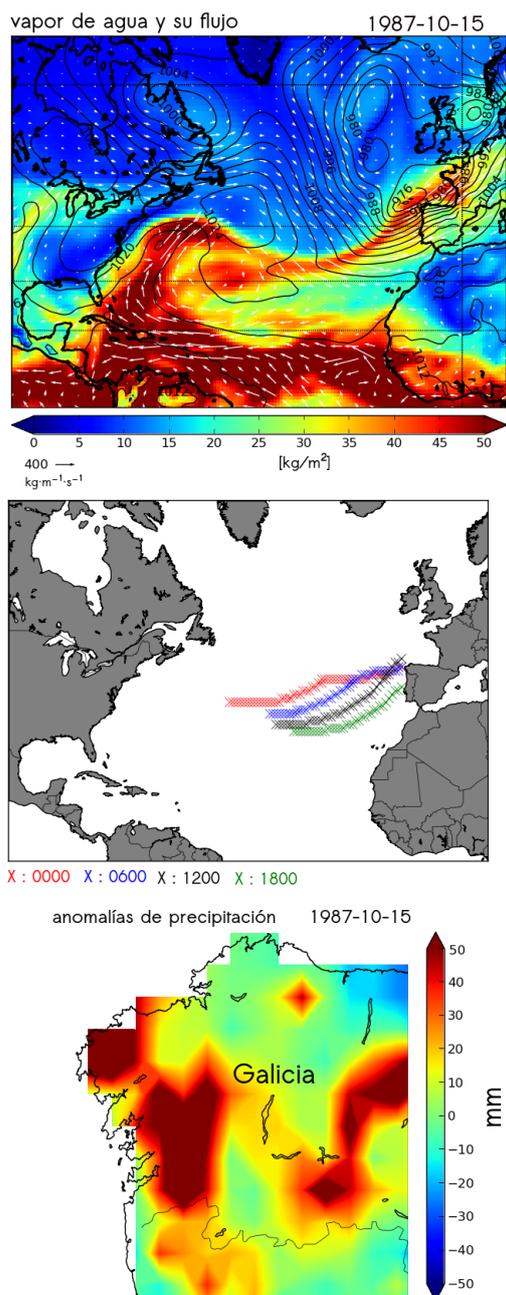


Fig. 3. Superior - Ejemplo de un potente RA impactando sobre Galicia. Medio- Sucesivas detecciones realizadas por el algoritmo sobre todo el Margen Atlántico de la PI a lo largo del día. Inferior - Anomalías de precipitación detectadas en coincidencia con la detección del RA.

La Figura 3 muestra un ejemplo de evento de RA impactando sobre las costas de Galicia, así como las

diferentes detecciones realizadas a lo largo del día por el algoritmo y la precipitación extrema asociada a la llegada del RA, con valores acumulados por encima de 90mm en 24 horas.

2.3. Búsqueda de coincidencias.

Por un lado se ha obtenido una base de datos de eventos de precipitación anómala con una resolución temporal de 24h en el período (1979-2007), y por otro lado se ha obtenido una base de datos de detección de RA a la costa gallega en el período (1979-2013) con una resolución temporal de 6h.

Tras la obtención de las series temporales de interés presentadas en la sección de resultados, se cruzan ambas bases en el período 1979-2007 para concluir, para cada mes del año:

1. El porcentaje local de EPA que están asociados a la llegada de un RA (EPA-RA).
2. El porcentaje de RA que provocan un EPA, tanto imponiendo una condición de persistencia sobre la detección, como sin imponerla (RA-EPA).

En el cruce de ambas bases se permite un intervalo de confianza de 1 día, motivado tanto por la diferencia en la frecuencia temporal, como por la posibilidad que podría tener un RA de producir precipitaciones anómalas el día siguiente a su llegada. De forma que al estudiar si un RA ha favorecido un EPA se comprueba el día de llegada del RA y el siguiente. De la misma manera, al analizar si un EPA ha sido provocado por un RA, se analiza el día del RA y el anterior.

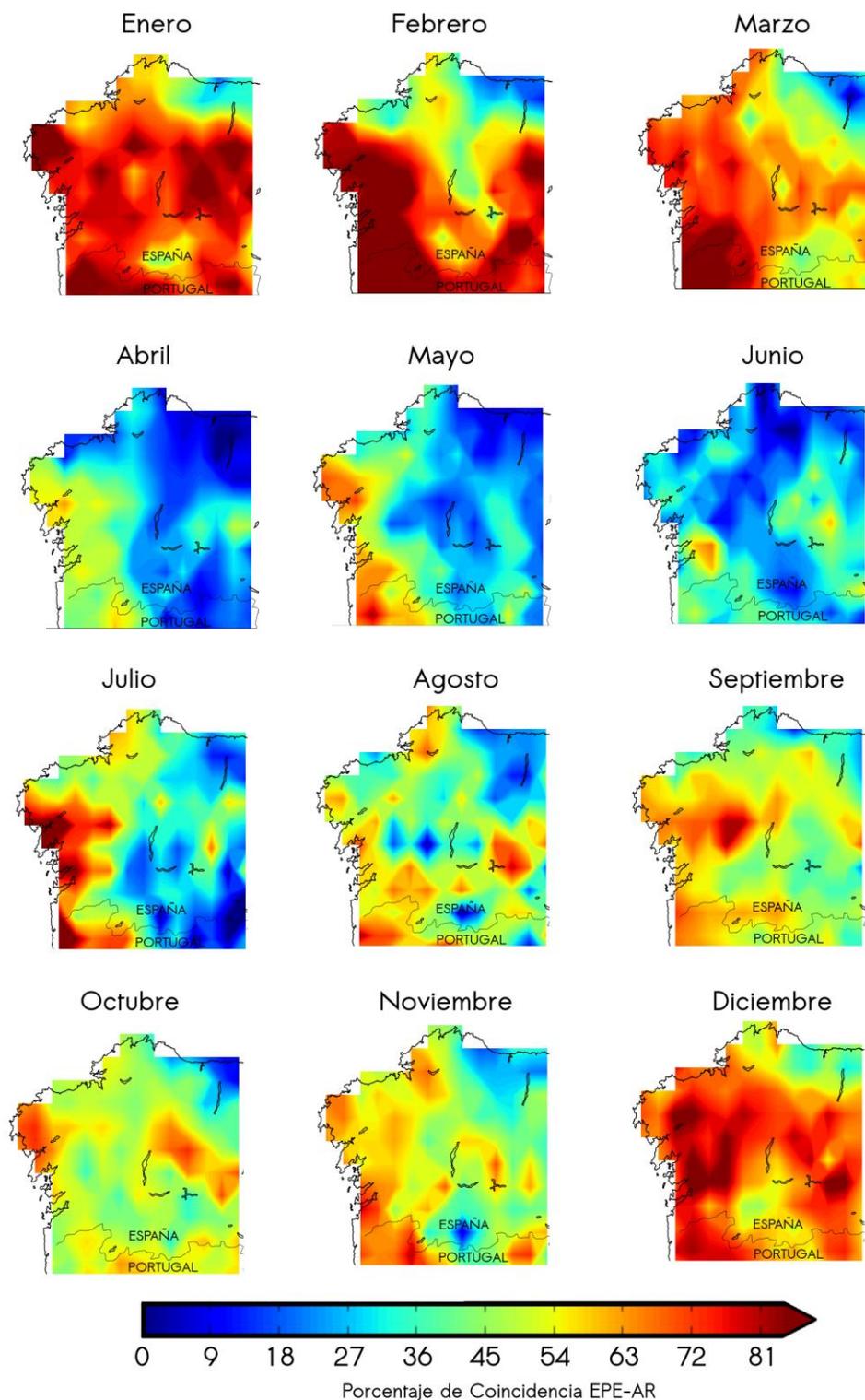


Fig. 4. Para cada punto de malla, porcentaje de Eventos de Precipitación Anómala coincidentes con la detección de un RA (EPA-RA) sobre el litoral de Galicia. Las imágenes se presentan con un suavizado gráfico bilineal.

3. Resultados

3.1 Mapas de coincidencia.

La Figura 4 muestra, para cada mes del año y punto de malla de la base de precipitaciones, el porcentaje de EPA en coincidencia con la detección de un RA (EPA-RA). Se observan regiones en los que el porcentaje de coincidencia es superior al 80%. Esto implica que el 80% de los eventos de precipitación anómala sobre ese punto han ocurrido en coincidencia con la detección de un

RA.. Los meses de invierno presentan una dependencia muy superior de los EPA con los RAs que los meses de verano. Esto puede explicarse en base al carácter de las lluvias en ambas estaciones. Tal y como se describe en Lorenzo *et al.* (2007), mientras que en los meses de verano las precipitaciones anómalas se asocian en un gran porcentaje a fenómenos de carácter convectivo, los meses de invierno asocian estas precipitaciones a la penetración de frentes y la alta actividad

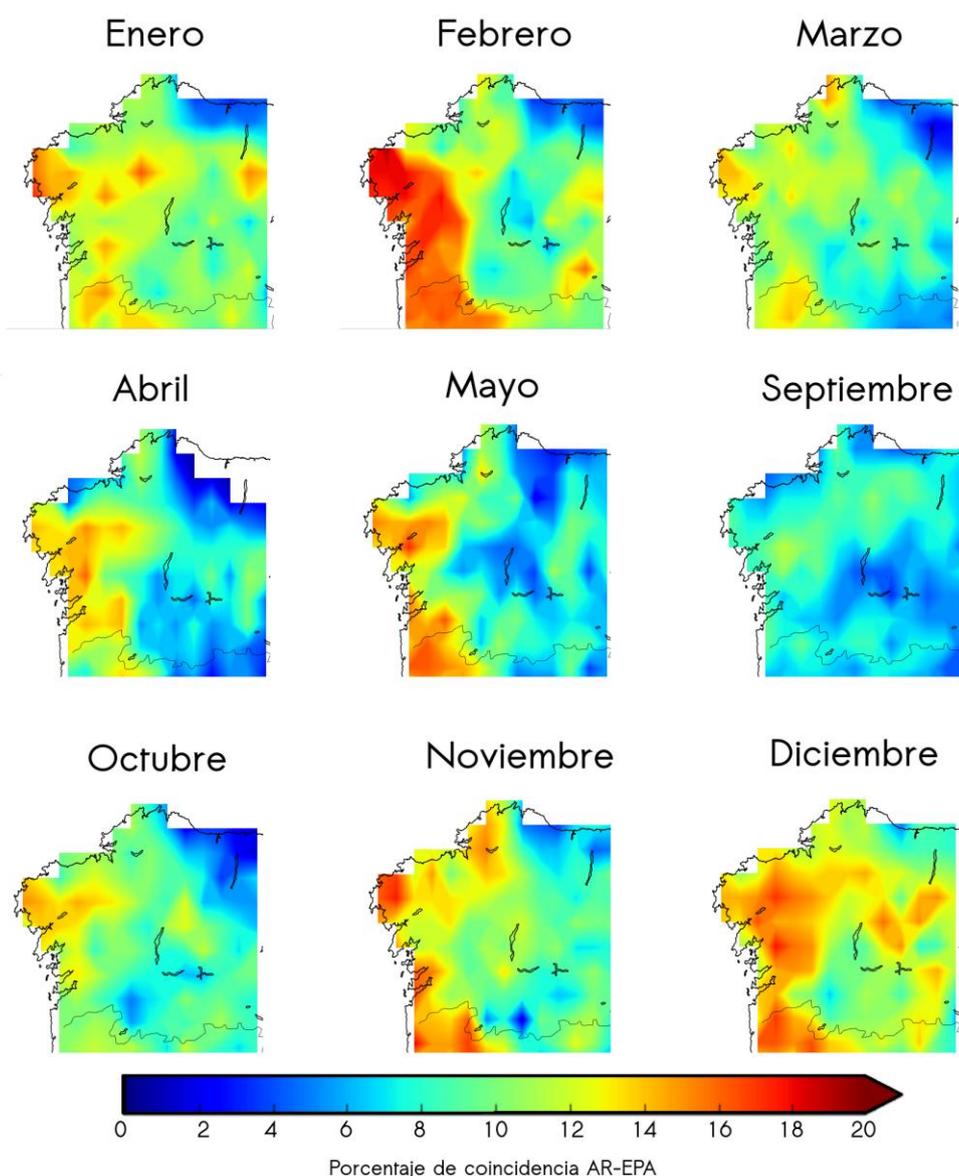


Fig. 5. Para cada punto de malla, porcentaje de detecciones que han provocado un EPA en ese punto (RA-EPA). Las imágenes se presentan con un suavizado gráfico bilineal.

dinámica de la atmósfera, que favorecen la penetración de un RA en la Península Ibérica.

Particularmente, los meses de Diciembre, Enero y Febrero son los que mayor coincidencia presentan. Estos meses se caracterizan por la elevada actividad dinámica de la atmósfera, con flujos advectivos superiores, y un elevado forzamiento natural asociado a los sistemas de bajas presiones. Tanto la intensidad elevada de flujos en la atmósfera como el forzamiento natural de ascendencia asociado a los sistemas dinámicos, favorecen la penetración de RAs y la consiguiente precipitación asociada. Por la contra, los meses de Abril, Mayo y Junio presentan coincidencias bajas. Esto es debido a que, por un lado la actividad dinámica de la atmósfera se ve mermada con respecto a los meses anteriores, y por otro lado, la misma no tiene todavía la capacidad de almacenamiento de vapor de agua que presentan los meses de verano siguientes. Ambos elementos desfavorecen la existencia de RAs.

La Figura 5 presenta el porcentaje de RAs que provocan un EPA en cada

punto de malla (RA-EPA). La distribución es mucho más homogénea que (EPA-RA) y los porcentajes son muy inferiores, con el máximo situado en una coincidencia del 20%. Esto es debido a que la simple llegada de un RA a la región no producirá necesariamente un EPA; otras condiciones, tales como el forzamiento orográfico, sinóptico o la persistencia del RA deberán ser observadas. Si se impone una condición de persistencia a la detección de un río, i.e., que el RA deba ser detectado a lo largo de todo el día, los porcentajes de coincidencia ascienden entre un 50% y un 100%.

Adicionalmente, si se busca el porcentaje de RAs que producen un EPA en algún punto cualquiera de Galicia (en cualquier punto en lugar de en todo punto), se obtiene que un 54.3% (861/1585) de los RAs detectados lo hacen. Este porcentaje es el importante a la hora de evaluar la capacidad predictiva de la detección de un RA frente a eventos de precipitación anómala/extrema.

3.2 Series Temporales.

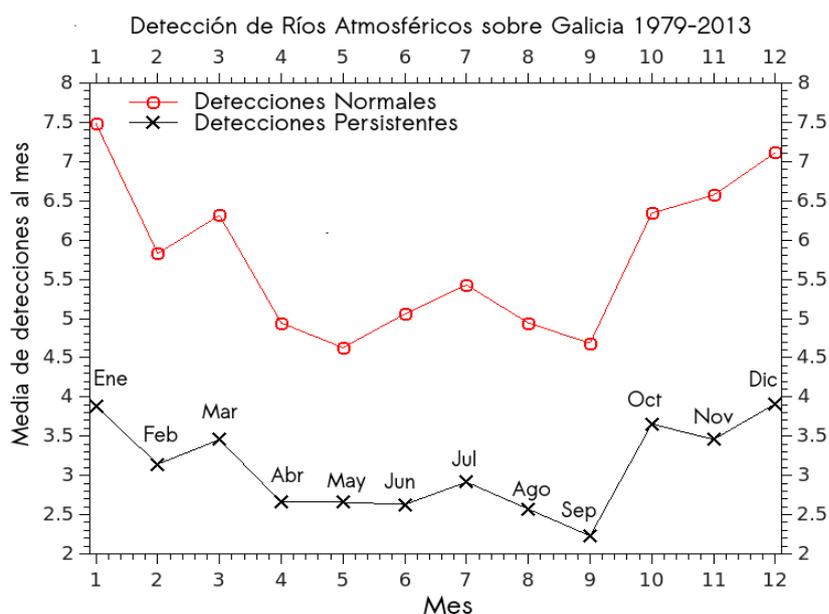


Fig. 6. Serie mensual de detecciones de Ríos Atmosféricos sobre el litoral de Galicia. La serie con icono circular rojo corresponde a los días sobre los que al menos se ha realizado una detección. La serie con aspas negras corresponde a los días sobre los que se ha realizado una detección de forma persistente. La correlación de r-Pearson entre ambas series es 0.43.

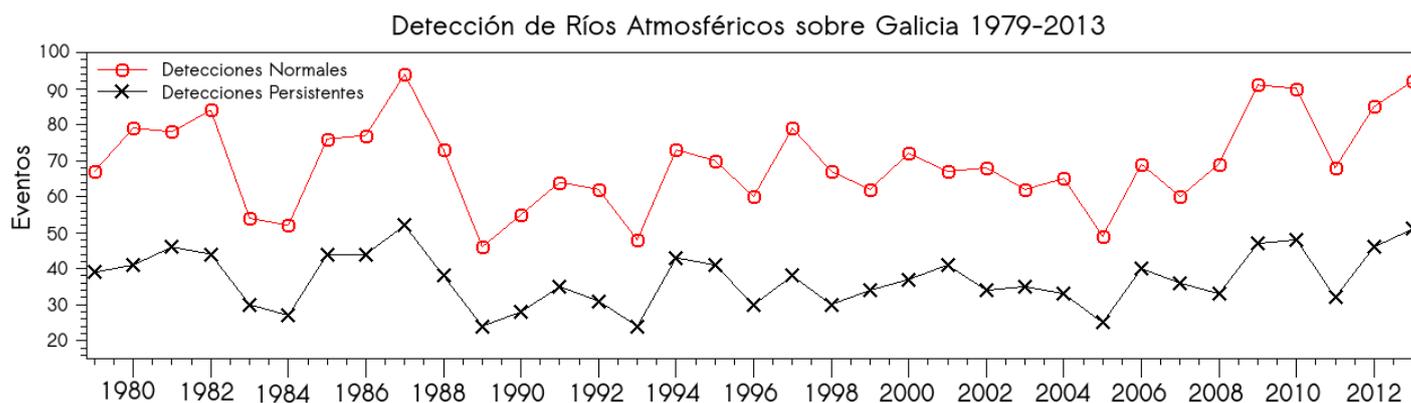


Fig. 7. Serie mensual de detecciones de Ríos Atmosféricos sobre el litoral de Galicia. La serie con icono circular rojo corresponde a los días sobre los que al menos se ha realizado una detección. La serie con aspas negras corresponde a los días sobre los que se ha realizado una detección de forma persistente. La correlación de r-Pearson entre ambas series es 0.62.

La Figura 6 muestra el promedio mensual de detecciones de RAs sobre Galicia en el período 1979-2013. La serie temporal de detecciones normales (sólo se exige una detección a lo largo del día) muestra una variabilidad superior a la serie a la que se le impone una detección persistente (el RA debe ser detectado en todas las salidas de ese día), y en general presenta el doble de casos al mes.

Los meses de invierno, en los que la región de interés sufre un elevado número de incursiones de frentes y sistemas dinámicos presentan una actividad mayor que los meses de verano. A pesar de ello, estos últimos, en los que la atmósfera es rica en vapor de agua presentan un número elevado de detecciones. Particularmente, el mes de julio, en el que la atmósfera ya tiene cantidades abundantes de vapor de agua y en el que existe todavía un remanente dinámico procedente de los meses anteriores, es el que mayor actividad presenta.

La Figura 7 presenta el ciclo anual de detecciones de Ríos Atmosféricos sobre Galicia. La variabilidad de ambas series es elevada, doblando en detecciones ciertos años a otros, como por ejemplo el 1987 que presenta más del doble de detecciones que 1989. Ambos procedimientos de detección, tanto

habiendo impuesto la condición de persistencia como sin hacerlo, pueden ser usados para analizar la correlación de la fenomenología con ciertos modos principales de variabilidad, lo que deberá ser objeto de un estudio posterior.

4. Implementación del algoritmo para predicción operativa.

El algoritmo de detección de RA presentado en este artículo ha sido instalado en la operativa de predicción de MeteoGalicia, con las siguientes modificaciones :

1. Se aplica sobre el modelo global de predicción GFS4 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) de la NOAA, de forma que se puedan obtener conclusiones a nivel predictivo.
2. Dado que GFS4 no proporciona las variables de forma directa, estas son integradas de forma manual según lo expresado en las ecuaciones 4.a, 4.b y 4.c.

$$Q = \frac{1}{g} \int_{P_S}^{300} q dp \quad (4.a)$$

$$(\phi_\lambda, \phi_\varphi) = \frac{1}{g} \int_{P_S}^{300} (u, v) q dp \quad (4.b)$$

$$\Phi = \sqrt{\phi_{\lambda}^2 + \phi_{\phi}^2} \quad (4.c)$$

Donde P_s refiere a la presión superficial, que es necesario tener en consideración al realizar la integración manual sobre niveles de presión para no incurrir en cantidades incorrectas derivadas del uso de niveles artificiales.

El uso del algoritmo pretende otorgar una herramienta de detección objetiva de la fenomenología, que hasta el momento se sustentaba en el criterio visual del predictor. Dará apoyo a la capacidad predictiva de las precipitaciones anómalas y extremas y previsiblemente mejorará la fiabilidad de las alertas y avisos ante extremos de lluvia en la comunidad gallega.

La validación del funcionamiento de dicho algoritmo será realizada poniendo a prueba su capacidad real de facilitar la alerta ante adversos en los próximos meses en el Departamento de Predicción de MeteoGalicia, y será objeto de una publicación posterior. La Figura 8 presenta un ejemplo de detección obtenido desde el momento de instalación del algoritmo en la operativa. Por el momento no se dispone de estadística suficiente para la presentación de resultados.

5. Conclusiones

En este artículo se han analizado diferentes correlaciones y series temporales concernientes al impacto meteorológico y la climatología de los Ríos Atmosféricos sobre Galicia.

Por un lado, se ha mostrado que el porcentaje de eventos de precipitación anómala ocurridos sobre Galicia presenta un ratio de correlación muy elevado con la detección de un Río Atmosférico. Estos porcentajes presentan variabilidad entre distintos puntos de la región y entre diferentes

meses del año. En general los puntos costeros presentan una dependencia mayor con la llegada de Ríos Atmosféricos que afectan en mayor medida en los meses de invierno.

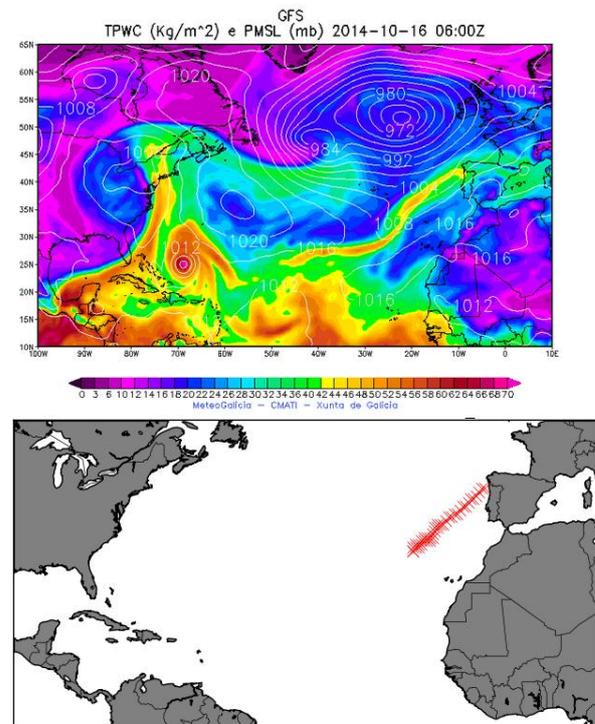


Fig. 8. Ejemplo de detección del algoritmo instalado en predicción operativa de MeteoGalicia. Se detecta un RA el día 16-10-2014. Superior - Salida de agua total precipitable de GFS. Inferior - Representación de los puntos identificados por el algoritmo como eje central del RA durante el proceso de detección.

Por otro lado, se han mostrado los porcentajes de detecciones de Ríos Atmosféricos que producen un evento de precipitación anómala. En estos casos, el ratio de coincidencia disminuye significativamente con respecto a la primera relación presentada. Este hecho es indicativo de que la simple presencia de un Río Atmosférico no es condición suficiente para el favorecimiento de un evento de precipitación anómala. Otros factores, tales como los forzamientos sinópticos y orográficos o la persistencia de las detecciones deben ser tenidos en consideración. En este sentido, los porcentajes pueden doblarse

imponiendo diferentes condiciones razonables de persistencia.

Finalmente, se presentan la climatología asociada a la detección de Ríos Atmosféricos. La distribución mensual muestra que aunque los meses de invierno presentan una mayor actividad que los de verano, las detecciones en estos últimos meses son igualmente considerables. La distribución anual presenta una variabilidad importante, y es susceptible de ser correlacionada con diversos modos principales de variabilidad climática, lo que será objeto de posteriores estudios.

Agradecimientos

Agradecemos a Meteogalicia (consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras de la Xunta de Galicia) el apoyo y el soporte prestado a todos los niveles en la realización del presente estudio.

Agradecemos a la Universidad de Cantabria la cesión de la base de datos SPAIN02 / IBERIA02.

Los datos de reanálisis ERA-Interim han sido obtenidos de la base de datos del ECMWF.

Referencias

- Belo-Pereira M, Dutra E and Viterbo P. (2011). Evaluation of global precipitation data sets over the Iberian Peninsula. *Jour. Geoph. Res.* 116, D20101.
- Gimeno, L, Nieto R., Trigo R.M., Vicente-Serrano S.M. and Lopez-Moreno J.I. (2010) Where Does the Iberian Peninsula Moisture Come From? An Answer Based on a Lagrangian Approach. *Journ. Hydrom.* 11, 421-436.
- Gimeno, L., Nieto R., Vázquez M and Lavers D.A. (2014) Atmospheric Rivers: a mini-review. *Frontiers in Earth Science.* 2, 2.
- Dettinger, M.D. (2011a). Climate Change, Atmospheric Rivers, and Floods in California - A Multimodel Analysis of Storm Frequency and Magnitude Changes. *JAWRA.*47, 3, 514-523.
- Dettinger M.D., Ralph F.M., Das T., Neiman P.J. and Cayan D.R. (2011b) Atmospheric Rivers, Floods and the Water Resources of California. *Water.* 3,2. 445-478.
- Gimeno, L, Nieto R., Trigo R.M., Vicente-Serrano S.M. and Lopez-Moreno J.I. (2010) Where Does the Iberian Peninsula Moisture Come From? An Answer Based on a Lagrangian Approach. *Journ. Hydrom.* 11, 421-436.
- Lavers D.A., Allan R.P., Wood E.F., Villarini G., Brayshaw D.J. and Wade A.J. (2011). Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers. *Geo. Res. Lett.* 38, 23.
- Lavers D.A., Villarini G., Allan R.P., Wood E.F. and Wade A.J. (2012). The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation. *J. Geoph. Res. Atmospheres.* 117, D20.
- Lavers D.A. and Villarini G. (2013a). The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. *Geo. Res. Lett.* 40, 12, 3259-3264.
- Lavers D.A., Allan R.P., Villarini G., Lloyd-Hughes B., Brayshaw D.J. and Andrew J. (2013b). Future changes in atmospheric rivers and their implications for winter flooding in Britain. *Env. Res. Let.* 8, 3, 034010.
- Newell R.E., Newell N.E., Zhu Y. and Scott C. (1992). Tropospheric rivers? – A pilot study. *Geo. Res. Lett.* 19, 24. 2401-2404.
- Ralph F.M. and Dettinger M.D. (2011). Storms, floods and the science of

- atmospheric rivers. *Eos*. 92, 32, 265-266.
- Stohl A., Forster C and Sodemann H. (2008). Remote Sources of water vapor forming precipitation on the Norwegian west coast at 60° N- a tale of hurricanes and atmospheric river. *Journ. Geophys. Res.* 113, D05102.
- Sodemann, H and Stohl A. (2013). Moisture Origin and Meridional Transport in Atmospheric Rivers and Their Association with Multiple Cyclones. *Mon. Wea. Rev.* 141, 8, 2850-2868.
- Zhu Y and Newell R.E. (1994). Atmospheric Rivers and bombs. *Geoph. Res. Lett.* 21, 18, 1999-2002.
- Zhu Y and Newell R.E. (1998). A proposed Algorithm for Moisture from Atmospheric Rivers. *Mon. Wea. Rev.* 126, 3, 725-735.